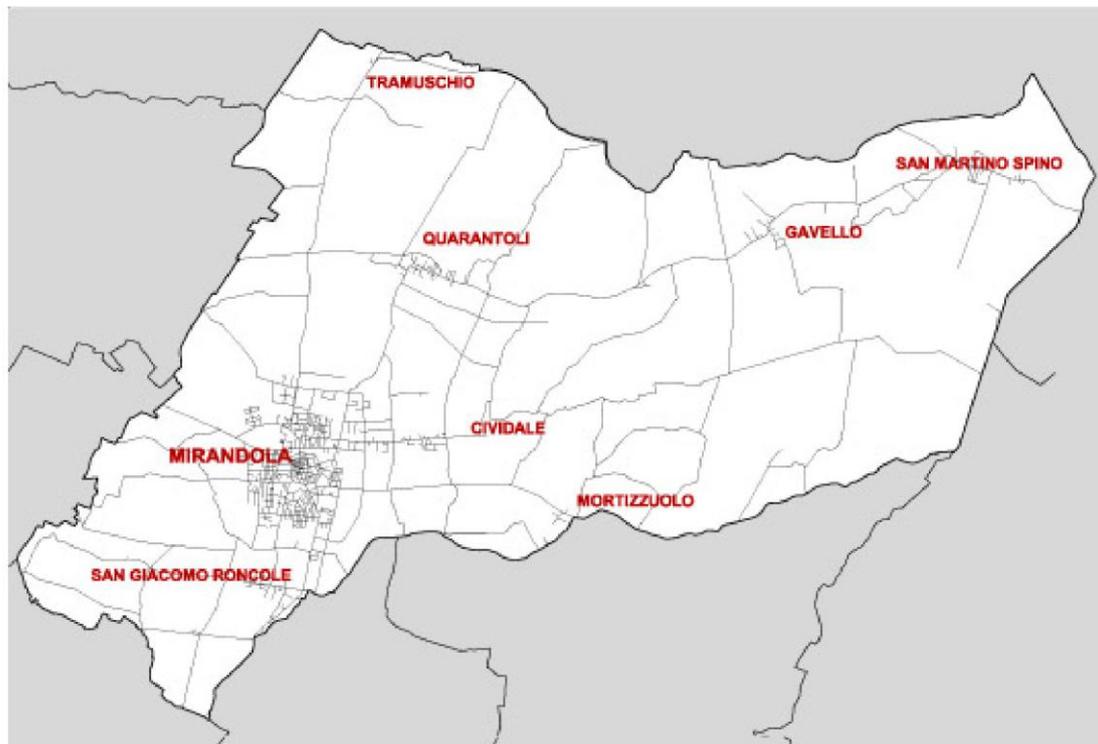




## QUADRO CONOSCITIVO

### MICROZONAZIONE SISMICA



FONTE

Studio di Geologia Tarabusi - Bologna

DATA

26/01/2012



---

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRANDOLA

*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

*Elaborazione tavole cartografiche:* dott. geol. Gabriele Tarabusi

*Elaborazione dei dati stratigrafici:* dott. geol. Ruggero Mazzoni

*Studio del modello di correlazione tra i  
dati delle penetrometrie statiche e i valori  
di Vs:* dott. geol. Leonardo Calzolari

*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:* dott. geol. Luca Bianconi  
dott. geol. Samuel Sangiorgi

*Esecuzione ed elaborazione prove  
penetrometriche con cono sismico:* Geoprogetti S.a.s (su incarico del Comune di Mirandola)

## INDICE

I. Introduzione .....	2
II. Inquadramento geologico e geodinamico-strutturale .....	4
III. Neotettonica e sismicità .....	8
1. Indagini geognostiche e geofisiche.....	12
2. Frequenze naturali dei terreni e contrasti di impedenza .....	25
3. Possibili effetti locali e microzone omogenee in prospettiva sismica.....	30
4. Fattori di amplificazione e aree che necessitano di approfondimenti di livello 3.....	34
5. Potenziale di liquefazione.....	41
6. Approfondimenti richiesti e prescrizioni .....	47
7. Bibliografia.....	55
8. Allegato – Rapporti indagini geognostiche e geofisiche.....	58

## I. INTRODUZIONE

### Criteri di realizzazione dello studio e riferimenti normativi

Il presente studio di Microzonazione Sismica di secondo livello, è stato redatto sulla base delle indicazioni contenute nell'Allegato B della Delibera 1051/2011 della Giunta della Regione dell'Emilia-Romagna, dal titolo "Criteri per la realizzazione degli studi di microzonazione sismica (secondo livello di approfondimento), di cui all'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3907/2010, e s.m.i."

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 rappresentato dagli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica" approvato dal Dipartimento della Protezione Civile e dalla Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome 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";
- Norme del PTCP 2009 della Provincia di Modena – Titolo 4;
- 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".

### Lo studio di microzonazione sismica

Scopo della microzonazione sismica (MS) 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 e in quelle suscettibili di trasformazioni urbanistiche e lungo le fasce a cavallo delle reti infrastrutturali (OPCM 3907/2010). Le aree in cui realizzare la microzonazione sismica sono state indicate dal Servizio Urbanistica Edilizia e Ambiente del Comune di Mirandola, che ha identificato in particolare le zone suscettibili di trasformazioni urbanistiche.

## Elaborati prodotti

I documenti di riferimento e sintesi del presente studio sono costituiti dalle tavole cartografiche. La presente relazione, oltre a caratterizzare e inquadrare l'area del comune di Mirandola nel contesto sismotettonico regionale, descrive le metodologie seguite e illustra i risultati dello studio di microzonazione rappresentati nelle diverse cartografie. Per questa ragione è parso utile che la suddivisione dei primi quattro capitoli principali della relazione seguisse la numerazione delle tavole.

La sintesi dello studio di microzonazione sismica è quindi rappresentato dalle dieci tavole cartografiche, realizzate secondo le specifiche previste dalla Delibera RER 112/2007 per il primo e il secondo livello di approfondimento e sulla base di quanto indicato dagli ICMS.

Lo studio presenta quattro diverse tipologie di cartografia, a ciascuna delle quali è stato assegnato un numero da 1 a 4, che trova corrispondenza nei capitoli della presente relazione identificati con i numeri arabi dall'uno al quattro. Per ciascuna cartografia è stata realizzata una tavola d'insieme dell'intera area comunale in scala 1:25.000, contrassegnata dal solo numero legato alla tipologia. Per le carte di dettaglio in scala 1:5.000, quando presenti, è stata utilizzata una sottonumerazione: ".1" si riferisce alla tavola di dettaglio dell'area del capoluogo e della frazione di San Giacomo in Roncole; ".2" si riferisce alla tavola di dettaglio delle aree di tutte le altre frazioni.

Viene di seguito riportato lo schema logico relativo alla numerazione delle tavole.

<b>Cartografia</b>	<b>Intera area comunale 1:25.000</b>	<b>Capoluogo e San Giacomo in Roncole 1:5.000</b>	<b>Altre frazioni 1:5.000</b>
Carta delle indagini	1		
Carta delle frequenze naturali dei terreni (f0) e dei contrasti di impedenza	2	2.1	2.2
Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica	3	3.1	3.2
Carta dei fattori di amplificazione e delle aree che necessitano approfondimenti di terzo livello	4	4.1	4.2

In allegato alla presente relazione sono riportati i rapporti di prova delle indagini realizzate a supporto dello studio di microzonazione sismica.

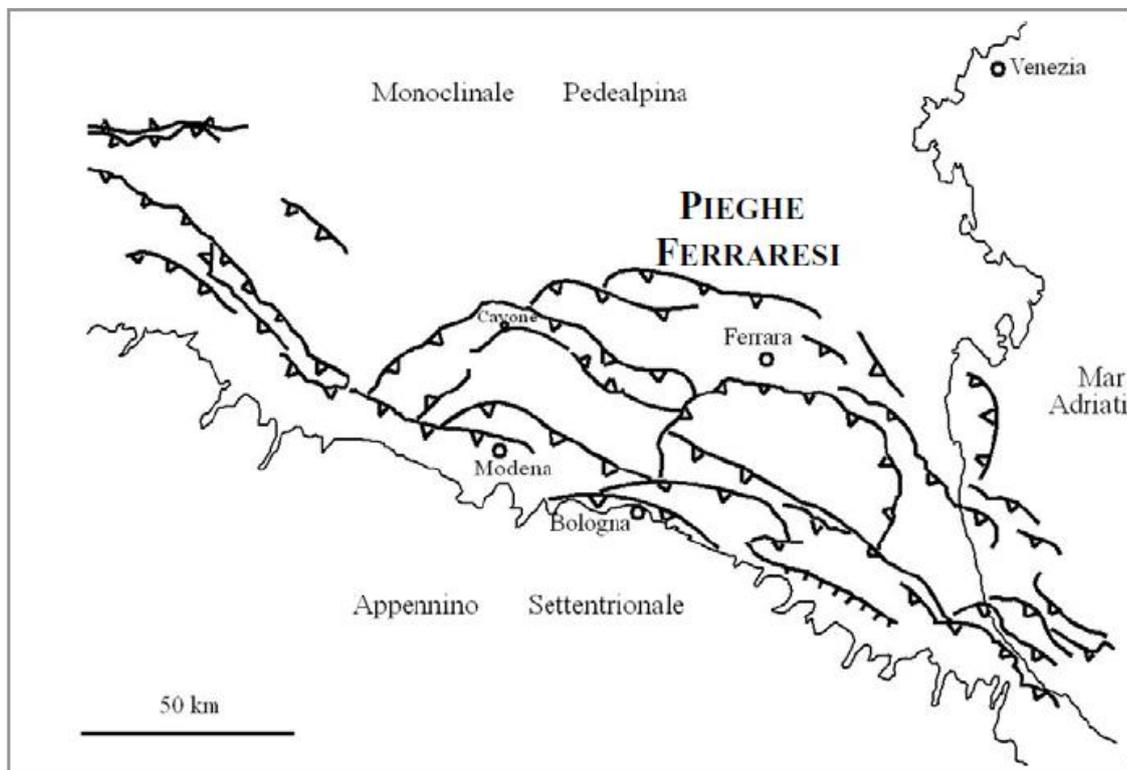
## II. INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEODINAMICO-STRUTTURALE

Il territorio del comune di Mirandola si sviluppa nell'area di bassa pianura modenese.

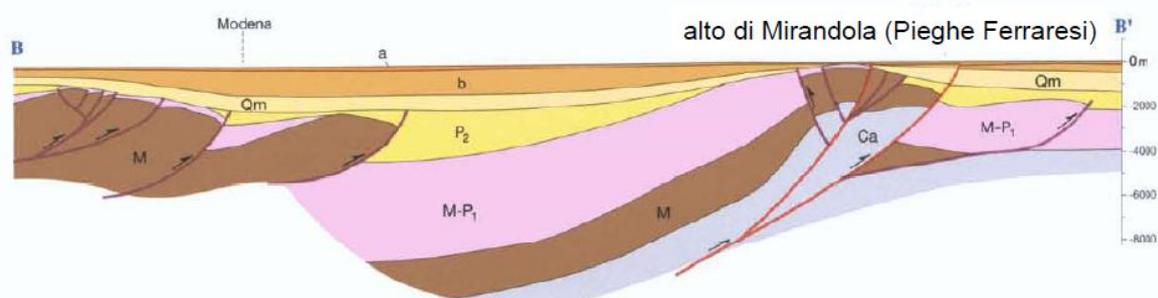
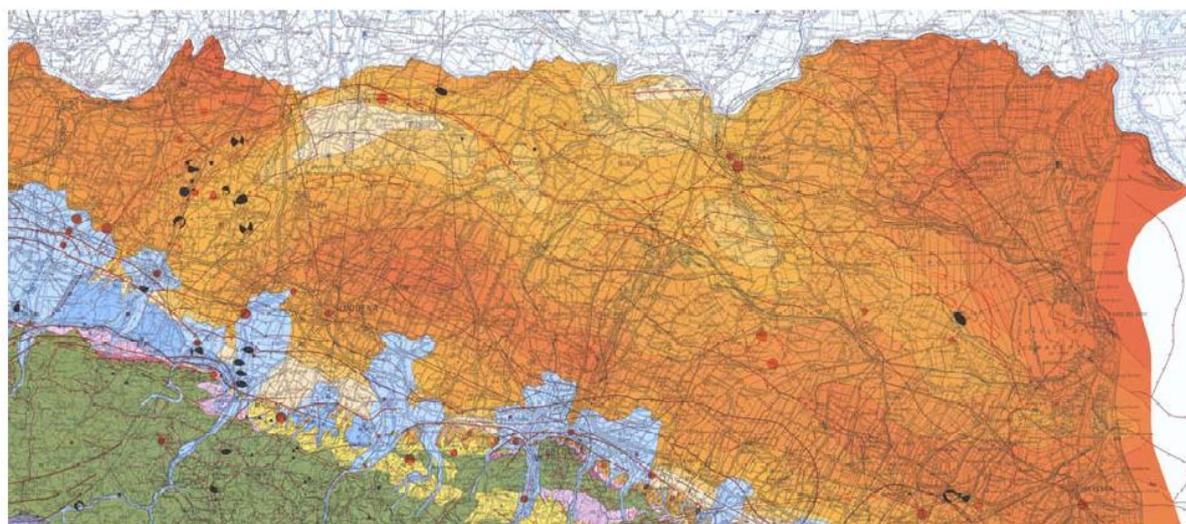
Il contesto geologico in cui si colloca è quello del Bacino Padano che strutturalmente rappresenta un'area di avanfossa che si è originata per la subduzione della microplacca padano-adriatica al di sotto dell'orogene appenninico (Dondi e D'Andrea, 1986; Pieri e Groppi, 1981).

L'area in esame si trova nella zona di raccordo fra la parte esterna della catena Appenninica settentrionale, strutturata nel Miocene superiore-Pliocene inferiore, e il settore padano in cui le deformazioni, sepolte, sono prevalentemente del Pliocene superiore e Quaternario.

Tali deformazioni sepolte rappresentano il vero fronte appenninico che sovrascorre verso nord sulla piattaforma padano-veneta secondo una serie di archi (Figura 1) disposti a formare una fascia circa parallela al bordo appenninico (Pieri e Groppi, 1981). In particolare, la zona di Mirandola si trova al di sopra dell'arco delle Pieghe Ferraresi (Pieri e Groppi, 1981; Zoetemeijer, 1993) o dorsale Ferrarese che presenta qui una zona di alto strutturale conosciuta come l'alto di Mirandola (Figure 1 e 2), dove la base del Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (SERS), datata a 0,45 Ma, è ad una profondità inferiore a -100 metri sul livello del mare (addirittura inferiore a -50 metri ad ovest di Mirandola) (Boccaletti et al., 2004).



**Figura 1.** Schema tettonico del settore emiliano e romagnolo-ferrarese, con la suddivisione in Pieghe Emiliane, Ferraresi, Romagnole ed Adriatiche (da Dondi et al., 1982).



**Figura 2.** Schema geologico di sottosuolo nel settore delle pieghe ferraresi. In arancione sono rappresentate le isobate della base del Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore (0,45 Ma). Le aree più chiare sono quelle in cui questa superficie stratigrafica è più superficiale (ad esempio presso Ferrara e la struttura di Mirandola). In rosso è rappresentato il fronte dei sovrascorrimenti. In basso è riportata la sezione geologica attraverso la pianura modenese (sezione geologica senza esagerazione verticale) (da Boccaletti et al., 2004, Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna).

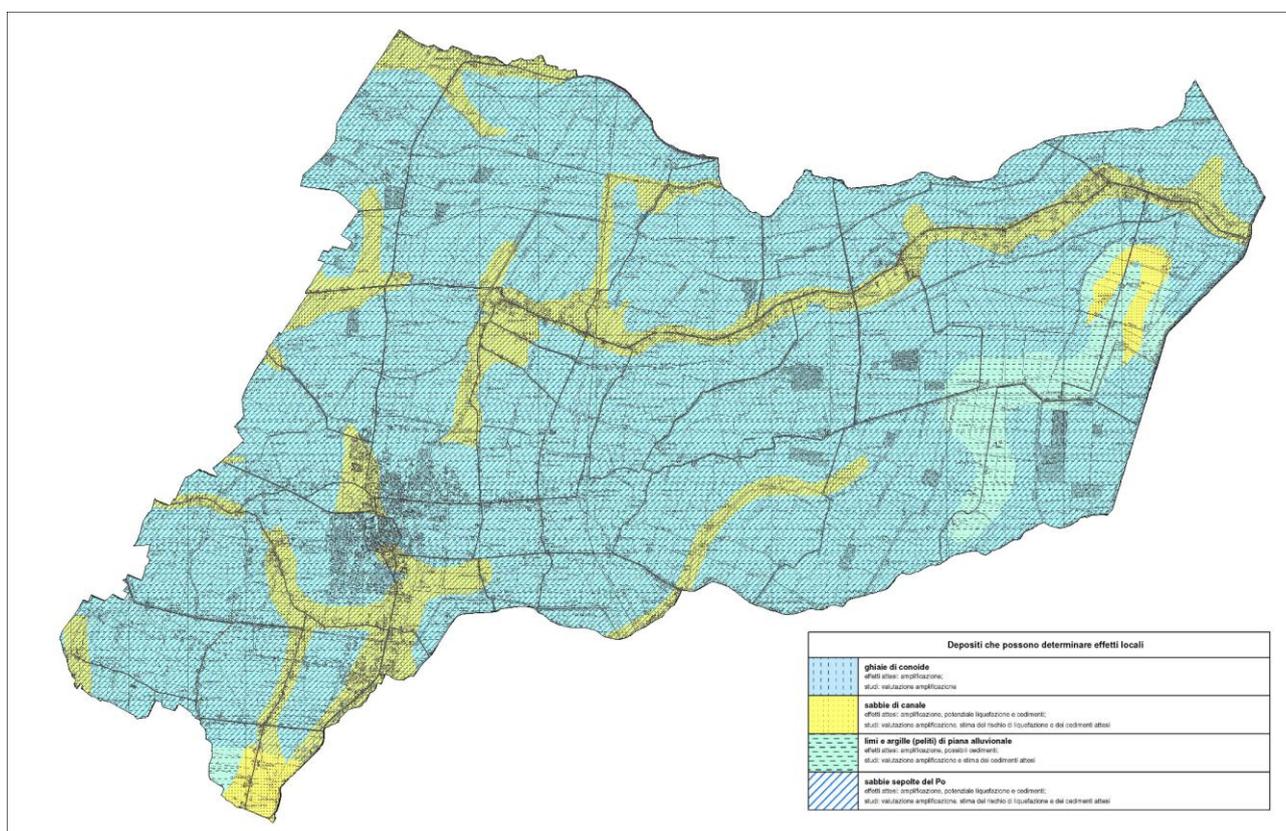
Questo settore del bacino del Po è riempito da una spessa coltre di sedimenti clastici sin-tettonici, di età prevalentemente pliocenica e pleistocenica che sigillano le strutture deformative. La fase pliocenica viene denominata di *flysch*, in contrasto con i sedimenti di *molassa* che hanno caratterizzato 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 (Figura 2). Gran parte delle aree in precedenza emerse vengono ricoperte dal mare ed inizia una sedimentazione nettamente sabbiosa. Tale sedimentazione grossolana prosegue poi, ininterrottamente, fino all'Attuale: in essa, però, si passa da

facies torbiditiche di bacino a facies di scarpata, poi costiere ed infine alluvionali, pur rimanendo in termini sabbiosi. 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 depositi dal fiume Po e dagli altri fiumi tributari che provengono dalla catena Appenninica (Dondi et al., 1982; Pieri, 1984; Dondi e D'Andrea, 1986; Ori, 1993; Vittori e Ventura, 1995; Amorosi et al., 1999). Nel Pleistocene medio, quindi, la prosecuzione del sollevamento comporta il definitivo instaurarsi della deposizione continentale e inizia a sedimentarsi il Supersistema Emiliano Romagnolo (Fig. 2) corrispondente al Qc di Ricci Lucchi et al.1982.

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.

L'area di studio risulta influenzata dalle alluvioni del Fiume Panaro e in parte del fiume Po.



**Figura 3.** Estratto per l'area comunale di Mirandola della carta "Aree potenzialmente soggette ad effetti locali per eventi sismici" del Quadro Conoscitivo del PTCP di Modena.

Per determinare le caratteristiche dei depositi in profondità si può fare riferimento alla cartografia redatta dalla Provincia di Modena nell'ambito del PTCP 2009 in relazione agli studi di microzonazione sismica del territorio provinciale.

In particolare in Figura 3 è rappresentato un estratto della carta "Aree potenzialmente soggette ad effetti locali per eventi sismici" del Quadro Conoscitivo del PTCP, in cui sono

indicate le principali litologie affioranti quali limi e argille di piana alluvionale e sabbie di canale. In tutta l'area comunale di Mirandola, ad eccezione di una piccola porzione nella zona più meridionale, è inoltre segnalata la presenza in profondità di sabbie sepolte depositate dal fiume Po.

Nell'area di studio non vi sono evidenze geomorfologiche degne di nota. Le aree sono tutte sub-pianeggianti con una leggera inclinazione in direzione nord-nord-est in concordanza con l'andamento generale di questo settore della Pianura Padana.

### III. NEOTETTONICA E SISMICITÀ

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. In particolare, per l'analisi della sismicità storica e strumentale dell'area oggetto di indagine sono stati utilizzati:

- 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 DBMI04 - Database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI04 (Stucchi et al., 2007 <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI04/>). Al momento della redazione del presente studio non è ancora disponibile il DBMI11, di cui è prossima la pubblicazione;
- 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;
- il Database delle Sorgenti Sismogenetiche Italiane DISS versione 3.1.1 (INGV - DISS Working Group, 2010; <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 (composite) in grado di generare terremoti di M 5.5 o superiore;
- la Zonazione sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004), che individua sul territorio italiano 42 macrozone-sorgente e rappresenta il riferimento per le valutazioni di pericolosità sismica nel territorio nazionale;
- il Catalogo della Sismicità Italiana (<http://csi.rm.ingv.it/>) che contiene tutti gli eventi registrati dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale dal 1981 al 2002;
- il Bollettino della Sismicità Strumentale dell'INGV (<http://iside.rm.ingv.it>), che contiene tutti gli eventi registrati dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale dal 2003 al 2007.

## Sorgenti sismogenetiche

Il database DISS (INGV - DISS Working Group, 2010) indica, poco a sud dell'area in esame (Figura 4), l'esistenza di una sorgente sismogenetica individuale (ITIS107 – MIRANDOLA) coincidente con il thrust responsabile della strutturazione dell'anticlinale di Mirandola.



**Figura 4.** Le strutture sismogenetiche del database DISS 3.1.1, nell'intorno dell'area di studio. In rosso è riportata l'area comunale di Mirandola.

L'esistenza di questa sorgente sismogenetica è stata ipotizzata a partire dall'osservazione della presenza di anomalie del drenaggio in coincidenza dell'attraversamento dell'anticlinale sepolta (Burrato et al., 2003). In particolare i fiumi Secchia e Panaro vengono prima attratti l'uno verso l'altro nella zona in subsidenza attiva (sinclinale Bologna-Bonporto), posta a sud dell'anticlinale sepolta, e poi divergono quando sono costretti ad attraversare la zona in sollevamento tettonico (anticlinale). La posizione delle zone in sollevamento e subsidenza attiva, indicate dal comportamento del drenaggio, ha aiutato a definire la geometria della faglia responsabile dei movimenti, in particolare la sua larghezza, la sua pendenza e la sua profondità massima e minima. Questi parametri sono stati ulteriormente raffinati grazie all'ausilio delle sezioni sismiche disponibili che

mostrano la geometria complessiva della struttura (Pieri e Groppi, 1981). La cinematica della struttura e il suo rateo di deformazione sono stati definiti grazie allo studio degli strati di crescita dei depositi sintettonici quaternari (Ciucci et al., 2002).

La sorgente di Mirandola non è associata ad alcun terremoto storico e/o strumentale. In ragione delle sue dimensioni, la sorgente risulta in grado di generare terremoti di magnitudo 5.9. Il basso slip-rate della struttura suggerisce lunghi periodi di ritorno del terremoto potenziale.

Le questioni aperte, a cui è difficile dare una risposta allo stato attuale delle conoscenze, citate nel database DISS riguardano proprio i tempi di ritorno del terremoto associato alla struttura e le ragioni della mancanza di un terremoto generato da tale struttura nei cataloghi della sismicità italiana.

L'area di Mirandola è inoltre attraversata (Figura 4) da due distinte sorgenti composite, regioni allungate contenenti un numero imprecisato di sorgenti sismogenetiche individuali allineate che non possono essere individuate singolarmente. Alla più meridionale (ITCS051) è attribuita la magnitudo massima della sorgente individuale associata (la già illustrata ITIS107), cioè 5.9. Alla più settentrionale (ITCS051) è invece attribuita una magnitudo massima di 5.5 sulla base del più forte terremoto registrato nella regione.

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.

### **Storia sismica di Mirandola**

Il Database Macrosismico Italiano disponibile al momento della redazione della presente relazione (Stucchi et al., 2007), riporta 30 record relativi agli effetti per la località Mirandola (Tabella 1). I massimi effetti al sito noti dalle fonti storiche sono attribuibili al sesto grado della scala MCS, in conseguenza di 5 terremoti verificatisi tra il 1796 e il 1987.

Per tre di questi eventi, e per uno con effetti pari al quinto grado MCS, sono disponibili le informazioni dettagliate degli studi del CFTI4Med (Guidoboni et al., 2007), che riportano indicazioni sugli effetti verificatisi a Mirandola:

15 luglio 1971 - VI MCS - La scossa fu forte e causò alcune lesioni in edifici colonici di vecchia costruzione.

7 giugno 1871 - VI MCS - Il terremoto fu forte e causò caduta di tegole e camini, distacco di pezzi di intonaco vecchio e spostamento di mobili.

22 ottobre 1796 - VI MCS - La scossa fu violenta: causò la caduta di 24 comignoli e una piccola lesione alla volta sopra l'altare maggiore della chiesa di S.Francesco.

23 febbraio 1887 - V MCS - Il terremoto fu abbastanza forte e provocò il distacco di parte dell'intonaco del soffitto dell'Osservatorio Meteorico, posto in una alta torre.

L'evento sismico più recente con effetti di danno nel comune di Mirandola, risulta essere quello del 17 luglio 2011, con epicentro localizzato tra Trecenta (RO) e Sermide

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRANDOLA

(MN) per cui sono state calcolate una magnitudo di 4.7 e una profondità 8.1 km. L'evento ha causato danni lievi nelle frazioni di San Martino Spino, Gavello e Quarantoli.

Effetti	In occasione del terremoto del:					
<u>I<sub>s</sub></u>	<u>Anno Me Gi Or</u>	<u>Area epicentrale</u>	<u>Studio</u>	<u>nMDP</u>	<u>Io</u>	<u>M<sub>w</sub></u>
6	1987 05 02 20 43 53	REGGIANO	DOM	802	6	5.05
6	1971 07 15 01 33 23	Parmense	CFTI	228	7-8	5.61
6	1914 10 27 09 22	GARFAGNANA	DOM	618	7	5.79
6	1891 06 07 01 06 14	Valle d'[[[a]]]	CFTI	403	8-9	5.71
6	1796 10 22 04	Emilia orientale	CFTI	26	7	5.63
5	1996 10 15 09 55 60	CORREGGIO	INGVAM	135	7	5.44
5	1909 01 13 00 45	BASSA PADANA	DOM	799	6-7	5.53
5	1887 02 23 05 21 50	Liguria occidentale	CFTI	1515	9	6.29
4	1983 11 09 16 29 52	Parmense	CFTI	835	6-7	5.10
4	1920 09 07 05 55 40	Garfagnana	CFTI	638	9-10	6.48
4	1919 06 29 15 06 13	Mugello	CFTI	267	9	6.18
4	1901 10 30 14 49 58	Salò'	CFTI	191	8	5.67
4	1895 04 14 22 17	Slovenia	CFTI	296	8	6.25
4	1889 03 08 02 47	BOLOGNA	DOM	32	6	4.83
3-4	1894 11 27	FRANCIACORTA	DOM	168	6-7	4.95
3	1986 12 06 17 07 19	BONDENO	DOM	604	6	4.56
3	1916 08 16 07 06 14	Alto Adriatico	CFTI	256	8	5.92
3	1916 05 17 12 50	Alto Adriatico	CFTI	130	8	5.85
3	1913 11 25 20 55	VAL DI TARO	DOM	73	5	4.85
3	1907 04 25 04 52	BOVOLONE	DOM	136	6	4.94
3	1885 02 26 20 48	SCANDIANO	DOM	78	6	5.22
3	1743 02 20 16 30	Basso Ionio	CFTI	77	9-10	6.90
3	1742 01 27 11 20	Livorno	CFTI	16	6-7	5.15
2	1923 06 28 15 12	FORMIGINE	DOM	22	6	5.21
2	1911 02 19 07 18 30	Romagna meridionale	CFTI	185	7	5.38
F	1832 03 13 03 30	Reggiano	CFTI	93	7-8	5.59
F	1505 01 03 02	Bologna	CFTI	31	7	5.47
NR	1547 02 10 13 20	Reggio Emilia	CFTI	13	7	5.21
NF	1984 04 29 05 02 59	GUBBIO/VALFABBRICA	DOM	709	7	5.68
NF	1930 10 30 07 13	SENIGALLIA	DOM	263	9	5.94

**Tabella 1.** Record del DBMI04 relativi agli effetti per la località Mirandola ordinati per intensità al sito.

## 1. INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE

Le indagini geognostiche e geofisiche utilizzate nel presente studio di microzonazione sismica sono riportate nella Tavola 1 (Carta delle indagini, in scala 1:25.000). La visione di insieme delle prove eseguite nel territorio comunale permette di cogliere a colpo d'occhio la distribuzione dei punti di indagine sull'intera area. Lo stesso livello informativo delle indagini è riportato nella Tavola 3 (Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica, in scala 1:25.000) e con maggior dettaglio nelle Tavole 3.1 e 3.2 (Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica, in scala 1:5.000).

Tutte le indagini sono distinte con simboli e colori differenti sulla base della tipologia e della profondità raggiunta. 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.

### 1.1 Indagini pregresse (di archivio)

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

- dal Servizio Urbanistica Edilizia e Ambiente del Comune di Mirandola, che ha fornito anche numerose relazioni geologiche;
- dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, che ha fornito la propria banca dati geognostica;
- dalla ditta Geoprogetti S.a.s di Medolla, dal dott. geol. Leonardo Calzolari e dal dott. geol. Nicola Negri, che hanno messo a disposizione numerosi rapporti di indagine tratti dai propri archivi.

L'archivio informatizzato presenta innumerevoli vantaggi rispetto alla semplice catalogazione cartacea, tra questi la rapida accessibilità, il confronto 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 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 l'intero territorio comunale, ed in particolare la sua porzione urbanizzata, presenta caratteristiche geomeccaniche dei terreni ben note, da cui emerge un quadro, tutto sommato, omogeneo e di buona correlabilità generale, come dettagliato al paragrafo 1.3.

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 (Vs30).

Nella Tabella 2 è riportata una sintesi dei dati delle indagini pregresse utilizzate nello studio di microzonazione e archiviate nella banca dati.

TIPOLOGIA	NUMERO	PROFONDITA' RAGGIUNTA (m)
Prove penetrometriche statiche con punta meccanica profonde	107	25-34
Prove penetrometriche statiche con punta meccanica superficiali	224	9-20
Prove penetrometriche statiche con piezocono superficiali	4	12-15
Prove penetrometriche con piezocono sismico	1	26
Sondaggi a carotaggio continuo	2	175-187
Pozzi per acqua	26	23-288
Misure di microtremore a stazione singola	7	
Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW)	2	
Profili sismici a rifrazione	2	

**Tabella 2.** Numero di indagini pregresse per tipologia, raccolte e utilizzate per il presente studio di Microzonazione Sismica.

In aggiunta a quanto indicato in tabella 2, sono stati acquisiti e consultati i risultati delle indagini realizzate a supporto degli strumenti di pianificazione dei comuni limitrofi, alcune delle quali sono localizzate a brevissima distanza dal confine. Diverse di queste, sebbene non si siano potute riportare nella carta delle indagini, sono risultate assai utili per integrare i dati presenti nell'area di Mirandola.

## 1.2 Indagini eseguite per la microzonazione sismica

Al fine di caratterizzare le aree suscettibili di trasformazioni urbanistiche previste dal Piano Strutturale Comunale che risultavano meno conosciute dal punto di vista geomeccanico e geofisico, sono stati integrati i dati pregressi con specifiche campagne di indagini geognostiche e geofisiche (AA.VV. 2011).

In particolare sono state eseguite:

- 5 prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT);
- 7 prove penetrometriche con piezocono sismico (SCPTU) commissionate dal Comune di Mirandola alla ditta Geoprogetti S.a.s. di Medolla;
- 5 Multi-channel Analysis of Surface Waves (MASW);
- 104 misure di microtremore a stazione singola.

Per tutte le indagini eseguite per il presente studio sono riportati in allegato, al capitolo 8, i rapporti di prova.

### 1.2.1 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 ottenuta attraverso l'ausilio di correlazioni empiriche che permettono una stima delle caratteristiche tecniche dei terreni attraversati e di definire un profilo stratigrafico.

Le prove sono state eseguite 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 a 30 metri dal piano campagna. In un solo caso si è arrivati al rifiuto dello strumento (con  $R_p > 400 \text{ kg/cm}^2$ ) a 28,2 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 4.

Quattro delle cinque prove CPT sono state eseguite in prossimità dell'abitato di Mirandola, in corrispondenza di aree suscettibili di trasformazioni urbanistiche e sono riportate nella Tavola di dettaglio 3.1, mentre una quinta è stata realizzata in località Gavello, sempre in corrispondenza di un'area suscettibile di trasformazioni urbanistiche, ed è riportata nella Tavola di dettaglio 3.2.

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.

<b>CPT1</b>	<b>Data: 16/12/2011</b>	<b>Località: Mirandola</b>		<b>Falda da p.c.: 3.9 m</b>	
<b>Intervallo (m)</b>	<b>Litologia prevalente</b>	<b>Rp min. (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Rp med. (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Rp max. (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Rp/Fs</b>
0 - 0,4	Terreno vegetale	13	14	15	18
0,4 - 1,8	Limo argilloso sovraconsolidato	15	26	36	20
1,8 - 6,2	Limo argilloso mediamente consistente	9	16	31	23
6,2 - 9,0	Limo argilloso consistente	10	23	43	26
9,0 - 21,8	Sabbia limosa mediamente addensata	46	123	185	49
21,8 - 30	Sabbia argillosa limosa addensata	16	179	295	43

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRANDOLA

<b>CPT2</b>	<b>Data: 16/12/2011</b>	<b>Località: Mirandola</b>		<b>Falda da p.c.: 3.6 m</b>	
<b>Intervallo (m)</b>	<b>Litologia prevalente</b>	<b>Rp min. (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Rp med. (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Rp max. (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Rp/Fs</b>
0 - 0,4	Terreno vegetale	13	15	16	11
0,4 - 2	Limo argilloso sabbioso	18	28	35	14
2 - 4,8	Argilla limosa consistente	14	18	24	24
4,8 - 10,6	Argilla da consistente a plastica	5	10	17	17
10,6 - 14,4	Limo argilloso consistente	8	17	30	18
14,4 - 17	Sabbia limosa mediamente addensata	89	120	165	50
17 - 21,2	Sabbia limosa addensata	122	167	207	47
21,2 - 30	Sabbia ben addensata	109	208	263	50

<b>CPT3</b>	<b>Data: 16/12/2011</b>	<b>Località: Mirandola</b>		<b>Falda da p.c.: 3.35 m</b>	
<b>Intervallo (m)</b>	<b>Litologia prevalente</b>	<b>Rp min. (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Rp med. (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Rp max. (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Rp/Fs</b>
0 - 0,4	Terreno vegetale	49	97	144	78
0,4 - 1,6	Limo argilloso sovraconsolidato	21	25	27	18
1,6 - 7,2	Argilla da plastica a consistente	6	13	24	20
7,2 - 12,2	Limo argilloso	17	23	34	17
12,2 - 17,4	Sabbia limosa poco addensata	28	42	56	84
17,4 - 27,6	Alternanza di limi argillosi e argille limose	13	29	51	17
27,6 - 28,2	Sabbia addensata con ghiaie	248	359	420	133

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRANDOLA

<b>CPT4</b>	<b>Data: 17/12/2011</b>	<b>Località: Mirandola</b>		<b>Falda da p.c.: 3.9 m</b>	
<b>Intervallo (m)</b>	<b>Litologia prevalente</b>	<b>Rp min. (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Rp med. (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Rp max. (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Rp/Fs</b>
0 - 0,4	Terreno vegetale	13	15	17	12
0,4 - 1,6	Argilla sovraconsolidata	14	36	63	17
1,6 - 7	Limo argilloso mediamente consistente	8	17	25	21
7 - 9,8	Sabbia limosa mediamente addensata	27	83	145	48
9,8 - 17,8	Sabbia ben addensata	89	178	243	53
17,8 - 29	Argilla limosa da plastica a consistente	14	27	56	16
29 - 30	Sabbia ben addensata	106	201	297	121

<b>CPT5</b>	<b>Data: 17/12/2011</b>	<b>Località: Mirandola</b>		<b>Falda da p.c.: 2.0 m</b>	
<b>Intervallo (m)</b>	<b>Litologia prevalente</b>	<b>Rp min. (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Rp med. (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Rp max. (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Rp/Fs</b>
0 - 1	Terreno vegetale	12	19	35	63
1 - 5,2	Argilla limosa plastica	5	10	18	16
5,2 - 8	Limo argilloso sabbioso consistente	8	19	38	39
8 - 10,2	Limo argilloso	5	13	22	19
10,2 - 12,8	Sabbia limosa mediamente addensata	36	75	114	67
12,8 - 24,8	Sabbia addensata	70	185	262	55
24,8 - 27,4	Sabbia limosa mediamente addensata	38	73	140	43
27,4 - 30	Sabbia ben addensata	169	248	319	65

### 1.2.2 Prove penetrometriche con piezocono sismico (SCPTU)

Le prove sono state eseguite con un penetrometro da 20 t della ditta Tecnotest e spinte fino a 30 metri dal piano campagna, con acquisizione dei dati geognostici ogni 2 cm di avanzamento. Rispetto alle prove penetrometriche statiche CPT, con il piezocono viene anche registrata la pressione interstiziale, cioè la sovrappressione che si genera durante l'infissione U. Questo permette di migliorare e rendere più precisa l'interpretazione della stratigrafia del terreno.

I dati geofisici sono stati acquisiti con piezocono sismico "TP CPT SISMI" della ditta Tecnopenta, che aggiunge ad un normale piezocono la possibilità di registrare per ogni metro di profondità, grazie a un geofono tridirezionale, le onde di taglio generate da un sistema energizzante presente in superficie e di conseguenza calcolare la velocità delle onde S nel terreno.

Le prove SCPTU hanno quindi permesso il calcolo della velocità di propagazione delle onde di taglio ( $V_s$ ) nei primi 30 metri dal p.c. (Tabella 3). I valori del parametro di  $V_{s30}$  risultano necessari, come si vedrà in seguito, per l'analisi della Risposta Sismica Locale e Microzonazione Sismica del Territorio come previsto dalla Delibera della Regione Emilia-Romagna n. 112/2007 "Secondo livello di approfondimento - analisi semplificata".

Per le considerazioni sui valori di  $V_s$  misurati nel corso delle prove SCPTU e il loro utilizzo come input per la stima dei fattori di amplificazione tramite le procedure semplificate previste dagli ICMS e dall'Allegato A2 della Delibera RER 112/2007, si rimanda al capitolo 4.

L'esatta ubicazione delle 7 prove SCPTU è stata decisa del Servizio Urbanistica del Comune di Mirandola, che ha commissionato le indagini. Le prove risultano distribuite nei pressi del capoluogo e in corrispondenza delle principali frazioni. Esse sono quasi tutte collocate in prossimità di aree suscettibili di trasformazioni urbanistiche e sono riportate nelle tavole 3.1 e 3.2 n scala 1:5.000.

PROVA	LOCALITA	DATA	$V_{s30}$
SCPTU1	Mirandola	17/11/2011	262
SCPTU2	Cividale	18/11/2011	267
SCPTU3	Mortizzuolo	18/11/2011	304
SCPTU4	Quarantoli	18/11/2011	278
SCPTU5	Gavello	21/11/2011	268
SCPTU6	San Martino Spino	21/11/2011	256
SCPTU7	San Giacomo in Roncole	21/11/2011	231

Tabella 3. Valori di  $V_{s30}$  misurati dalle prove SCPTU.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRANDOLA

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 valori di picco isolati.

<b>SCPTU1</b>	<b>Data: 17/11/2011</b>	<b>Località: Mirandola</b>		<b>Falda: foro chiuso</b>	
<b>Intervallo (m)</b>	<b>Litologia prevalente</b>	<b>Rp min. (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Rp med. (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Rp max. (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Rp/Fs</b>
0 - 0,4	Terreno vegetale	9	22	35	18
0,4 - 1,8	Limo argilloso sovraconsolidato	12	35	56	27
1,8 - 4,4	Argilla limosa plastica	5	9	12	21
4,4 - 12,2	Limo argilloso sabbioso	6	10	25	43
12,8 - 17,8	Sabbia limosa mediamente addensata	12	53	129	168
17,8 - 23,4	Sabbia mediamente addensata	48	146	248	197
23,4 - 30	Sabbia ben addensata	68	248	313	133

<b>SCPTU2</b>	<b>Data: 18/11/2011</b>	<b>Località: Mirandola</b>		<b>Falda da p.c.: 2.36 m</b>	
<b>Intervallo (m)</b>	<b>Litologia prevalente</b>	<b>Rp min. (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Rp med. (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Rp max. (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Rp/Fs</b>
0 - 0,6	Terreno vegetale	1	17	34	28
0,6 - 2,4	Argilla limosa plastica	8	12	25	20
2,4 - 4,6	Limo sabbioso mediamente consistente	14	30	57	50
4,6 - 12,2	Limo argilloso plastico	6	14	72	37
12,2 - 24	Sabbia mediamente addensata	22	142	213	223
24 - 30	Sabbia addensata	128	210	280	263

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRANDOLA

<b>SCPTU3</b>	<b>Data: 18/11/2011</b>	<b>Località: Mirandola</b>		<b>Falda da p.c.: 3.22 m</b>	
<b>Intervallo (m)</b>	<b>Litologia prevalente</b>	<b>Rp min. (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Rp med. (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Rp max. (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Rp/Fs</b>
0 - 0,4	Terreno vegetale	5	12	14	17
0,4 - 2	Limo argilloso sovraconsolidato	13	23	36	31
2 - 8	Argilla da plastica a poco consistente	2	8	46	18
8 - 9,2	Limo sabbioso	13	49	102	166
9,2 - 17,4	Sabbia mediamente addensata	81	168	259	196
17,4 - 20,2	Sabbia limosa mediamente addensata	57	128	224	225
20,2 - 30	Sabbia addensata	80	178	294	138

<b>SCPTU4</b>	<b>Data: 18/11/2011</b>	<b>Località: Mirandola</b>		<b>Falda: foro chiuso</b>	
<b>Intervallo (m)</b>	<b>Litologia prevalente</b>	<b>Rp min. (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Rp med. (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Rp max. (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Rp/Fs</b>
0 - 0,6	Terreno vegetale	8	20	30	19
0,6 - 2,4	Limo argilloso mediamente consistente	9	25	45	17
2,4 - 10,6	Limo sabbioso mediamente consistente	6	12	26	26
10,6 - 13	Sabbia limosa poco addensata	13	80	174	126
13 - 30	Alternanza di sabbia limosa e sabbia addensata	86	171	241	212

<b>SCPTU5</b>	<b>Data: 21/11/2011</b>	<b>Località: Mirandola</b>		<b>Falda da p.c.: 2.48 m</b>	
<b>Intervallo (m)</b>	<b>Litologia prevalente</b>	<b>Rp min. (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Rp med. (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Rp max. (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Rp/Fs</b>
0 - 0,8	Terreno vegetale	3	8	12	24
0,8 - 1,5	Sabbia argilloso limosa	7	24	37	52
1,5 - 5,8	Limo argilloso sabbioso con livello sabbioso limoso tra 3,9 e 4,5	5	47	92	142
5,8 - 9	Sabbia mediamente addensata	6	25	99	71
9 - 11,2	Sabbia argilloso limosa mediamente addensata	8	150	323	215
11,2 - 12,8	Sabbia con limo mediamente addensata	178	213	269	235
12,8 - 30	Sabbia ben addensata	69	178	269	184

<b>SCPTU6</b>	<b>Data: 21/11/2011</b>	<b>Località: Mirandola</b>		<b>Falda da p.c.: 1.35 m</b>	
<b>Intervallo (m)</b>	<b>Litologia prevalente</b>	<b>Rp min. (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Rp med. (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Rp max. (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Rp/Fs</b>
0 - 0,6	Terreno vegetale	7	11	15	15
0,6 - 2,6	Argilla limosa plastica	6	11	19	14
2,6 - 13,2	Limo argilloso e limo argilloso sabbioso consistente	5	10	29	28
13,2 - 30	Alternanza di sabbia limosa e sabbia addensata	13	163	294	190

<b>SCPTU7</b>	<b>Data: 21/11/2011</b>	<b>Località: Mirandola</b>		<b>Falda da p.c.: 1.64 m</b>	
<b>Intervallo (m)</b>	<b>Litologia prevalente</b>	<b>Rp min. (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Rp med. (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Rp max. (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Rp/Fs</b>
0 - 0,6	Terreno vegetale	4	11	17	23
0,6 - 1,6	Argilla limosa consistente	11	26	38	21
1,6 - 9	Limo argilloso sabbioso	4	10	21	26
9 - 12,2	Limo argilloso consistente	15	23	45	28
12,2 - 16,8	Sabbia mediamente addensata	56	108	220	243
16,8 - 26	Sabbia limosa poco addensata	9	32	86	62
26 -30	Sabbia mediamente addensata	68	160	221	186

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

Le prospezioni sismiche che prevedono l'utilizzo di onde superficiali note in letteratura come M.A.S.W. (Park et al., 1999; Park et al., 2007) realizzate a supporto del presente studio di microzonazione sismica, hanno previsto sia acquisizioni passive del rumore sismico ambientale (*passive-MASW*), sia acquisizioni attive mediante l'utilizzo di massa battente come sorgente di onde superficiali (*active-MASW*). 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:

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

$\nu$ : 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, tipicamente compresa fra 4 e 40 Hz. Il riconoscimento del modo fondamentale delle onde R permette di definire la curva di dispersione (Velocità di fase-Frequenza) caratteristica del sottosuolo investigato.

Per l'indagine sismica sono state acquisite sia ripetute registrazioni del microtremore sismico (vedi sismogrammi dei rapporti di prova in allegato), sia registrazioni con massa battente esterna ed in linea con lo stendimento sismico. I dati sono stati campionati per mezzo di un sismografo a 24 canali "Seistronix Abem Ras-24" (con convertitore A/D a 24 bit), attraverso l'impiego di 24 geofoni verticali con frequenza propria di 4,5 Hz, collegati in linea mediante cavi sismici, ad interdistanza ( $\Delta x$ ) pari a 3 metri per una lunghezza totale di ogni profilo sismico pari a 69 metri lineari.

L'elaborazione dei dati prevede l'applicazione di un'operazione matematica (trasformata F-K) sulle singole tracce sismiche acquisite sul campo. Tale operazione permette di passare dal dominio del tempo (registrato dai sismogrammi) a quello della frequenza per la costruzione degli spettri di potenza (vedi rapporti di prova allegati) nel dominio <<frequenza - velocità di fase (f-v)>>, necessari per la discriminazione modale delle onde R. Dall'analisi della distribuzione dell'energia presente in tali spettri si esegue il "*picking*" della curva di dispersione sperimentale del modo fondamentale delle onde R (vedi rapporti di prova allegati). Successivamente, per via indiretta, una procedura di modellazione numerica, basata sul metodo agli Algoritmi Genetici, consente di determinare un modello di sottosuolo monodimensionale, verticale e discreto (vedi rapporti di prova allegati), in termini di velocità  $V_s$  (m/s) e spessore (m). A tale modello, infatti, corrisponde una curva di dispersione teorica da confrontare con la curva di dispersione sperimentale precedentemente ottenuta (*fitting*). La buona sovrapposizione fra le due curve è indice di compatibilità del modello di sottosuolo considerato.

L'indagine ha consentito la ricostruzione di profili verticali di  $V_s$  fino alla profondità di 30 metri dal piano campagna. I valori di  $V_s$  per il sottosuolo più superficiale (circa 8-10 m dal p.c.) sono associabili a sedimenti prevalentemente fini e tendono generalmente ad aumentare con la profondità (eccetto per il profilo MASW 3, in cui si evidenzia una lieve inversione di velocità tra 18 e 28 m di profondità circa), per la presenza di intercalazioni di livelli più rigidi.

Tutte e cinque le indagini M.A.S.W. sono state eseguite in prossimità dell'abitato di Mirandola, in corrispondenza di aree suscettibili di trasformazioni urbanistiche e sono tutte riportate nella Tavola di dettaglio 3.1. In Tabella 4 sono riportati i valori di  $V_s$  registrati per ciascuna prova.

PROVA	LOCALITA	DATA	Vs30
MASW1	Mirandola	13/12/2011	<b>211</b>
MASW2	Mirandola	13/12/2011	<b>219</b>
MASW3	Mirandola	13/12/2011	<b>233</b>
MASW4	Mirandola	13/12/2011	<b>234</b>
MASW5	Mirandola	15/12/2011	<b>204</b>

**Tabella 4.** Valori di Vs30 misurati dalle prove MASW.

### 1.2.4 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. 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 (Mulargia et al., 2007).

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 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).

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.

Per la campagna di indagine sono stati utilizzati due strumenti distinti (un Tromino modello Zero e uno modello Engy). Alcune misure "di taratura" eseguite con i due strumenti, sia a breve distanza che sulla stessa verticale in tempi diversi, hanno permesso di verificare la correttezza dei risultati ottenuti e la ripetibilità delle misure stesse.

L'acquisizione dei dati è stata effettuata alla frequenza di 128 Hz con un tempo di singola registrazione pari a 30 minuti per 12 misure, 20 minuti per 15 misure e 12 minuti per 77 misure. Le registrazioni sono state elaborate utilizzando il modulo del software Grilla per la modellazione delle curve H/V nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz, impostando una larghezza delle finestre d'analisi a 20 s e lisciamento secondo una finestra triangolare con ampiezza pari al 10%.

Nella Tabella 5 sono riportati i dati principali associati a ciascuna delle 104 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 (117) è superiore al numero delle misure riportate in questo studio (104). Le 13 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.

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 caratterizzate da 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 al capitolo 2, le misure eseguite hanno evidenziato la presenza di un'area a forte contrasto di impedenza proprio in coincidenza con "l'alto strutturale di Mirandola" (definito al capitolo II), con deciso aumento dell'ampiezza dei picchi di H/V anche su brevi distanze. Per questo motivo, nel corso della realizzazione della microzonazione si è deciso di aumentare il numero delle misure di microtremore a stazione singola inizialmente preventivate, portandole da 70 ad oltre 100, alcune delle quali sono state eseguite anche in aree dove non erano strettamente necessari gli studi di microzonazione, 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 ampiezze che da quello delle frequenze dei picchi H/V.

Attraverso l'inversione delle curve H/V vincolate da dati geognostici (Castellaro et al. 2007) e in parte geofisici, è stato inoltre possibile calcolare, su alcune delle verticali di indagine, la velocità delle onde di taglio nei primi 30 ( $V_{s30}$ ) e 150 ( $V_{sH}$ ) metri. In particolare le misure di microtremore a stazione singola risultano essere le uniche attraverso cui è possibile ricavare il dato di  $V_{sH}$ , che è fondamentale per la valutazione dei fattori di amplificazione tramite le procedure semplificate previste dagli ICMS. Le procedure seguite per calcolare le velocità delle onde di taglio, anche attraverso l'inversione della curva H/V vincolata, sono descritte al capitolo 4, in cui sono anche dettagliati i valori ottenuti su ogni singola verticale.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRANDOLA

Codice	Lon	Lat	Data	Durata	f0	Amp.	Codice	Lon	Lat	Data	Durata	f0	Amp.
R001	11.0763	44.8888	14/10/2011	12 min	0.8	2.3	R071	11.0688	44.9012	07/12/2011	30 min	0.94	2.05
R003	11.0736	44.889	14/10/2011	12 min	0.93	2	R072	11.0752	44.8924	13/12/2011	30 min	0.9	2.1
R004	11.0702	44.8894	14/10/2011	12 min	0.94	2	R073	11.0597	44.8908	13/12/2011	30 min	0.75	2.1
R005	11.1266	44.8758	02/11/2011	12 min	1	1.8	R074	11.0554	44.8804	13/12/2011	30 min	0.81	3
R006	11.1963	44.8821	02/11/2011	12 min	0.78	2.1	R075	11.0454	44.8732	13/12/2011	20 min	1.09	3.3
R007	11.1793	44.8943	02/11/2011	12 min	0.78	2	R076	11.0374	44.853	13/12/2011	12 min	0.87	2.1
R008	11.2325	44.9348	02/11/2011	12 min	0.88	1.95	R077	11.056	44.8669	13/12/2011	20 min	1.09	3.9
R009	11.1823	44.9239	02/11/2011	12 min	0.63	1.9	R078	11.0751	44.8779	15/12/2011	30 min	0.91	2.5
R011	11.0966	44.889	02/11/2011	12 min	0.75	2.1	R079	11.0651	44.8696	15/12/2011	30 min	1.03	3.95
R012	11.1104	44.8926	02/11/2011	12 min	0.79	1.9	R080	11.0641	44.8677	15/12/2011	12 min	1.16	4.3
R013	11.0969	44.9191	02/11/2011	12 min	0.63	1.8	R081	11.0693	44.8656	15/12/2011	12 min	1	4.05
R014	11.0607	44.9019	02/11/2011	12 min	1.03	2.4	R082	11.0777	44.8997	15/12/2011	20 min	0.82	2.2
R015	11.061	44.8694	03/11/2011	12 min	0.88	3.8	R083	11.0983	44.8917	15/12/2011	20 min	0.9	1.7
R016	11.0552	44.8779	03/11/2011	12 min	0.88	3.1	R084	11.1014	44.8893	15/12/2011	12 min	0.92	1.8
R017	11.0538	44.8883	03/11/2011	12 min	0.81	2.2	R085	11.0263	44.8811	15/12/2011	12 min	1.13	3.6
R018	11.0527	44.8875	03/11/2011	12 min	0.78	2.4	R086	11.0285	44.8849	15/12/2011	12 min	1.06	3
R020	11.0341	44.8907	03/11/2011	12 min	0.84	2.7	R087	11.0194	44.8636	15/12/2011	12 min	0.88	2.1
R021	11.0433	44.8856	03/11/2011	12 min	0.9	2.9	R089	11.0654	44.9168	16/12/2011	20 min	0.95	2.1
R022	11.0954	44.9579	03/11/2011	12 min	0.96	2	R090	11.1811	44.9282	16/12/2011	30 min	0.5	2.05
R023	11.0877	44.959	03/11/2011	12 min	0.98	2.1	R091	11.18	44.9265	16/12/2011	30 min	0.4	2
R024	11.0738	44.9422	03/11/2011	12 min	0.91	2	R092	11.1792	44.9254	16/12/2011	12 min	0.47	2.2
R025	11.0639	44.8826	03/11/2011	12 min	0.81	2.4	R093	11.0906	44.8766	16/12/2011	12 min	0.63	2.3
R026	11.0631	44.879	03/11/2011	12 min	0.94	2.9	R094	11.0807	44.8722	16/12/2011	12 min	0.94	2.5
R027	11.073	44.8766	03/11/2011	12 min	0.88	2.4	R095	11.076	44.8684	16/12/2011	12 min	0.91	3.75
R028	11.0595	44.8609	03/11/2011	12 min	0.97	4.4	R096	11.0684	44.8724	16/12/2011	12 min	1	2.7
R030	11.0482	44.8701	03/11/2011	12 min	1.03	3.6	R097	11.0683	44.8748	16/12/2011	12 min	0.94	2.8
R032	11.0703	44.881	02/11/2011	12 min	0.88	2.3	R102	11.0563	44.8593	22/12/2011	12 min	1.09	3.25
R033	11.0714	44.8842	02/11/2011	12 min	0.88	2.3	R103	11.0511	44.8552	22/12/2011	12 min	1	2.5
R034	11.0782	44.8854	02/11/2011	12 min	0.88	2.3	R104	11.0265	44.8654	22/12/2011	12 min	1.06	2.5
R035	11.0765	44.8868	02/11/2011	12 min	0.8	2.3	R105	11.0281	44.87	22/12/2011	12 min	1.16	2.9
R036	11.076	44.8889	02/11/2011	12 min	0.88	2.3	R106	11.0001	44.8729	22/12/2011	12 min	1.31	2.75
R037	11.0781	44.8917	02/11/2011	12 min	0.9	2	R107	11.0098	44.867	22/12/2011	12 min	1.03	2.2
R038	11.0819	44.8905	02/11/2011	12 min	0.8	2	R108	11.0279	44.8586	22/12/2011	12 min	0.88	1.95
R040	11.0752	44.8925	02/11/2011	12 min	1	2	R109	11.0459	44.8507	22/12/2011	12 min	1	1.8
R041	11.0743	44.897	02/11/2011	12 min	0.9	2.1	R110	11.0694	44.8815	22/12/2011	12 min	0.84	2.3
R042	11.0719	44.8956	02/11/2011	12 min	0.94	2.2	R111	11.052	44.9083	22/12/2011	12 min	1.19	2.3
R043	11.0686	44.894	02/11/2011	12 min	0.88	2.25	R112	11.0477	44.8938	22/12/2011	12 min	1.09	2.1
R045	11.0587	44.8938	02/11/2011	12 min	0.91	2.2	R113	11.0573	44.8887	22/12/2011	12 min	0.88	2.1
R046	11.0634	44.8884	02/11/2011	12 min	0.81	2.3	R114	11.0764	44.8903	22/12/2011	12 min	0.9	2.25
R047	11.0663	44.8875	02/11/2011	12 min	0.88	2	R115	11.0997	44.89	22/12/2011	12 min	0.91	2
R048	11.1117	44.892	18/11/2011	12 min	0.8	2.1	R116	11.1464	44.8757	22/12/2011	12 min	1.06	2.1
R050	11.1097	44.8924	18/11/2011	12 min	0.81	1.8	R117	11.1332	44.8772	22/12/2011	12 min	0.94	1.8
R051	11.0878	44.8958	18/11/2011	12 min	0.78	2.2							
R052	11.0942	44.8902	18/11/2011	12 min	0.94	2							
R053	11.067	44.8854	18/11/2011	12 min	0.84	2.2							
R054	11.1279	44.8755	18/11/2011	12 min	0.91	2.1							
R055	11.1251	44.874	18/11/2011	12 min	0.88	2.2							
R056	11.0623	44.8619	25/11/2011	20 min	1.09	4							
R057	11.0564	44.8623	25/11/2011	30 min	1.06	4.8							
R058	11.0708	44.8977	25/11/2011	20 min	0.88	2.25							
R059	11.0649	44.9041	25/11/2011	20 min	0.95	2.2							
R060	11.127	44.8771	25/11/2011	20 min	0.88	2.2							
R061	11.1277	44.8749	25/11/2011	30 min	0.94	2.1							
R062	11.0441	44.859	07/12/2011	12 min	0.94	2.9							
R063	11.0094	44.8737	07/12/2011	20 min	1.19	3.4							
R064	11.0194	44.8761	07/12/2011	20 min	1.03	3.4							
R065	11.0484	44.8809	07/12/2011	20 min	0.81	3.2							
R066	11.231	44.9332	07/12/2011	30 min	0.9	2							
R067	11.2329	44.9386	07/12/2011	20 min	0.92	2.1							
R068	11.2399	44.9344	07/12/2011	20 min	0.81	1.9							
R069	11.1025	44.9185	07/12/2011	30 min	0.78	1.95							
R070	11.0911	44.9217	07/12/2011	20 min	0.88	1.95							

Tabella 5. Principali dati associati alle 104 misure di microtremore a stazione singola.

## 2. FREQUENZE NATURALI DEI TERRENI E CONTRASTI DI IMPEDENZA

La Carta delle frequenze naturali dei terreni è uno degli elaborati previsti dal DGR 1051/2011 per la microzonazione sismica di primo livello. Per la sua realizzazione sono state effettuate delle misure sveditive di sismica passiva (misure di microtremore a stazione singola) sull'intera area comunale ed in particolare all'interno o nelle immediate vicinanze di tutte le aree suscettibili di trasformazioni urbanistiche. Le modalità di esecuzione delle misure di microtremore sono dettagliate al capitolo 1, in cui è presente la Tabella 5, che sintetizza i dati principali associati a ciascuna delle 104 misure realizzate e utilizzate per il presente studio di microzonazione.

Nelle carte delle frequenze naturali dei terreni e dei contrasti di impedenza (tavole 2, 2.1 e 2.2) sono riportati tutti i punti di misura, con associato il valore di  $f_0$  del picco significativo a più bassa frequenza, corrispondente alla frequenza di risonanza fondamentale.

Il territorio indagato è stato suddiviso in base alla distinzione di due diverse classi di frequenza:

- $f_0 > 1$  Hz, caratterizzata da spessori di depositi al di sopra del contrasto di impedenza principale (pseudo-bedrock) indicativamente inferiori a 100 metri. Gli spessori minimi dei depositi si rinvencono nella zona della frazione di San Giacomo in Roncole, dove, attraverso le inversioni vincolate ai dati geognostici delle curve HVSR (Mulargia et al., 2007) è stato possibile localizzare il tetto dello pseudo-bedrock poco al di sotto degli 80 metri;
- $f_0 \leq 1$  Hz caratterizzata da spessori di depositi al di sopra dello pseudo-bedrock indicativamente superiori a 100 metri.

Le aree a frequenza maggiore di 1 Hz sono perimetrare in carta con un tratteggio giallo.

Lo sfondo della carta delle frequenze naturali dei terreni, rappresentato a colori sfumati, permette di distinguere le zone caratterizzate da contrasti di impedenza di grado differente, evidenziando col colore rosso acceso quelle con alti contrasti alla base delle coperture (ampiezza massima curva HVSR maggiore di 3) e con colore rosso scuro quelle con contrasti molto alti (ampiezza maggiore di 3,5).

Nella Tavola 2, in scala 1:25.000, sono riportate anche due sezioni geologiche realizzate dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna per lo "Studio geologico finalizzato alla ricerca di potenziali serbatoi geotermici nel sottosuolo del comune di Mirandola" a cura di Luca Martelli e Fabio Carlo Molinari (2008).

Nella stessa Tavola 2 sono riportati i grafici del rapporto H/V alle diverse frequenze per alcune delle misure di microtremore a stazione singola realizzate lungo le tracce delle sezioni geologiche, che evidenziano l'ottima correlabilità tra i picchi delle curve H/V e l'assetto stratigrafico delle unità più superficiali (si veda il paragrafo 2.2).

## 2.1 Interpretazione delle curve H/V

Per giungere ad una sintesi e ad una successiva valutazione dei risultati della campagna di misure di microtremore a stazione singola, le acquisizioni sono state filtrate ed interpretate con un software specifico che ha calcolato il rapporto spettrale HVSR ad ogni frequenza. Gli output del software, con i relativi parametri di registrazione dello strumento e i risultati grafici e numerici delle misurazioni, sono riportati in allegato.

L'analisi dell'andamento del rapporto spettrale alle diverse frequenze ha permesso di individuare i picchi di H/V per ciascuna misura. Il valore di  $f_0$  del picco significativo a più bassa frequenza, corrisponde alla frequenza di risonanza fondamentale del sito.

Si segnala che non sempre il valore di  $f_0$  riportato in carta e nella Tabella 5 del capitolo 1 ed utilizzato per le elaborazioni relative alla carta dei fattori di amplificazione, coincide con quello indicato sul rapporto di prova, generato automaticamente dal software di elaborazione. In quest'ultimo caso, infatti, il picco indicato risulta essere sempre e solo quello massimo presente nella curva, che non è necessariamente quello significativo a più bassa frequenza.

Si riscontrano inoltre due casistiche particolari in cui non si è comunque tenuto conto dei picchi segnalati come principali nei rapporti di prova:

- quando il picco principale della curva H/V, ha un'origine non stratigrafica, ma di natura antropica. Lo si deduce osservando come nel grafico dello spettro di amplificazione sia presente un picco su tutte e tre le componenti;
- quando il picco principale della curva H/V è a frequenze maggiori di 20 Hz ed è quindi originato da un riflettore a profondità molto bassa, di scarso interesse stratigrafico.

Infine, poiché l'ampiezza del rapporto H/V a basse frequenze (indicativamente sotto 0.5 Hz) dipende dalle condizioni meteorologiche (Castellaro e Mulargia, 2007), nei rari casi in cui il picco principale risulti a frequenza inferiore a 0.5 Hz e sia contemporaneamente presente un picco anche a frequenza superiore, sia pur di minor ampiezza, viene utilizzato quest'ultimo per associare il valore di  $f_0$  alla misura.

Si sottolinea come tutti i valori di frequenza di risonanza fondamentale registrati nell'intera area comunale non permettano di individuare il bedrock sismico dell'area, così come definito dagli ICMS ("la profondità dove si raggiungono velocità delle onde S superiori a 800 m/s"), in quanto originati da un contrasto di impedenza, a volte anche molto marcato, tra terreni caratterizzati da diversa velocità, dove il terreno più profondo e rigido ha sempre valori di  $V_s$  comunque inferiori a 800 m/s. Le inversioni della curva HVSR vincolate ai dati geognostici effettuate su 20 misure di microtremore, hanno infatti permesso di determinare con buona approssimazione la velocità delle onde s nello strato rigido più profondo che origina il contrasto di impedenza, velocità che risulta compresa tra 520 e 680 m/s.

Tale superficie di contrasto deve quindi essere definita come “pseudo-bedrock” e non può essere utilizzata come parametro di ingresso per gli abachi che consentono la determinazione di FA e FV secondo gli ICMS (si veda al capitolo 4).

## 2.2 Assetto stratigrafico e curve H/V

Le sezioni riportate nella Tavola 2 (Martelli e Molinari, 2008) sono state realizzate correlando i dati geognostici della banca dati del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli (fino a 200-300 metri) con i dati stratigrafici dei pozzi per idrocarburi (riportati nella Tavola 2) e quelli dei profili sismici a riflessione ENI-AGIP.

Osservando tali sezioni si individuano in profondità superfici di scollamento concordanti con gli elementi stratigrafici (flats), che si raccordano tra loro attraverso superfici di rottura e accavallamento discordanti con gli elementi stratigrafici (ramps). Nelle zone di rampa, per la propagazione del movimento e della deformazione lungo la faglia, gli strati si sono piegati e si sono formate pieghe convesse con fianchi divergenti (anticlinali); di conseguenza, tra gli alti si sono formate pieghe concave, cioè con fianchi convergenti (sinclinali). Le pieghe sinclinali coincidono con depressioni in cui si sono depositati grandi quantità di sedimenti. È per questo motivo che nelle sinclinali gli spessori dei depositi raggiungono anche diverse migliaia di metri mentre nelle zone di alto i sedimenti hanno spessore generalmente ridotto. Localmente gli spessori dei sedimenti sugli alti strutturali sono ridotti anche per erosione a seguito dell'affioramento, in alcuni periodi geologici, della sommità della struttura (Martelli e Molinari, 2008).

Le due sezioni riportate in Tavola 2 evidenziano la presenza di una zona di alto molto marcata che raggiunge in suo massimo a sud dell'abitato di Mirandola.

Il confronto delle curve H/V con le sezioni geologiche così come riportato nella Tavola 2, ha evidenziato un'ottima correlabilità sia dei valori di  $f_0$  che di quelli ampiezza massima con l'assetto delle unità stratigrafiche più superficiali.

In particolare nel culmine della zona di alto, in cui i depositi del Quaternario Continentale hanno spessore molto ridotto (80-90 metri) e poggiano direttamente su depositi di età pliocenica, si genera un contrasto di impedenza molto forte dovuto ad un improvviso salto di velocità. Tale situazione dà origine a stretti picchi H/V a frequenze superiori a 1 Hz, caratterizzati da valori di ampiezza superiori a 3, come per le misure tomografiche R075 e R085, ma anche oltre 4 per alcune misure al di fuori delle tracce di sezione in prossimità dell'abitato di San Giacomo in Roncole (R028, R057, R080 e R081).

Nelle zone di alto in cui i depositi del Quaternario Continentale hanno uno spessore limitato (comunque inferiore a 100 metri) e poggiano su spessori assai ridotti di Quaternario Marino (20-30 metri) sovrastanti depositi di età pliocenica, si genera un forte contrasto di impedenza dovuto alla presenza di due discontinuità stratigrafiche ravvicinate. Tale situazione dà origine a larghi picchi H/V (Castellaro et al., 2005) a frequenze superiori a 1 Hz, caratterizzati da valori di ampiezza attorno a 3, come per le misure R062, R065 e R086.

Allontanandosi dalla zona di alto aumentano gli spessori dei depositi delle diverse unità ed in particolare quelli di età Quaternaria.

Nella porzione più orientale della sezione B-B'-B'' si osserva la diminuzione dei valori di frequenza dei picchi H/V associata al graduale aumento di profondità del passaggio tra Quaternario Continentale e Quaternario Marino. I picchi si mantengono larghi in ragione della presenza, a profondità ancora relativamente modeste, del passaggio a depositi pliocenici (R094 e R097).

Allontanandosi dal Pozzo Eni Concordia (riportato nella Tavola 2) in direzione nord lungo la sezione AA', il rapido aumento degli spessori dei depositi del Quaternario Continentale porta ad una diminuzione di frequenza e ampiezza dei picchi H/V in uno spazio di poche centinaia di metri. Il rapido passaggio da una zona di anticlinale a una di sinclinale è ben evidenziato in sezione e i picchi poco pronunciati di H/V sono attribuibili a discontinuità presenti all'interno dei depositi del Quaternario Continentale, che separano cicli deposizionali differenti (R046 e R071).

Le due sezioni si intersecano in corrispondenza del Pozzo Concordia, per cui è disponibile una stratigrafia di dettaglio anche dei primi 200 metri. In corrispondenza della verticale del pozzo è stata eseguita la misura R065, che ha permesso la "taratura" del modello generale di correlazione, grazie alla buona risoluzione del dato stratigrafico. L'ottima correlazione tra la curva H/V e i dati del Pozzo Concordia è stata utile anche per fornire un modello affidabile per le inversioni vincolate realizzate per determinare le VsH così come dettagliato al capitolo 4.

Si sottolinea come solo l'elevato numero di misure che si è deciso di eseguire abbia permesso di comprendere l'origine dei picchi di H/V e di correlarne frequenza e ampiezza con l'assetto stratigrafico. Gli esiti delle misure di microtremore a stazione singola effettuate per il presente studio risultano coerenti con quelli rilevati da analoghe indagini eseguite per gli studi di microzonazione sismica di comuni limitrofi. In questi studi però, a causa del ridotto numero di misure eseguite sul territorio, non era stato possibile mettere in relazione i dati ottenuti con l'assetto stratigrafico delle unità più superficiali della successione sedimentaria.

### **2.3 Amplificazione del moto sismico**

L'amplificazione sismica è determinata non solo dalla rigidità assoluta di un terreno, ma soprattutto dal contrasto di impedenza tra unità sismiche (Castellaro, 2012). Per questo motivo le carte delle frequenze naturali dei terreni e dei contrasti di impedenza (tavole 2, 2.1 e 2.2) risultano, nel caso della zona di Mirandola, di grande importanza, dal momento che permettono di definire una zona caratterizzata da un alto contrasto di impedenza nella porzione sud dell'area comunale, in cui è ragionevole attendersi una maggiore amplificazione del moto sismico in superficie. Il contrasto di impedenza rilevato diventa molto alto in coincidenza della frazione di San Giacomo in Roncole. Tale contrasto diminuisce abbastanza rapidamente sia verso sud-ovest, in prossimità del confine comunale, che verso nord-est.

Come visto in precedenza, le elaborazioni degli spettri di base e le analisi HVSR hanno permesso di individuare le frequenze di risonanza del sottosuolo, utili anche per la progettazione ingegneristica delle strutture, in quanto rappresentano un parametro fondamentale per il corretto dimensionamento degli edifici antisismici. Tali frequenze, così come l'ampiezza dei picchi di frequenza, sono in relazione diretta con l'amplificazione sismica, oggi considerata da molti la prima causa di danno e distruzione durante un terremoto. Si dovrà quindi, per quanto possibile, evitare la realizzazione di strutture aventi la stessa frequenza di vibrazione del terreno, così da non permettere che si verifichi l'effetto di "doppia risonanza", fenomeno estremamente pericoloso per le strutture in elevazione in caso di sisma.

In relazione a questo aspetto, le frequenze naturali dei terreni che sono state ricavate con la tecnica HVSR nel territorio del comune di Mirandola sono per lo più comprese tra 0.75 e 1.2 Hz. In particolare nelle aree in cui è più alto il contrasto di impedenza e in cui si può quindi ragionevolmente ritenere che si abbia una maggiore amplificazione del moto sismico, le frequenze di risonanza fondamentale sono comprese tra 0.88 e 1.19 Hz. In queste aree solo in un paio di casi si registrano massimi a frequenze di poco inferiori.

Le frequenze fondamentali osservate in queste aree sono in prima approssimazione coincidenti con quelle di edifici di una certa altezza, secondo la relazione:

$$F = 10 \text{ Hz} / \text{numero dei piani}$$

Tale relazione risulta comunque solo indicativa, in quanto le frequenze di vibrazione degli edifici non dipendono solo dall'altezza degli stessi.

Per gli edifici di futura costruzione si potrà tenere conto già in fase progettuale dei valori di frequenza fondamentale dei terreni di fondazione, anche a seguito di ulteriori misure HVSR.

Per gli edifici già esistenti posti nelle aree caratterizzate da alti contrasti di impedenza potrà invece essere verificata la frequenza di vibrazione propria della struttura, sempre attraverso misure di microtremore sismico opportunamente analizzate, e confrontata con quella propria dei terreni di fondazione.

### **3. POSSIBILI EFFETTI LOCALI E MICROZONE OMOGENEE IN PROSPETTIVA SISMICA**

La prima fase dello studio di microzonazione sismica (primo livello) è volta a definire gli scenari di pericolosità sismica locale, cioè ad identificare le porzioni del territorio comunale suscettibili di effetti locali.

In particolare il primo livello di approfondimento raccoglie i dati e gli studi geologici esistenti e li rappresenta sulla cartografia di base, al fine di evidenziare le zone caratterizzate da differenti scenari di pericolosità locale e di determinare gli effetti locali attesi, indicando per ogni area il livello di approfondimento necessario e definendo il modello geologico, in termini di caratteristiche litologiche e geometriche delle unità geologiche del sottosuolo, che costituirà la base per la microzonazione sismica di secondo livello.

L'elaborato fondamentale di sintesi delle conoscenze a livello geologico-geomorfologico è rappresentato dalla Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS) (Tavole 3, 3.1 e 3.2), che di fatto realizza una prima zonizzazione delle aree potenzialmente soggette ad amplificazione o a effetti locali, a cui si associa un effetto atteso (liquefazione, cedimento ecc.).

Per la sua realizzazione sono stati quindi raccolti e analizzati su base geografica tutti i dati delle indagini geognostiche e geofisiche (si veda il capitolo 1) e confrontati con le cartografie disponibili.

#### **3.1 Cartografia geologica di base**

Si evidenzia che il territorio del Comune di Mirandola ricade nel Foglio 184 della Carta Geologica in scala 1:50.000 della Regione Emilia-Romagna (Progetto CARG), che al momento risulta ancora non realizzato. La Carta Geologica di Pianura della Regione Emilia-Romagna in scala 1:250.000 (Regione Emilia Romagna - Ufficio Geologico, 1999) risulta quindi l'unica cartografia geologica recente attualmente disponibile, ma i contenuti informativi appaiono inadeguati alla scala del presente lavoro.

Per la definizione del modello geologico in profondità possono essere utilizzate le due sezioni geologiche realizzate dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna (Martelli e Molinari, 2008), riportate nella Tavola 2.

Importante riferimento di base per i dati geologici e litologici di superficie è invece rappresentato dalle Carte per la Sicurezza del Territorio e da quelle del Quadro Conoscitivo del PTCP 2009 della Provincia di Modena, realizzate per la definizione del rischio sismico alla scala provinciale.

Nella "Carta dei depositi del sottosuolo che possono determinare effetti locali" , Tavola 3.1 in scala 1:25.000 del Quadro Conoscitivo del PTCP 2009 della Provincia di Modena, è indicata la presenza di "sabbie" nel sottosuolo della quasi totalità dell'area comunale di Mirandola, mentre le "argille" risultano limitate a ridotte porzioni di territorio non di

interesse della microzonazione sismica in quanto non urbanizzate e al di fuori delle aree suscettibili di trasformazioni urbanistiche.

La “Carta delle aree suscettibili di effetti locali”, Tavola 2.2 in scala 1:25.000 del PTCP 2009 della Provincia di Modena, in conseguenza delle litologie evidenziate nella precedente cartografia, definisce l'intero territorio comunale di Mirandola (con la sola eccezione di una piccolissima area a sud, al di fuori dall'urbanizzato) come “Area soggetta ad amplificazione per caratteristiche litologiche e a potenziale liquefazione”. Negli elaborati del PTCP sono pertanto indicati come necessari i seguenti studi: valutazione del coefficiente di amplificazione litologico, del potenziale di liquefazione e dei cedimenti attesi con approfondimenti di III livello.

### **3.2 Dal dato geognostico ai livelli informativi**

L'analisi dei dati derivati da tutte le indagini geognostiche disponibili ha confermato la presenza nell'intero territorio comunale di spessori di terreni granulari nei primi 20 metri di profondità dal piano campagna. In tutte le verticali di indagine che hanno raggiunto almeno i 20 metri, il tetto del primo livello granulare risulta infatti essere sempre presente a profondità variabili comprese tra i valori estremi di 3 e 16 metri, con una occorrenza maggiore, soprattutto nella zona del capoluogo, dei valori di profondità compresi tra 7 e 11 metri.

Inoltre i valori del livello della falda misurati al termine delle indagini (eseguite in tutte le stagioni) risultano quasi tutti compresi tra 1 e 5,2 metri, con l'80% circa entro i primi 4 metri. Fanno infatti eccezione 3 soli casi, in cui il livello misurato è comunque compreso tra 6 e 8,4 metri.

L'incrocio dei dati relativi alla profondità del tetto dei depositi granulari più superficiali con quelli del livello della falda misurati al termine delle indagini geognostiche dimostrano che i depositi sabbiosi che si rinvenivano nell'intera area di studio possono essere sempre considerati saturi, almeno alla scala del presente studio.

I dati geognostici raccolti confermano quanto indicato nelle tavole del PTCP, cioè la presenza di depositi granulari saturi potenzialmente liquefacibili nell'intera area del territorio del comune di Mirandola.

L'indicazione della quota del tetto dei primi depositi granulari per ciascuna verticale di indagine inserita nella banca dati, ha permesso di eseguire un'analisi della distribuzione di questo dato sul territorio comunale. È stato così possibile giungere alla delimitazione di aree in cui i dati geognostici disponibili indicano la presenza del tetto dei primi depositi granulari a profondità inferiori agli 8 metri dal piano campagna. Poiché il dato può certamente essere un'utile indicazione per gli approfondimenti successivi, tali aree sono state riportate ed evidenziate con un graficismo barrato giallo nella carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica. In ogni caso si sottolinea che, se queste sono le aree caratterizzate da una presenza accertata su base geognostica di depositi granulari entro gli 8 metri di profondità, ciò non esclude che un'analogha situazione possa essere verificata anche al di fuori delle stesse, specie là dove la mancanza o lo scarso numero di punti di

indagine porta ad una inevitabile approssimazione dell'elaborazione di sintesi. Analogamente, in ragione della variabilità laterale degli spessori dei depositi di diversa natura, organizzati generalmente in lenti, originate da processi deposizionali tipici di ambiti di pianura come quello in esame, è possibile che entro le aree suddette vi siano zone di estensione ridotta in cui i depositi granulari si rinvengono a profondità superiori agli 8 metri.

Nelle aree in cui è stata accertata la presenza del tetto dei primi depositi granulari a profondità inferiori agli 8 metri dal piano campagna è possibile ritenere che il rischio liquefazione risulti mediamente maggiore rispetto alle restanti. Si rimanda ai capitoli 5 e 6 per i dettagli sulle verifiche eseguite per il presente studio e quelle ulteriori che si ritiene opportuno indicare e raccomandare per i successivi strumenti di pianificazione comunale.

Un'ulteriore indicazione che è stato possibile trarre dall'analisi dei dati geognostici raccolti nella banca dati, è quella relativa alla presenza o meno di spessori significativi di terreni coesivi poco consistenti e quindi compressibili, indicativamente caratterizzati da valori di  $C_u < 70$  kpa, così come previsto dall'Allegato B della Delibera 1051/2011 della Giunta Regionale dell'Emilia-Romagna.

Il dato relativo alla consistenza dei depositi risulta caratterizzato, nell'area indagata ed in genere nelle zone di pianura alluvionale, da una estrema variabilità laterale anche su brevi distanze, ancor più di quello relativo al tetto dei depositi granulari. Pertanto si è deciso di assumere un criterio conservativo, individuando le aree in cui, sulla base dei dati geognostici, si ritiene poco probabile la presenza di elevati spessori di terreni compressibili. Per le restanti aree, anche quelle con pochi dati disponibili, viene indicata comunque la presenza di terreni compressibili.

### 3.3 La carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica

Alla luce di quanto dettagliato al paragrafo precedente, la carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica non presenta né zone stabili, né zone suscettibili di amplificazioni locali, ma solamente zone suscettibili di instabilità, per tutto il territorio comunale:

- terreni liquefacibili (colore rosa): Aree con terreni granulari saturi nei primi 20 m da piano campagna;
- terreni liquefacibili e compressibili (colore azzurro): Aree con terreni granulari saturi nei primi 20 m da piano campagna e terreni coesivi compressibili nei primi 10 m da piano campagna.

In entrambe le tipologie di aree così distinte e cartografate, possono essere presenti zone in cui i dati geognostici indicano che il tetto dei depositi granulari saturi più superficiali si trova a profondità inferiore a 8 metri (barrato giallo).

Nella stessa cartografia sono inoltre indicate le aree di cava riempite note al Servizio Urbanistica Edilizia e Ambiente del Comune di Mirandola al momento della redazione dello studio di microzonazione.

Si ricorda che per la caratterizzazione sismica delle aree suscettibili di instabilità sono richiesti approfondimenti di terzo livello. Per le indicazioni di dettaglio sul tipo di effetti attesi e in merito alle indagini, alle analisi e agli approfondimenti specifici da effettuare, si rimanda al capitolo 6.

#### 4. FATTORI DI AMPLIFICAZIONE E AREE CHE NECESSITANO DI APPROFONDIMENTI DI LIVELLO 3

La carta dei fattori di amplificazione e delle aree che necessitano di approfondimenti di terzo livello rappresenta l'elaborato fondamentale della microzonazione sismica di secondo livello. Le finalità di questa fase della microzonazione sono:

- confermare le condizioni di pericolosità indicate dal precedente livello di approfondimento con eventuale nuova perimetrazione delle aree in cui effettuare la microzonazione sismica;
- suddividere in dettaglio il territorio, in base all'amplificazione attesa, in aree a maggiore e minore pericolosità sismica;
- confermare o migliorare la definizione delle aree, indicate dal livello di approfondimento precedente, in cui si ritengono necessari approfondimenti di terzo livello;
- indicare le ulteriori indagini e analisi da effettuare.

Dal momento che l'intero territorio comunale è caratterizzato dalla possibile occorrenza di effetti locali che richiedono indagini di terzo livello, come dettagliato al capitolo 3, sarebbe stato possibile, per il secondo livello della microzonazione sismica, omettere la definizione delle zone soggette a differenti amplificazioni locali. Si è invece ritenuto opportuno suddividere ugualmente il territorio comunale in aree a maggiore o minore pericolosità, definendo per ognuna i diversi fattori di amplificazione previsti dagli indirizzi di riferimento nazionali e regionali.

Per la definizione dell'amplificazione si utilizzano gli abachi e le procedure indicate nei capitoli 3.2 e 3.3 degli ICMS, Vol. 2 - Parte Terza, e le tabelle e formule indicate nell'Allegato A2 degli indirizzi regionali (DAL n.112/2007). Per l'utilizzo degli abachi e delle tabelle è necessario determinare lo spessore H della copertura, o la profondità del substrato rigido, e il profilo di Vs nell'intervallo di spessore H.

In relazione alla frequente presenza di inversioni di velocità (strati più lenti al di sotto di strati più veloci e rigidi) evidenziata sia dalle curve H/V (presenza di minimi di ampiezza inferiore a 1), sia dalle indagini geognostiche, si considera che queste non siano tali da pregiudicare la possibilità di utilizzare gli abachi che permettono di valutare le amplificazioni per la microzonazione di livello 2. Infatti negli ICMS è indicato come "opportuno passare a un livello di approfondimento superiore" solo se si è in presenza di "una inversione di velocità nel profilo delle Vs di una successione litostratigrafica quando un terreno rigido sovrasta stratigraficamente un terreno meno rigido (soffice) con un rapporto  $V_{s_{rig}}/V_{s_{sof}} > 2$ , con la Vs dello strato più rigido maggiore di 500 m/s". Entrambe le condizioni citate non sono state verificate in nessuna delle verticali indagate.

#### 4.1 Determinazione della velocità delle onde di taglio ( $V_s$ )

Per poter essere correttamente applicate, le tabelle e le formule degli indirizzi regionali prevedono la conoscenza, per gli ambiti di pianura, della profondità indicativa del substrato rigido (maggiore o minore di 100 metri) e della velocità delle onde di taglio dei primi 30 metri di depositi ( $V_{s30}$ ).

Gli abachi degli ICMS, richiedono invece tra gli altri, come dati di ingresso, il valore di  $V_s$ , espresso in intervalli di 50 metri (da 150 a 700 m/s), dell'intero spessore dei depositi sovrastanti il bedrock ( $V_{sH}$ ) il quale deve essere caratterizzato da un  $V_s > 800$  m/s. Inoltre deve essere nota con una certa precisione la profondità del bedrock (con valori proposti che vanno da 5 a 150 metri).

Se per ricavare il dato di  $V_{s30}$  possono essere utilizzate tecniche geofisiche di sismica attiva, quali ad esempio quelle utilizzate per il presente studio (MASW e SCPTU), per determinare profondità del bedrock e la  $V_{sH}$  dell'intero intervallo di spessore dei depositi queste metodologie risultano non applicabili. Anche per questa ragione sono state eseguite le misure di microtremore a stazione singola. Le misure H/V sono infatti sempre più frequentemente utilizzate per la stima di  $V_{s30}$  e la classificazione sismica dei suoli secondo la normativa vigente (Castellaro 2007), ma permettono anche, tramite la correlazione con dati geognostici, geofisici e stratigrafici, di determinare la velocità dei depositi almeno fino al principale contrasto di impedenza, che nell'area comunale di Mirandola risulta compreso tra 80 e 150 metri.

Si sottolinea come a tale contrasto di impedenza non corrisponde mai il bedrock così come definito dagli ICMS ( $V_s > 800$  m/s), in quanto la velocità delle onde s dello strato rigido più profondo, che origina il contrasto e che può essere definito "pseudo-bedrock", risulta compresa tra 520 e 680 m/s. Dal confronto dei dati acquisiti, si può quindi concludere che, su tutte le verticali indagate con le misure di microtremore a stazione singola, il valore di 800 m/s non viene raggiunto entro i primi 150 metri. Pertanto il valore di  $V_{sH}$  necessario per l'utilizzo degli abachi ICMS è stato calcolato alla profondità H di 150 metri, cioè la massima prevista nelle tabelle di riferimento, estendendo in profondità l'ultimo valore di  $V_s$  calcolato tramite l'inversione della curva H/V.

L'esecuzione delle 7 prove penetrometriche con cono sismico e di 3 prove CPT in prossimità di 3 delle MASW realizzate, ha permesso di confrontare, per il territorio indagato, le relazioni di letteratura che legano i valori di  $Q_c$  ( $R_p$ ) e  $F_s$  misurati dalle prove penetrometriche statiche con i valori di  $V_s$ . Sulla base di tali confronti è stato messo a punto uno specifico foglio di calcolo che permette di ottenere buone stime di  $V_s$  a partire dai dati penetrometrici e che si è rivelato utile anche come riferimento per le inversioni delle curve H/V.

Nella Tavola 4 sono riportate tutte e 20 le verticali su cui sono state calcolate le  $V_s$ , nei primi 30 metri ( $V_{s30}$ ) e fino 150 metri ( $V_{sH}$ ). In Tabella 6 sono indicati, per ciascuna verticale:

- il valore di  $V_{s30}$ ;

- il valore di VsH, calcolato sempre alla profondità di 150 metri per le ragioni sopra espresse;
- la profondità dello pseudo-bedrock che genera il contrasto di impedenza visibile nelle curve H/V;
- i codici di riferimento delle indagini che hanno permesso di ottenere il dato;
- il rapporto tra VsH e Vs30 che, come illustrato in seguito, fornisce un'utile indicazione sul gradiente di velocità dei depositi.

Punto	Vs30	VsH	Prof. (m) pseudo- bedrock	Indagini utilizzate per la determinazione	VsH/Vs30
1	211	353	139	R073 - MASW1	1.67
2	219	371	136	R072 - MASW2	1.69
3	233	410	99	R074 - MASW3	1.76
4	234	379	121	R027 - MASW4	1.63
5	204	395	97	R079 - MASW5	1.94
6	262	417	150	R071 - SCPTU1	1.59
7	267	425	142	R052 - SCPTU2	1.59
8	304	453	130	R061 - SCPTU3	1.49
9	278	427	150	R069 - SCPTU4	1.54
10	268	421	ind.	R091 - SCPTU5	1.57
11	256	405	154	R066 - SCPTU6	1.58
12	231	430	90	R057 - SCPTU7	1.86
13	222	373	151	R018 - CPT di archivio	1.68
14	222	375	128	R034 - CPT di archivio	1.69
15	215	366	130	R045 - CPT di archivio	1.70
16	216	391	85	R056 - CPT di archivio	1.81
17	228	372	138	R058 - CPT di archivio	1.63
18	230	374	147	R059 - CPT di archivio	1.63
19	227	394	106	R065 - Stratigrafia Pozzo Eni "Concordia"	1.74
20	224	374	130	R078 - CPT1	1.67

**Tabella 6.** Principali parametri per ciascuna delle verticali su cui sono state calcolate le velocità delle onde di taglio.

Su ognuna delle 20 verticali è stata eseguita una misura di microtremore a stazione singola, che ha permesso, come detto, di calcolare il valore di VsH. Sulle 12 verticali in cui sono state eseguite le indagini MASW o SCPTU, il valore di Vs30 è sempre quello ottenuto da tali indagini, mentre nei restanti 8 casi è ottenuto tramite inversione della curva H/V ricavata dalla misura di microtremore vincolata ad una stratigrafia di una prova penetrometrica statica eseguita a breve distanza.

Sulle 12 verticali in cui sono state eseguite le MASW o le SCPTU, il profilo di velocità ricavato con tali indagini è stato utilizzato come guida per l'inversione delle curve H/V ottenute sulla stessa verticale con le misure di microtremore. Come è possibile osservare

dai rapporti di prova relativi alle misure in oggetto (capitolo 8), tutte le curve H/V teoriche (in blu nel grafico “Experimental Vs Synthetic H/V) seguono con buona corrispondenza quelle sperimentali, a conferma di una generale concordanza dei risultati provenienti da diverse tecniche di misura delle Vs. Fa eccezione un solo caso (R072) in cui la probabile presenza di un’inversione di velocità nei depositi (strati più lenti al di sotto di strati più veloci e rigidi) sembra mascherare un picco di H/V a circa 3 Hz.

Nella carta dei fattori di amplificazione e delle aree che necessitano di approfondimenti di terzo livello (Tavole 4, 4.1 e 4.2) sono inoltre indicati anche tutti i punti di misura di microtremore a stazione singola, su cui non sono stati eseguiti calcoli puntuali dei valori di velocità, ma i cui dati sono stati ugualmente utilizzati per correlazioni e verifiche del modello ottenuto e di seguito illustrato.

#### 4.2 Carta dei fattori di amplificazione

I dati di velocità ottenuti con le metodologie sopra descritte appaiono coerenti con un modello generale che permette di distinguere tre diverse tipologie di aree con caratteristiche dei depositi superficiali differenti, che danno origine ad amplificazioni di grado diverso, contrassegnate da colori dal giallo al rosso, così come previsto dagli ICMS.

La distinzione delle tre zone a diversa amplificazione, è stata fatta sulla base dei parametri indicati in Tabella 7 e dettagliati di seguito, che hanno quindi permesso di ricavare i diversi fattori di amplificazione secondo le metodologie proposte dagli indirizzi regionali e dagli ICMS (Tabella 8).

Per quanto riguarda i parametri di ingresso negli abachi degli IMCS, si sono utilizzati per tutte e tre le tipologie di aree individuate:

- un input sismico ( $A_g$ ) pari a 0,18 (il valore più prossimo a quello calcolato per l’area di Mirandola);
- una profondità del basamento sismico pari a 150 metri (così come definita al paragrafo 4.1);
- una litologia prevalente sabbiosa (così come indicato dalle stratigrafie dei sondaggi profondi).

I restanti parametri risultano invece variabili da un’area all’altra e vengono quindi esaminati di seguito.

Si sottolinea che per l’individuazione sulla carta delle aree a maggiore o minore amplificazione si è adottato in generale un criterio cautelativo, in considerazione del fatto che parametri importanti come i valori di velocità delle onde S sono affetti da un possibile errore di almeno il 15% proprio di tutti i metodi di indagine geofisica. Tutte le porzioni di territorio di incerta attribuzione tra due zone, perché caratterizzate da valori intermedi dei parametri, sono quindi state associate a quella col fattore di amplificazione maggiore.

ZONA	INDIRIZZI RER		IMCS				
	Ambito	Vs30	A <sub>g</sub> (g)	Litologia	H	Profilo di velocità	VsH
	Pianura 2	250 m/s	0.18	Sabbie	150	Lineare pendenza intermedia	400 m/s
	Pianura 2	200 m/s	0.18	Sabbie	150	Lineare pendenza massima	350 m/s
	Pianura 1	200 m/s	0.18	Sabbie	150	Lineare pendenza massima	400 m/s

**Tabella 7.** Zone a diversa amplificazione e valori dei parametri utilizzati per distinguerle.

## ZONE ROSSE

La zone rosse sono quelle caratterizzate da una maggiore amplificazione.

### *Parametri IMCS*

Le VsH calcolate risultano comprese tra 394 e 430 ed è quindi stato utilizzato il valore di ingresso di 400 m/s.

Il rapporto di tra VsH e Vs30 coincide con quelli proposti nella tabella 3.2-1 degli ICMS, per profilo di velocità lineare con pendenza massima.

### *Parametri indirizzi regionali*

La presenza di uno pseudo-bedrock a profondità comprese tra 85 e 106 metri, associato ad forte contrasto di impedenza, suggerisce di utilizzare la tabella relativa all'ambito di Pianura 1.

Le Vs30 misurate sono comprese 204 e 233 m/s ed è quindi stato utilizzato il valore di ingresso di 200 m/s.

## ZONE ARANCIONI

Le zone arancioni sono quelle caratterizzate da un'amplificazione intermedia.

### *Parametri IMCS*

Le VsH calcolate risultano comprese tra 353 e 379 m/s ed è quindi stato utilizzato il valore di ingresso di 350 m/s.

Il rapporto di tra VsH e Vs30 è prossimo a quelli proposti nella tabella 3.2-1 degli ICMS, per profilo di velocità lineare con pendenza massima.

### *Parametri indirizzi regionali*

La presenza di uno pseudo-bedrock a profondità certamente superiori a 100 metri suggerisce di utilizzare la tabella relativa all'ambito di Pianura 2.

Le Vs30 misurate sono comprese 211 e 234 m/s ed è quindi stato utilizzato il valore di ingresso di 200 m/s.

## ZONE GIALLE

Le zone gialle sono quelle caratterizzate da una minore amplificazione.

### *Parametri IMCS*

Le VsH calcolate risultano comprese tra 405 e 427 m/s (con la sola eccezione del dato di Mortizzuolo che viene discusso in seguito) ed è quindi stato utilizzato il valore di ingresso di 400 m/s.

Il rapporto di tra VsH e Vs30 è prossimo a quelli proposti nella tabella 3.2-1 degli ICMS, per profilo di velocità lineare con pendenza intermedia.

### *Parametri indirizzi regionali*

La presenza di uno pseudo-bedrock a profondità certamente superiori a 100 metri suggerisce di utilizzare la tabella relativa all'ambito di Pianura 2.

Le Vs30 misurate sono comprese 256 e 278 m/s (con la sola eccezione del dato di Mortizzuolo che viene discusso in seguito) ed è quindi stato utilizzato il valore di ingresso di 250 m/s.

ZONE SUSCETTIBILI DI AMPLIFICAZIONI LOCALI						
	ICMS		INDIRIZZI RER			
	FA	FV	FA <sub>PGA</sub>	FA <sub>0,1-0,5s</sub>	FA <sub>0,5-1s</sub>	
	0.84	1.35	1.5	1.8	2.3	
	1.06	2.05	1.5	1.8	2.5	
	1.09	1.83	1.7	1.9	2.6	Area caratterizzata da un forte contrasto di impedenza in corrispondenza di uno "pseudo-bedrock" a profondità massima dell'ordine di 100 metri

**Tabella 8.** Fattori di amplificazione per le tre zone a diversa pericolosità così come indicati nella legenda della carta dei fattori di amplificazione e delle aree che necessitano di approfondimenti di terzo livello.

Si segnala che il dato di Vs30 misurato nel corso della prova SCPTU3 nella frazione di Mortizzuolo (304 m/s), appare affetto da una probabile sovrastima in rapporto alle litologie attraversate, che, ad una prima analisi, non sembrerebbero compatibili con le velocità misurate alle diverse profondità. Tale ipotesi pare confermata dai risultati di una prospezione Refraction Microtremor (RE.MI.) eseguita per il PSC del Comune di San Felice sul Panaro (identificata come "ReMi 5"), a meno di 300 metri a sud della verticale di indagine. Con tale prospezione è stata calcolata un Vs30 di 235 m/s. In quest'area l'assenza di contrasti di impedenza a bassa profondità che possano dare luogo a picchi di

H/V non ha permesso di eseguire più affidabili stime di Vs30 sulle verticali delle misure di microtremore, che potessero verificare o confutare l'ipotesi.

Anche il valore di VsH di 453 m/s calcolato sulla medesima verticale risulta affetto dalla stessa possibile sovrastima delle Vs30, in quanto, per i motivi appena espressi, il profilo di velocità utilizzato per l'inversione della curva H/V nei primi 30 metri è sostanzialmente quello ricavato dalla SCPTU.

Alla luce delle incertezze sopra descritte e per coerenza col quadro generale emerso dalle indagini, si è ritenuto opportuno associare cautelativamente anche quest'area al valore di Vs30 di 250 m/s e al valore di VsH di 400 m/s.

In sintesi i criteri utilizzati per l'individuazione delle aree a diversa amplificazione hanno tenuto conto dei parametri indicati negli indirizzi nazionali e regionali ed hanno allo stesso tempo prodotto una suddivisione del territorio comunale coerente con la variazione del contrasto di impedenza evidenziata nelle carte delle frequenze naturali dei terreni (Tavole 2, 2.1 e 2.2) e della possibile conseguente amplificazione del moto sismico, così come descritta al paragrafo 2.3.

#### **4.3 Aree che necessitano di approfondimenti di terzo livello**

La carta dei fattori di amplificazione e delle aree che necessitano di approfondimenti di terzo livello conferma quanto indicato nella carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica in merito alle aree suscettibili di instabilità.

Tutta l'area del comune di Mirandola è infatti caratterizzata dalla presenza di terreni potenzialmente soggetti a liquefazione in caso di sisma in ragione della presenza terreni granulari saturi nei primi 20 m da piano campagna (barrato verde). Sono inoltre presenti su buona parte del territorio comunale terreni coesivi compressibili nei primi 10 m da piano campagna (tratteggio grigio).

Anche nella carta dei fattori di amplificazione, così come in quella delle MOPS, sono indicate le aree di cava riempite note, che vengono inserite tra le aree che necessitano di approfondimenti di terzo livello.

Per le verifiche alla liquefazione eseguite per il presente studio si rimanda al capitolo 5, mentre per le indicazioni in merito alle indagini, alle analisi e agli approfondimenti specifici da effettuare sulle aree che necessitano di approfondimenti di terzo livello si rimanda al capitolo 6.

## 5. POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE

Come indicato nella carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica - MOPS (Tavola 3) e in quella dei Fattori di amplificazione e delle aree che necessitano di approfondimenti di livello 3 (Tavola 4), su tutta l'area comunale di Mirandola sono attesi effetti legati alla possibile liquefazione dei terreni granulari saturi, presenti a diverse profondità in tutto il territorio.

In relazione a tale tipologia di effetti, particolare attenzione dovrà essere posta nelle aree in cui si rinvencono depositi granulari prossimi alla superficie. Un'indicazione preliminare su dove possano rinvenirsi tali condizioni è fornita dalla stessa carta MOPS (Tavola 3), che segnala le aree in cui i dati geognostici disponibili indicano la presenza del tetto dei primi depositi granulari a profondità inferiori agli 8 metri dal piano campagna.

In accordo con quanto già indicato nelle tavole del PTCP della Provincia di Modena, per tutto il territorio comunale, nelle aree in cui sono previsti interventi edilizi, occorrerà quindi eseguire una valutazione della possibilità di occorrenza di fenomeni di liquefazione a scala di dettaglio, con l'eventuale stima dei cedimenti attesi, attraverso procedure di terzo livello di approfondimento, secondo quanto indicato nell'allegato A3 della DAL n. 112/2007.

### 5.1 Liquefazione e terremoti storici

Gli effetti dei terremoti storici di cui si ha notizia nell'area comunale di Mirandola, dettagliati al capitolo III, sono tutto sommato modesti e da questi si può supporre che la zona sia stata sottoposta in tempi recenti a scuotimenti inferiori a quelli necessari per innescare fenomeni di liquefazione nei terreni granulari presenti, rispetto alle loro caratteristiche granulometriche e di addensamento.

La consultazione del "Nuovo catalogo nazionale dei processi di liquefazione avvenuti in occasione dei terremoti storici in Italia" (Galli e Meloni, 1993), ha confermato questa ipotesi ed infatti non si segnalano notizie legate a processi di liquefazione avvenuti nell'area di Mirandola. Sebbene l'intervallo temporale dei dati presenti nei cataloghi dei terremoti storici sia troppo limitato per concludere con certezza che non si possano verificare tale tipo di fenomeni, si ritiene in prima approssimazione che le probabilità che si verificano le condizioni di liquefazione delle sabbie sature della pianura modenese, e dell'area di Mirandola in particolare, siano comunque basse.

### 5.2 Verifiche alla liquefazione

Le verifiche alla 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. Le caratteristiche dell'evento sismico atteso sono la magnitudo e l'accelerazione  $a_g$  su suolo rigido di riferimento. I fattori predisponenti sono indicati nella carta Fattori di amplificazione e delle aree che necessitano di

approfondimenti di livello 3 (Tavola 4); in particolare il dato di  $FA_{PGA}$  per le diverse zone e quello relativo alla presenza dei depositi granulari saturi.

Sulla base dei dati geognostici relativi alle indagini eseguite per il presente studio di microzonazione (7 prove SCPTU e 5 prove CPT) e in considerazione del rinvenimento in tutte le verticali di livelli sabbiosi entro i primi 15 metri di profondità, si è proceduto ad una preliminare verifica della liquefazione con metodi semplificati, come dettagliato nel paragrafo 5.2.3.

### 5.2.1 Stima della magnitudo attesa

Secondo quanto indicato al punto 2.8 degli ICMS, 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, 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. 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 Mirandola, 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 attuali delle conoscenze relative alle sorgenti sismogenetiche che interessano area di studio e dettagliate al capitolo II, si ritiene che tale valore cautelativo di magnitudo ( **$M_w=6.14$** ) possa essere opportunamente adottato al fine di tenere conto del grado di incertezza sul grado di attività delle sorgenti geologicamente attive in un'area la cui sismicità rimane comunque poco conosciuta rispetto ad altre aree del territorio nazionale.

## 5.2.2 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 tabelle 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 Mirandola il valore di  $a_{gref}$  è pari a 0.141 (l'unità di misura è g, vale a dire l'accelerazione di gravità, corrispondente a  $9.8 \text{ m/s}^2$ ).

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 dei Fattori di amplificazione (Tavole 4, 4.1 e 4.2).

Nel caso dell'area comunale di Mirandola avremo quindi due possibili occorrenze:

- nelle aree a maggior amplificazione (aree rosse)  $a_{gmax s} = 0.240g$  ( $0.141 \times 1.7$ );
- nelle a minor amplificazione (aree arancio e gialle)  $a_{gmax s} = 0.212g$  ( $0.141 \times 1.5$ );

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.

### 5.2.3 Verifiche con i metodi semplificati

Come indicato nella DAL n. 112/2007, tra i metodi semplificati sono raccomandati quelli basati su prove CPT e tra questi in particolare il metodo di Robertson e Wride, 1998.

Per il presente studio sono state quindi eseguite le verifiche alla liquefazione su tutte e 12 le verticali delle prove penetrometriche statiche (CPT e SCPTU), utilizzando il programma di calcolo “Cliq 1.5” della Geologismiki Geotechnical Software, sviluppato in collaborazione col Prof. Peter Robertson. L’algoritmo di calcolo utilizzato si basa sul metodo di Robertson e Wride (1998) e permette, rispetto ad altri software commerciali, di valutare correttamente anche il contributo delle “zone di transizione” tra livelli a differente comportamento.

I parametri di input sono:

- **Mw = 6.14** (come definito nel paragrafo 5.2.1)
- **ag = 0.240/0.212** (come definito nel paragrafo 5.2.2). In Tabella 9 è indicato il valore utilizzato per ciascuna verticale.

Al termine della procedura, per ogni verticale è stato valutato l’indice del potenziale di liquefazione IL (Iwasaki et al., 1982), riportato in Tabella 9, 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

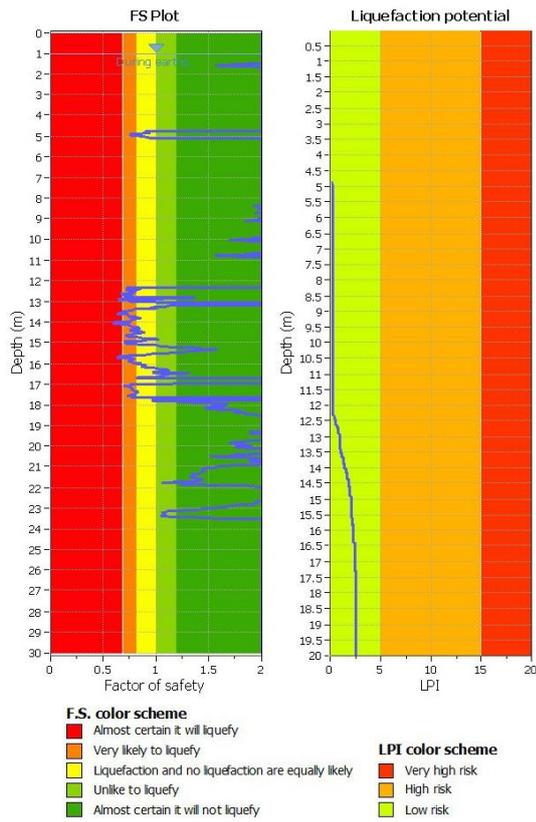
$IL > 15$  il rischio di liquefazione è estremamente elevato

Verticale	ag max s	IL	Verticale	ag max s	IL
SCPTU1	0.21	2.58	SCPTU7	0.24	1.21
SCPTU2	0.21	0.82	CPT1	0.21	0
SCPTU3	0.21	1.34	CPT2	0.21	0
SCPTU4	0.21	0.26	CPT3	0.24	1.35
SCPTU5	0.21	1.83	CPT4	0.24	0
SCPTU6	0.21	0.09	CPT5	0.21	0

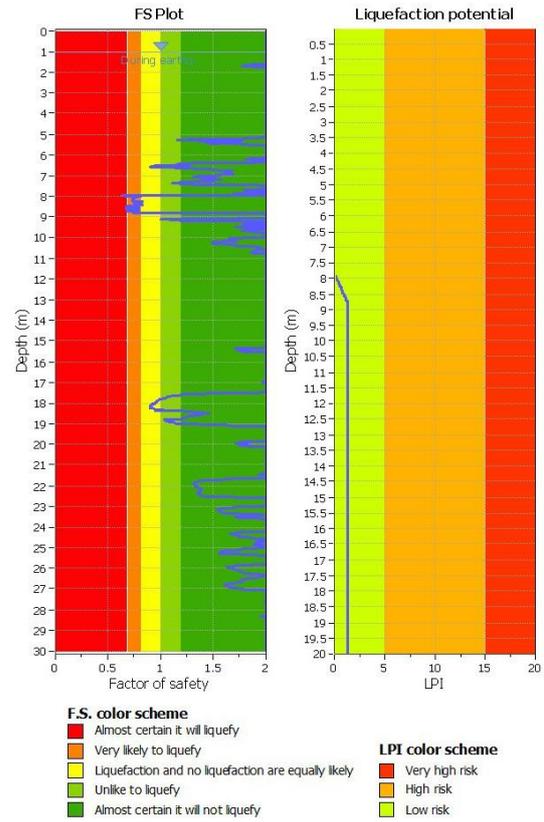
**Tabella 9.** Indice del potenziale di liquefazione calcolato per ciascuna verticale di indagine. Nella seconda colonna è indicato il picco di accelerazione alla superficie dei depositi utilizzato nel calcolo.

In 4 delle verticali esplorate il rischio di liquefazione è risultato nullo (IL=0), mentre per le restanti 8 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.

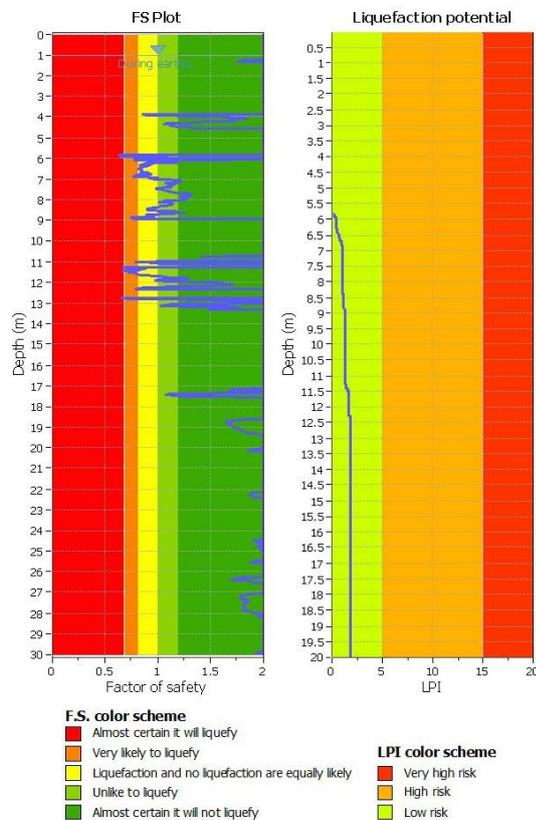
MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRANDOLA



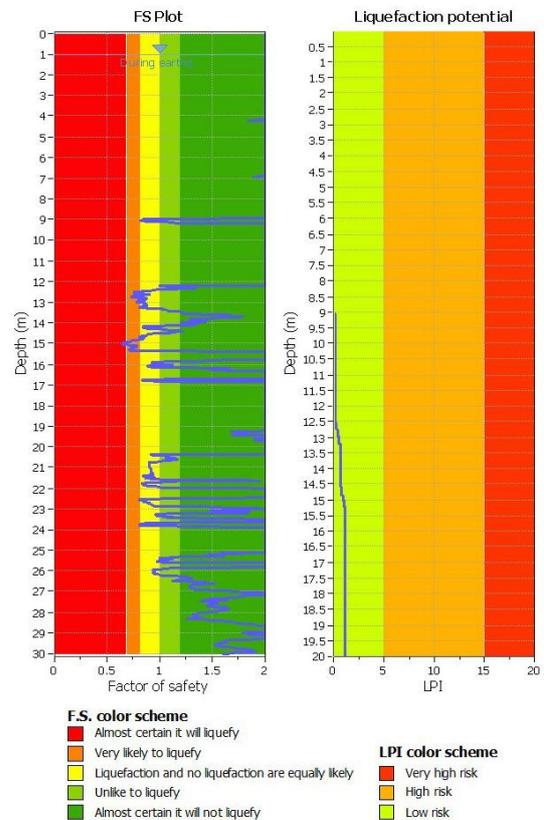
SCTPU1



SCTPU3

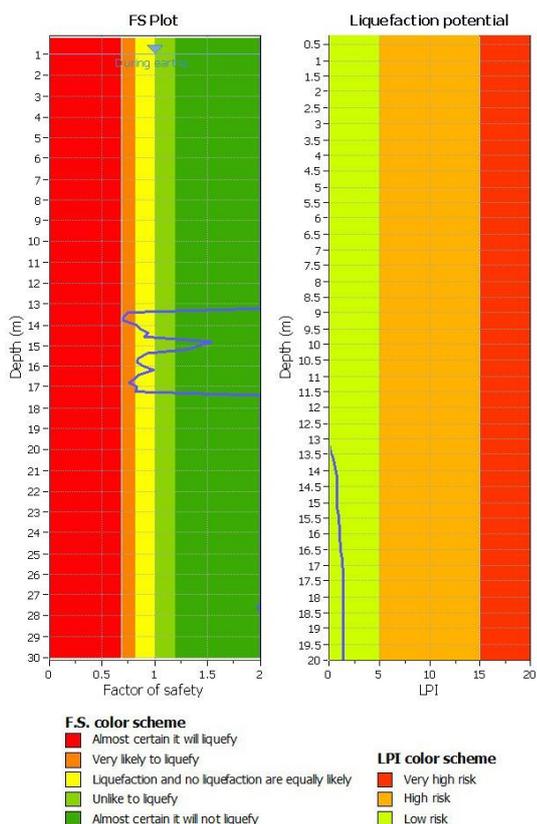


SCTPU5



SCTPU7

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRANDOLA



CPT3

### 5.2.4 Considerazioni conclusive sulla possibile occorrenza di fenomeni di liquefazione

L'insieme delle prove, sia quelle eseguite per questo studio, sia quelle di repertorio, portano a stimare, attraverso i metodi semplificati, come basso il rischio liquefazione dei depositi sabbiosi in caso di sisma. Si ritiene però necessario affrontare, nelle successive fasi di pianificazione e in relazione alla rilevanza degli interventi previsti, ulteriori verifiche quantitative e puntuali che, oltre a confermare la presenza della falda idrica entro i depositi sabbiosi attraverso misure piezometriche, accertino l'effettiva suscettibilità alla liquefazione delle sabbie con prove che consentano il prelievo di campioni per effettuare analisi del fuso granulometrico ed anche, nel caso di spessori significativi, di campioni da sottoporre a prove triassiali cicliche, così come precisato nel capitolo seguente.

## 6. APPROFONDIMENTI RICHIESTI E PRESCRIZIONI

Il presente studio di microzonazione sismica di secondo livello ha permesso di suddividere il territorio del comune di Mirandola, sulla base dell'amplificazione attesa, in aree a maggiore e minore pericolosità sismica (Tavola 4).

Alla luce delle indagini svolte e delle elaborazioni ed analisi effettuate, si possono sintetizzare le seguenti considerazioni:

- è stato confermato quanto indicato nella "Carta delle aree suscettibili di effetti locali Tavola 2.2 in scala 1:25.000 del PTCP 2009 e cioè la presenza, in tutta l'area di studio, di spessori di terreni potenzialmente liquefacibili in caso di sisma, che richiedono sempre una specifica e approfondita valutazione dell'occorrenza di tale fenomeno;
- sono inoltre da valutare con attenzione i possibili cedimenti a carico dei terreni compressibili presenti in una larga parte del territorio comunale;
- in base a tali elementi, in tutta l'area comunale sono sempre in ogni caso necessari approfondimenti di terzo livello.

### 6.1 Effetti attesi e approfondimenti richiesti

Per il presente studio di microzonazione sono state consultate le relazioni geologiche eseguite dal 2005 ad oggi per i Piani Particolareggiati del Comune di Mirandola. Dalla loro analisi è emerso che le verifiche alla liquefazione sono sempre state condotte solo sulla base dei risultati delle prove penetrometriche statiche e attraverso l'utilizzo di metodi di calcolo semplificati.

Alla luce di questo, si rende pertanto 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 delle sabbie con prove che consentano il prelievo di campioni rappresentativi degli orizzonti sabbiosi 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 (DAL n.112/2007). Qualora si rinvenissero spessori significativi di depositi i cui campioni rientrano nelle fasce di possibile liquefazione, dovranno essere prelevati ulteriori campioni da sottoporre a prove triassiali cicliche, 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 nelle successive fasi di pianificazione POC/PUA e di progettazione degli interventi si dovrà tener conto di tale aspetto in sede di indagine al fine di ottimizzare le risorse in funzione della rilevanza delle opere.

In tutta l'area comunale ed in particolare nelle zone in cui nella carta dei fattori di amplificazione e delle aree che necessitano di approfondimenti di terzo livello è indicata la presenza di terreni compressibili, dovranno essere attentamente valutati caso per caso i possibili cedimenti postsismici, anche in relazione alle opere previste. Come indicato nell'allegato A3 degli indirizzi regionali (DAL n.112/2007) alla lettera E: *“qualora si rinverranno depositi coesivi molto soffici ( $c_u \leq 70\text{kPa}$ ) e plastici ( $I_p \geq 30\%$ ) in cui si prevede un incremento delle pressioni interstiziali  $0' \sigma_u \Delta \geq 0.3$  durante il terremoto di riferimento, deve essere valutata l'entità del cedimento di riconsolidazione conseguente alla dissipazione delle pressioni interstiziali accumulate durante il terremoto”*. A tal fine dovranno essere condotte prove in sito e in laboratorio per la caratterizzazione geotecnica dei vari strati esplorando un numero di verticali adeguato all'importanza dell'opera e alla estensione dell'area di intervento e sufficiente ad accertare la variabilità spaziale delle caratteristiche stratigrafiche e geotecniche del deposito.

## 6.2 Considerazioni conclusive e prescrizioni

Fermo restando quanto indicato nei paragrafi precedenti del presente capitolo, per tutti i comparti “da attuare” riportati nelle Tavole in scala 1:5.000, 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, con lo scopo di definire in dettaglio le caratteristiche dell'area di intervento;
- dovrà essere attentamente valutata l'eventuale presenza di orizzonti liquefacibili, compressibili o comunque a bassa resistenza e, nel caso, quantificarne i cedimenti a seguito di terremoto;
- si dovrà sempre definire la quota della falda nel primo sottosuolo, la sua escursione stagionale e il suo valore medio annuale rappresentativo;
- 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 nelle tavole 2, 2.1 e 2.2, 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.

Si ricorda infine che tutti gli studi di approfondimento, le relazioni, le indagini e i calcoli dovranno essere eseguiti facendo riferimento alla normativa antisismica vigente ed in particolare dovranno essere conformi alle NTC2008.

Vengono di seguito dettagliate, per il capoluogo e per tutte le principali frazioni, le risultanze più significative emerse dal presente studio di microzonazione sismica. Per ciascuna macroarea ed in particolare per i comparti da attuare, vengono fornite le seguenti indicazioni:

- eventuali particolarità geologiche emerse;
- fattori di amplificazione;
- possibili effetti attesi;
- disposizioni in termini di indirizzi ed eventuali prescrizioni per gli approfondimenti di indagine da demandare ai successivi livelli di pianificazione.

Si ricorda in ogni caso che per l'intero territorio comunale vale quanto indicato nei paragrafi precedenti del presente capitolo relativamente ai necessari approfondimenti di terzo livello.

## 6.2.1 Mirandola

Come evidenziato nella Tavola 4.1, l'area del capoluogo è interessata da tutte e tre le zone a diversa amplificazione (Tabella 8), con aumento della pericolosità sismica da nord a sud.

Per ciascuna zona vengono di seguito analizzate in dettaglio le macroaree in cui si concentrano la maggior parte dei comparti.

### 6.2.1.1 Mirandola - Zona Rossa

La zona rossa, ad amplificazione maggiore, interessa la porzione più meridionale dell'area comunale.

I due comparti di Via Mameli (prossimi a "R074 - MASW3" nella Tavola 4.1) nella zona sud-ovest dell'abitato sono gli unici interamente compresi in questa zona.

La carta delle frequenze naturali dei terreni e dei contrasti di impedenza (Tavola 2.1) evidenzia la presenza di un contrasto di impedenza alto ad una profondità di circa 100 metri dal piano campagna, che, come specificato nel paragrafo 2.3, può determinare una particolare amplificazione del moto sismico. Le frequenze di risonanza fondamentale del terreno sono comprese tra 0.8 e 0.9 Hz, con ampiezza dei picchi pari a circa 3.

Per i comparti da attuare in quest'area si dovranno dunque tenere in massima considerazione già in fase di progettazione preliminare, i valori di frequenza fondamentale dei terreni di fondazione (anche a seguito di ulteriori misure HVSR), evitando la realizzazione di strutture aventi la stessa frequenza di vibrazione del terreno (si veda il paragrafo 2.3).

Il tetto dei depositi granulari saturi risulta a profondità comprese tra 7 e 8 metri. Tali depositi presentano un addensamento da medio a buono, in aumento con la profondità. I livelli coesivi più superficiali presentano valori di consistenza medi.

I 2 comparti di Via Nazioni Unite (prossimi a “R027 - MASW4” nella Tavola 4.1) nella zona sud-est dell’abitato, sono solo parzialmente compresi in questa zona e vengono descritti nel paragrafo 6.2.1.2 relativo alla “zona arancio”. L’attribuzione dei fattori di amplificazione andrà comunque valutata in relazione all’esatta ubicazione di ogni singolo intervento.

### **6.2.1.2 Mirandola - Zona Arancio**

La zona arancio, ad amplificazione intermedia, interessa la porzione più ampia e centrale dell’area del capoluogo.

La carta delle frequenze naturali dei terreni e dei contrasti di impedenza (Tavola 2.1) evidenzia la presenza in questa zona di un contrasto di impedenza ad una profondità di oltre 100 metri dal piano campagna, che, come specificato nel paragrafo 2.3, può determinare una particolare amplificazione del moto sismico. Le frequenze di risonanza fondamentale del terreno sono comprese tra 0.8 e 1 Hz, con ampiezze dei picchi comprese tra 2 e 2.5.

Per i comparti da attuare in quest’area si dovrà dunque tenere conto già in fase progettuale dei valori di frequenza fondamentale dei terreni di fondazione (anche a seguito di ulteriori misure HVSR), evitando la realizzazione di strutture aventi la stessa frequenza di vibrazione del terreno (si veda il paragrafo 2.3).

I due comparti di Via Nazioni Unite (nell’intorno a “R027 - MASW4” nella Tavola 4.1) nella zona sud-est dell’abitato, sono parzialmente compresi nella “zona rossa”. L’attribuzione dei fattori di amplificazione andrà comunque valutata in relazione all’esatta ubicazione di ogni singolo intervento. Il tetto dei depositi granulari saturi risulta a profondità comprese tra 8 e 9 metri. Tali depositi presentano un addensamento da medio a buono, in aumento con la profondità. I livelli coesivi più superficiali presentano valori di consistenza medi.

I comparti a nord di Via Mazzone e a sud di Viale Gramsci (nell’intorno di “R034 - CPT di archivio” nella Tavola 4.1) nella zona est dell’abitato, sono caratterizzati dalla presenza di terreni con proprietà meccaniche abbastanza omogenee. Il tetto dei depositi granulari saturi risulta a profondità comprese tra 8 e 12 metri. Tali depositi presentano un addensamento da medio a buono, in aumento con la profondità. I livelli coesivi più superficiali presentano valori di consistenza medi.

I comparti a nord di Viale Gramsci e a ovest di Via Bruino (nell’intorno di “R034 - CPT di archivio” nella Tavola 4.1) nella zona nord-est dell’abitato, sono caratterizzati dalla presenza di terreni con proprietà meccaniche variabili anche all’interno di uno stesso comparto. In particolare, sulla base di quanto emerso dalle numerose prove disponibili nella banca dati geognostica realizzata per il presente studio, il tetto dei depositi granulari saturi risulta a profondità comprese tra 4 e 14 metri, con grande variabilità anche su verticali di indagine molto ravvicinate. Tali depositi granulari presentano comunque un addensamento da medio a buono, in aumento con la profondità. I livelli coesivi più

superficiali presentano invece valori di consistenza discreti, anche se su alcune verticali sono stati riscontrati spessori limitati a consistenza scarsa.

Le caratteristiche geomeccaniche riscontrate suggeriscono un'attenta verifica, nelle successive fasi di pianificazione, della suscettibilità alla liquefazione secondo quanto indicato al paragrafo 6.1. In fase esecutiva si dovrà inoltre porre particolare attenzione ad accertare che le strutture di fondazione di eventuali opere si impostino su terreni con caratteristiche meccaniche quanto più possibile omogenee, al fine di evitare che si possano originare effetti differenziali, sia riguardo all'amplificazione sismica che ai cedimenti.

I comparti a sud di Viale Agnini e a nord di Via San Martino Carano (nell'intorno di "R018 - CPT di archivio" nella Tavola 4.1) nella zona ovest dell'abitato, sono caratterizzati dalla presenza di terreni con proprietà meccaniche abbastanza omogenee. Il tetto dei depositi granulari saturi risulta a profondità comprese tra 7 e 9 metri. Tali depositi presentano già nei primi metri un addensamento da medio a buono, in rapido aumento con la profondità. I livelli coesivi più superficiali presentano valori di consistenza discreti, anche se su alcune verticali sono stati riscontrati spessori limitati a consistenza scarsa.

I comparti a nord di Viale Agnini e a sud di Via per Concordia (compresi tra "R073 - MASW1" e "R045 - CPT di archivio" nella Tavola 4.1) nella zona nord-ovest dell'abitato, sono caratterizzati dalla presenza di terreni con proprietà meccaniche tutto sommato omogenee. Il tetto dei depositi granulari saturi risulta a profondità comprese tra 7 e 9 metri. Tali depositi presentano già nei primi metri un addensamento da medio a buono, in rapido aumento con la profondità. I livelli coesivi più superficiali presentano una consistenza mediamente discreta.

I comparti che si collocano a nord e a sud di Via Bosco (a sud ovest di "R059 - CPT di archivio"), nella zona più settentrionale dell'abitato, sono caratterizzati dalla presenza di terreni con proprietà abbastanza omogenee. Il tetto dei depositi granulari saturi risulta a profondità comprese tra 9 e 12 metri. Tali depositi presentano in genere già nei primi metri un addensamento buono, in rapido aumento con la profondità. I livelli coesivi più superficiali presentano valori di consistenza discreti, anche se su alcune verticali sono stati riscontrati spessori limitati a consistenza scarsa tra 3 e 4 metri da p.c..

### **6.2.1.3 Mirandola - Zona Gialla**

La zona gialla, ad amplificazione minore, interessa la parte nord-occidentale dell'area del capoluogo.

I terreni in cui sono localizzati i pochi comparti da attuare presenti in questa porzione di territorio, sia quelli a sud di Via dell'Industria, che quello più a est, lungo via Punta, presentano caratteristiche sostanzialmente omogenee: a profondità comprese tra 10 e 12 metri si rinviene il tetto dei depositi granulari saturi che risultano ben addensati già nei primi metri. I livelli coesivi più superficiali presentano valori di consistenza discreti, anche se localmente si possono rinvenire orizzonti a consistenza più scarsa. A seguito di ulteriori approfondimenti geognostici, sarà quindi opportuna un'attenta valutazione dei possibili

cedimenti in relazione alle opere previste. I valori di  $f_0$  risultano compresi tra 0.8 e 0.85 Hz, con picchi di ampiezza intorno a 2.2 (Tavola 2.1).

### 6.2.2 San Giacomo in Roncole

Come evidenziato nella Tavola 4.1, la frazione di San Giacomo in Roncole è interamente compresa entro l'area a maggiore amplificazione.

La carta delle frequenze naturali dei terreni e dei contrasti di impedenza (Tavola 2.1) evidenzia, proprio in corrispondenza dell'abitato, la presenza di un contrasto di impedenza molto alto a una profondità compresa tra 80 e 100 metri dal piano campagna, che, come specificato nel paragrafo 2.3, può determinare una particolare amplificazione del moto sismico. Le frequenze di risonanza fondamentale del terreno sono comprese tra 0.9 e 1.15 Hz. Per tutti i comparti da attuare in quest'area (i 3 in prossimità del nucleo storico del paese e quello più a nord che si sviluppa ad est della Strada Statale) si dovrà dunque tenere in massima considerazione già in fase di progettazione preliminare i valori di frequenza fondamentale dei terreni di fondazione (anche a seguito di ulteriori misure HVSR), evitando la realizzazione di strutture aventi la stessa frequenza di vibrazione del terreno (si veda il paragrafo 2.3).

Per tutti i comparti da attuare in quest'area il tetto dei depositi granulari saturi risulta a profondità comprese tra 12 e 14 metri. Tali depositi presentano un addensamento medio. I livelli coesivi più superficiali presentano valori di consistenza da medi a scarsi, in ragione dei quali sarà opportuna un'attenta valutazione dei possibili cedimenti assoluti e differenziali in relazione alle opere previste.

### 6.2.3 Cividale - Stazione

Come evidenziato nella Tavola 4.2, la frazione di Cividale è interamente compresa entro l'area a minore amplificazione.

Per tutti i comparti da attuare nell'area di Cividale, concentrati nella zona sud-est dell'abitato, il tetto dei depositi granulari saturi risulta a profondità comprese tra i 4,5 e i 6 metri. I livelli sabbiosi-limosi più superficiali presentano valori di addensamento variabili a seconda delle verticali e in graduale aumento con la profondità. Tali caratteristiche impongono un'attenta verifica, nelle successive fasi di pianificazione, della suscettibilità alla liquefazione secondo quanto indicato al paragrafo 6.1. I livelli coesivi più superficiali presentano valori di consistenza da medi a buoni. I valori di  $f_0$  variano da 0.75 Hz per il comparto più a ovest, a 0.92 per quello più a est, con valori di ampiezza dei picchi intorno a 2 (Tavola 2.1).

In corrispondenza del comparto da attuare a nord-ovest della Stazione Ferroviaria di Mirandola, il tetto dei depositi granulari saturi risulta a profondità comprese tra 8 e 10 metri. Tali depositi presentano un addensamento elevato fin dai primi metri. I livelli coesivi più superficiali presentano valori di consistenza variabili da medi a scarsi, in ragione dei quali sarà opportuna un'attenta valutazione dei possibili cedimenti in relazione agli

interventi previsti. I valori di  $f_0$  risultano intorno a 0.8 Hz, con bassi valori di ampiezza dei picchi (Tavola 2.1).

#### **6.2.4 Mortizzuolo**

Per tutti e 4 i comparti da attuare nell'area di Mortizzuolo, il tetto dei depositi granulari saturi risulta a profondità comprese tra 9 e 10 metri. Tali depositi presentano un addensamento da medio a buono sin nei primi metri. I livelli coesivi più superficiali presentano valori di consistenza da medi a buoni, in corrispondenza dei 3 comparti più a nord. Nel comparto a sud-ovest dell'abitato, si rinvengono invece nei primi metri livelli coesivi a consistenza media.

I valori di  $f_0$  risultano variabili da 0.88 Hz (dato registrato nel comparto più a nord e in quello più a sud) a 1 Hz, con valori di ampiezza dei picchi mediamente si poco superiore a 2 (Tavola 2.1).

#### **6.2.5 Ponte San Pellegrino**

Nella frazione di Ponte San Pellegrino non sono presenti comparti da attuare.

Il tetto dei depositi granulari saturi risulta presente già a basse profondità. L'addensamento di tali livelli è basso nei primi metri, ma comunque in graduale aumento con la profondità. La misura di microtremore eseguita ha riscontrato un valore di  $f_0$  pari a 1.06 con ampiezza di poco superiore a 2 (Tavola 2.1). È stato inoltre riscontrato un secondo picco di ampiezza poco inferiore a circa 3.5 Hz, anch'esso di origine stratigrafica.

#### **6.2.6 Quarantoli**

Nella frazione di Quarantoli è presente un solo comparto da attuare, i cui terreni presentano caratteristiche analoghe a quelle che si riscontrano nel primo sottosuolo di tutta l'area del paese. Il tetto dei depositi granulari saturi, caratterizzati da un addensamento medio, risulta sempre collocato a profondità inferiori ai 10 metri.

I livelli coesivi più superficiali presentano, nell'area del comparto, valori di consistenza medi, mentre localmente, in altre aree della stessa frazione, si sono rinvenuti livelli a più bassa consistenza.

Le misure di microtremore eseguite hanno evidenziato la presenza di deboli picchi a frequenza molto bassa (Tavola 2.1).

#### **6.2.7 Gavello**

Nella frazione di Gavello sono presenti 3 comparti da attuare. Nella zona centro-meridionale dell'abitato il tetto dei depositi granulari saturi, caratterizzati da un addensamento medio in aumento con la profondità, si attesta a quote comprese tra 5 e 7 metri dal piano campagna, mentre a nord della strada provinciale si rinviene a quote

inferiori (tra 7 e 10 metri da p.c.). Sono inoltre spesso presenti livelli sabbiosi-limosi decimetrici anche a profondità inferiori a 5 metri.

Tali caratteristiche impongono per tutti e 3 i comparti, un'attenta verifica, nelle successive fasi di pianificazione, della suscettibilità alla liquefazione secondo quanto indicato al paragrafo 6.1.

I livelli coesivi più superficiali presentano, in tutta l'area dell'abitato di Gavello, valori di consistenza da medi a scarsi, in ragione dei quali sarà opportuna un'attenta valutazione dei possibili cedimenti in relazione alle opere previste.

Le misure di microtremore eseguite hanno evidenziato la presenza di deboli picchi a frequenza molto bassa, che portano a escludere fenomeni di amplificazione sismica dovuti a contrasti di impedenza (Tavola 2.1).

### **6.2.8 San Martino Spino**

Nella frazione di San Martino Spino non sono presenti comparti da attuare.

Nell'area più centrale del paese, che si sviluppa lungo la Strada Provinciale delle Valli, il tetto dei depositi granulari saturi si attesta tra 5 e 7 metri. L'addensamento di tali livelli è inizialmente basso e in graduale aumento con la profondità. Nelle aree immediatamente a nord e sud dell'abitato il tetto dei depositi granulari saturi è presente tra i 13 e i 17 metri dal piano campagna.

I livelli coesivi più superficiali presentano, in tutta l'area dell'abitato di San Martino Spino, valori di consistenza da medi a scarsi.

I valori di  $f_0$  risultano variabili tra 0.8 e 0.9 Hz, con valori di ampiezza dei picchi mediamente intorno a 2 (Tavola 2.1).

### **6.2.9 Tramuschio**

Nella frazione di ponte Tramuschio non sono presenti comparti da attuare.

Il tetto dei depositi granulari saturi, caratterizzati in quest'area da un buon addensamento, si rinviene a profondità di circa 13 metri.

I livelli coesivi più superficiali presentano valori di consistenza variabili da medi a scarsi.

I valori di  $f_0$  misurati risultano pari a circa a 0.9 Hz, con valori di ampiezza dei picchi leggermente superiori a 2 (Tavola 2.1).

## 7. 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.
- Baratta (1901) - I terremoti d'Italia. Saggio di storia geografia e bibliografia sismica italiana, Torino 1901 (Ristampa anastatica FORNI, Sala Bolognese).
- 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*.
- Burrato, P., Ciucci F. e Valensise G. (2003) - An inventory of river anomalies in the Po Plain, Northern Italy: evidence for active blind thrust faulting. *Ann. Geophys-Italy*, 46, 5, 865-882.
- 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.
- Castaldini, D., Gasperi G., Panizza M. e Pellegrini M. (1979) - Neotettonica dei Fogli 74 (Reggio nell'Emilia) (p.p.) e 75 (Mirandola) nell'intervallo da 18.000 B.P. all'Attuale (interv. V). C.N.R., Nuovi contributi alla realizzazione della Carta Neotettonica di Italia, publ. n. 251 of Progetto Finalizzato Geodinamica, 317-332.
- 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..
- 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.
- Ciucci, F., Burrato P. e Valensise G. (2002) - Complex geomorphic response to blind thrust faulting along the northern margin of the Apennines near Mirandola (Po Plain). XXVIII General Assembly of the European Seismological Commission - Genoa, Italy 1-6 September 2002, Book of Abstracts, 203.
- Crespellani T., Nardi R. e Simoncini C. (1991) - La liquefazione del terreno in condizioni sismiche. Zanichelli, Bologna.
- CNR (1983) - Indagini di microzonazione sismica. Progetto Finalizzato Geodinamica. Pubbl.492.
- 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.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRANDOLA

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.

Flores G. (1981) - Il terremoto. Longanesi e C., Milano.

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.

Gasperi G. e Pellegrini M. (1968) - Movimenti tettonici recenti nella zona di Mirandola (Pianura modenese). Proc. Soc. Nat. e Mat. di Modena, 99.

Gruppo di lavoro CPTI (2004) - Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, versione 2004 (CPTI04), INGV, Bologna.

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

Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti G.N.D.T. (1996) - Zonazione sismogenetica del territorio nazionale ed aree limitrofe. ([http://gndt.ingv.it/Banche\\_dati/](http://gndt.ingv.it/Banche_dati/)).

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/>).

INGV - 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/>.

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

Martelli L. e Molinari F.C. (a cura di) (2008) - Studio geologico finalizzato alla ricerca di potenziali serbatoi geotermici nel sottosuolo del comune di Mirandola, Regione Emilia Romagna - Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, Bologna.

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.

Mulargia F., Castellaro S. e Rossi P.L. (2007) - Effetti di sito e Vs30: una risposta alla normativa antisismica, Il geologo dell'Emilia-Romagna.

Obermeier S.F., Olson S.M. e Green R.A. (2005) - Field occurrences of liquefaction-induced features: a primer for engineering analysis of paleoseismic shaking. Engineering Geology, 76, 209-234.

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.

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI MIRANDOLA

- 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.
- Regione Emilia Romagna - Ufficio Geologico (1999) - Carta Geologica di pianura dell'Emilia-Romagna - scala 1:250.000. Ed. SELCA, Firenze.
- 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 - Legge Regionale n. 20/2000 - "Disciplina generale sulla tutela e l'uso del territorio".
- 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. 1051/2011 - "Approvazione dei criteri per gli studi di microzonazione sismica ed assegnazione e concessione dei contributi di cui all'opcm 3907/2010 e ss.mm.".
- Robertson P.K. e Wride C.E. (1998). Evaluating Cyclic Liquefaction Potential using the CPT, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 35, No. 3
- 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.
- 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>.
- Sangiorgi S. e Viel G. (2007) - Esperienza di caratterizzazione sismica a scala comunale: zonizzazione e normative per il Comune di Cattolica (RN). 26° Convegno Nazionale G.N.G.T.S. - Riassunti estesi delle comunicazioni", Trieste 2007.
- 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.
- Youd T.L e Perkins D.M. (1978) - Mapping liquefaction-induced ground failure potential. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 104, GT4, 433-446.
- Zoetemeijer R. (1993) - Tectonic Modelling of Foreland Basins, thin skinned thrusting, syntectonic sedimentation and lithospheric flexure. PhD Thesis, Vrije Universiteit, Amsterdam.