



PUG 2022  **COMUNE DI FERRARA**

Piano Urbanistico Generale (PUG)

(Legge Regionale n. 24/2017)

MICROZONAZIONE SISMICA

Relazione Illustrativa

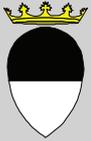
ottobre 2022

QC-5.6

Piano Urbanistico Generale (PUG) di Ferrara

Legge Regionale n. 24 del 2017

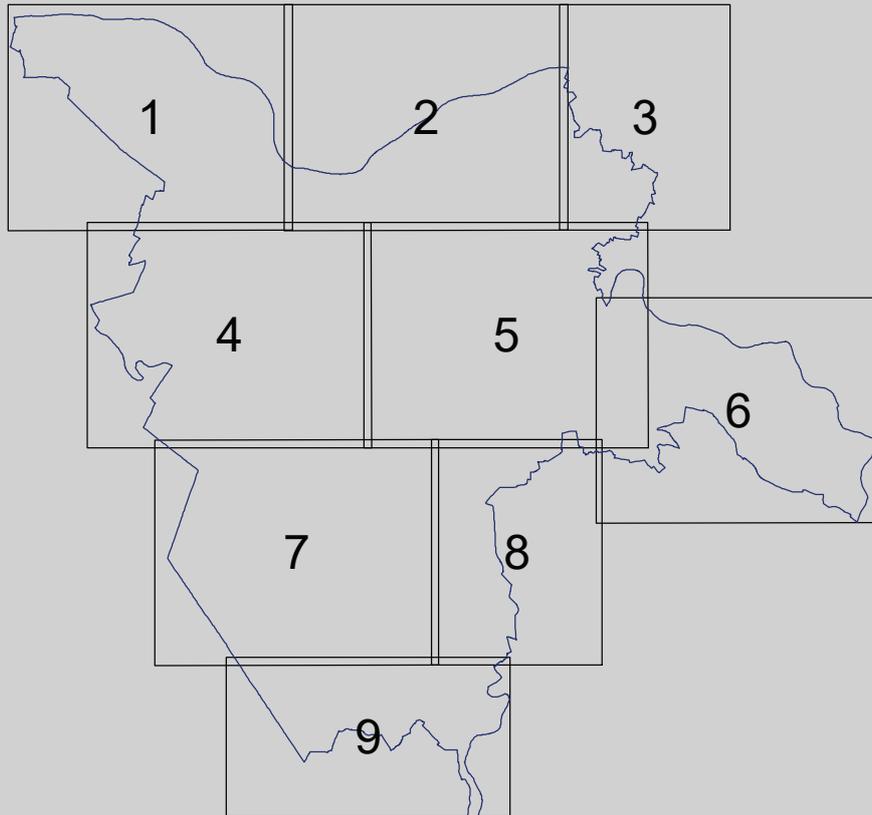
QC.5.6
MICROZONAZIONE SISMICA
Relazione Illustrativa



COMUNE DI FERRARA

città patrimonio dell'umanità

Servizio Ufficio di Piano e Rigenerazione urbana



Relazione Illustrativa

Adeguamento del quadro conoscitivo in materia

geologico-sismica degli strumenti comunali di pianificazione

urbanistica ai fini della redazione del PUG

Geotema Srl

14/04/2020

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL
COMUNE DI FERRARA

Indice

1	Introduzione.....	4
1.1	Criteri di realizzazione dello studio e riferimenti normativi.....	4
1.2	Lo studio di microzonazione sismica	5
1.3	Elaborati prodotti	6
2	Definizione della pericolosità di base e degli eventi di riferimento	7
2.1	Sismicità storica	8
2.1.1	La sequenza del 2012	13
2.2	Sorgenti sismogenetiche	18
3	Assetto geologico e geomorfologico dell'area	21
3.1	Contesto geografico e geomorfologico	21
3.1.1	Pianura a meandri del fiume Po	23
3.1.2	Bassa pianura alluvionale e deltizia del fiume Po.....	24
3.1.3	Pianura alluvionale dei fiumi appenninici	25
3.2	Contesto geologico	26
3.2.1	Pianura a meandri del fiume Po	29
3.2.2	Bassa pianura alluvionale e deltizia del fiume Po.....	29
3.2.3	Pianura alluvionale dei fiumi appenninici	30
3.3	Contesto strutturale	31
4	Dati geognostici e geofisici	37
4.1	Indagini di repertorio.....	37
4.2	Indagini eseguite per la microzonazione sismica	42
4.2.1	Indagini realizzate in situ	43
5	Modello del sottosuolo.....	51
5.1	Substrato	53
5.2	Terreni di copertura.....	55
5.2.1	Supersistema Quaternario Marino	55
5.2.2	Supersistema Emiliano-Romagnolo	56
6	Interpretazioni e incertezze	58
6.1	Frequenza naturale dei terreni (f_0)	58

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL
COMUNE DI FERRARA

6.2	Substrato rigido	60
6.3	Terreni suscettibili di liquefazione.....	65
7	Metodologie di elaborazione e risultati.....	66
7.1	Modello numerico del sottosuolo	67
7.1.1	Dati utilizzati	68
7.1.2	Algoritmi di conversione tra i vari formati di dato	70
7.1.3	Algoritmi di interpolazione	74
7.1.4	Analisi del modello	78
7.2	Zone suscettibili di amplificazioni locali	85
7.2.1	Risposta sismica locale con modellazioni numeriche.....	89
7.3	Zone instabili soggette a liquefazione	107
7.3.1	Verifiche del potenziale di liquefazione	108
8	Elaborati cartografici.....	123
8.1	Carta delle indagini (Tavole A _{1÷9}).....	124
8.2	Carta Geologico Tecnica (Tavole B _{1÷9})	125
8.2.1	Elementi geologici ed idrogeologici.....	125
8.2.2	Terreni di copertura.....	126
8.3	Carta delle frequenze naturali dei terreni (Tavole C _{1÷9} e C _{2÷9})	129
8.4	Carta delle aree suscettibili di effetti locali (Tavole D _{1÷9}).....	130
8.5	Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs) (Tavole E _{1÷9}).....	137
8.6	Carte di microzonazione sismica di secondo livello (Tavole F _{1÷9} , G _{1÷9} , H _{1÷9} , I _{1÷9} , J _{1÷9} , K _{1÷9} , L _{1÷9} , M _{1÷9} , N _{1÷9})	138
9	Commenti finali e criticità.....	140
9.1	Microzonazione sismica e criticità.....	140
9.2	Correlazione fra insediamento antropico e potenziale di liquefazione	143
9.3	Indicazioni per la riduzione del rischio sismico	146
10	Bibliografia	148
11	Allegati	157

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL
COMUNE DI FERRARA

Coordinamento dello studio:

dott. geol. Luca Minarelli

Redazione della relazione:

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

Creazione geodatabase dei dati geologici e geotecnici:

dott. geol. Luca Minarelli
dott. geol. Andrea Pavanati
dott. Davide Franciosi

Elaborazione tavole cartografiche:

dott. geol. Luca Minarelli
dott. geol. Andrea Pavanati

Elaborazione dei dati stratigrafici:

dott. geol. Luca Minarelli
prof. Marco Stefani

Esecuzione ed elaborazione misure HVSR:

dott. geol. Luca Minarelli
dott. Davide Franciosi

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

1 Introduzione

Questa relazione illustra le metodologie e le procedure operative applicate agli approfondimenti geologico-sismici eseguiti a supporto della nuova pianificazione urbanistica, finalizzata alla redazione del Piano Urbanistico Generale (P.U.G.). Secondo quanto previsto dalle norme regionali, la pianificazione urbanistica deve contribuire alla riduzione del rischio sismico e questo si attua anche attraverso studi di microzonazione sismica, che devono contribuire ad indirizzare i processi di trasformazione urbana e gli interventi edilizi verso scenari di mitigazione e prevenzione del rischio sismico.

Il Comune di Ferrara già disponeva di uno studio di microzonazione, elaborato subito dopo gli eventi sismici del 2012 (O.P.C.M. n. 4007/2012 - <https://geo.regione.emilia-romagna.it/schede/pnsrs/index.jsp?id=38008>). Lo studio, redatto dall'Università di Ferrara (Fioravante e Giretti, 2013), non risulta però conforme al nuovo "Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. 24/2017)" approvato con la Delibera di Giunta Regionale D.G.R. n. 630 del 29 aprile 2019.

Per consentire l'adozione e l'approvazione del nuovo P.U.G. risulta quindi necessario adeguare i contenuti di microzonazione sismica alle nuove disposizioni regionali, che ricalcano, in sintesi, le indicazioni incluse negli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica" nazionali (Gruppo di Lavoro MS, 2008). Le necessità di adeguamento hanno fornito l'occasione per aggiornare il quadro geologico-sismico a livello comunale, grazie alla disponibilità di molte nuove indagini di sottosuolo e dato il significativo miglioramento delle conoscenze geologiche, di superficie e di sottosuolo, ottenuto nell'ultimo quinquennio. Gli elaborati e le analisi prodotte a supporto della nuova pianificazione comunale, sono stati spinti sino al secondo livello di approfondimento di microzonazione sismica. Questo risulta in accordo con quanto richiesto dalla direttiva regionale (D.G.R. n. 630/2019) per la predisposizione e l'approvazione degli strumenti generali di pianificazione urbanistica comunale.

1.1 Criteri di realizzazione dello studio e riferimenti normativi

Il presente studio di microzonazione sismica di secondo livello del Comune di Ferrara è stato redatto sulla base delle indicazioni contenute nella D.G.R. n. 630 del 29 aprile 2019. Per quanto non specificato nel suddetto documento, i riferimenti tecnici per la realizzazione dello studio e per l'elaborazione e la redazione delle tavole cartografiche sono rappresentati dai seguenti testi:

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

- *“Microzonazione sismica - Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.1”*, redatto dalla Commissione tecnica per la microzonazione sismica (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2018), da qui in avanti *“Standard MS 4.1”*;
- *“Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica”*, approvato dal Dipartimento della Protezione Civile e dalla Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome (Gruppo di lavoro MS, 2008) e successive modifiche ed integrazioni (AA.VV., 2011), da qui in avanti *“ICMS”*.

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

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

1.2 Lo studio di microzonazione sismica

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

La finalità principale di uno studio di microzonazione sismica consiste nel giungere alla suddivisione del territorio indagato in aree omogenee, sia sulla base della risposta sismica dei terreni, sia per quanto concerne i possibili effetti locali indotti dallo scuotimento. Tali studi si pongono quindi come strumenti fondamentali per la prevenzione e la riduzione del rischio sismico, fornendo elementi capaci di indirizzare le scelte di pianificazione urbanistica verso zone a minore pericolosità, ed orientare gli interventi di mitigazione in aree a rischio instabilità, fornendo anche utili indicazioni preliminari per la progettazione. Secondo gli indirizzi regionali (D.G.R. n. 630/2019) gli studi di microzonazione sismica, necessari per la redazione e l’approvazione degli strumenti di pianificazione urbanistica comunale (L.R. n. 24/2017), devono interessare il territorio urbanizzato, le aree in cui siano considerati ammissibili trasformazioni edilizie od urbanistiche, gli agglomerati rurali di dimensioni significative e le fasce di territorio riguardanti le reti

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

infrastrutturali di nuova previsione, compresi i corridoi destinati al potenziamento ed alla razionalizzazione dei sistemi per la mobilità.

La prima fase dello studio è stata finalizzata alla definizione degli scenari di pericolosità sismica locale, cioè ad identificare le porzioni di territorio suscettibili di effetti locali. Nell'area di pianura alluvionale in cui si estende Ferrara, questi effetti riguardano sostanzialmente l'amplificazione del moto sismico, i fenomeni di liquefazione e densificazione dei terreni oltre ai cedimenti differenziali sismoindotti. Le aree soggette a potenziali effetti di sito sono state identificate analizzando l'ampia banca dati di indagini di sottosuolo, integrando le informazioni ottenute con le conoscenze derivanti dagli elaborati di cartografia geologica di superficie (Geotema, 2015) e dalle modellazioni ed interpolazioni geostatistiche tridimensionali dei corpi sedimentari sepolti (Minarelli, 2013).

La seconda fase dello studio ha invece riguardato la quantificazione dell'amplificazione sismica e degli indici di rischio connessi alle principali instabilità rilevate. La stima dell'amplificazione del moto sismico è stata ottenuta mediante approccio semplificato, basato sull'uso degli abachi proposti dalla normativa regionale in materia di microzonazione sismica (Allegato A2 - D.G.R. n. 630/2019). Verifiche di coerenza dei fattori di amplificazione ottenuti dagli abachi regionali sono state eseguite tramite analisi di risposta sismica locale. Per le valutazioni quantitative di suscettibilità a liquefazione sono state, invece, eseguite stime puntuali dell'indice di potenziale liquefazione (I_L) con procedure e metodi semplificati di letteratura applicati alle indagini penetrometriche CPTu.

I fattori di amplificazione e gli indici di rischio ottenuti hanno permesso di redigere nuovi elaborati cartografici per i diversi ambiti di studio, adeguando ed aggiornando pertanto gli studi di microzonazione sismica del Comune di Ferrara.

1.3 Elaborati prodotti

Gli elaborati di riferimento dello studio di microzonazione sismica, come indicato nella D.G.R. n. 630/2019, sono rappresentati dalle tavole cartografiche di sintesi e dagli archivi digitali contenenti i dati informatizzati ad esse associate. La relazione illustrativa rappresenta, invece, il documento tecnico che accompagna gli elaborati cartografici; essa illustra oltre agli aspetti d'inquadramento territoriale, geologico e normativo, i dati geologici e geofisici utilizzati per lo studio, i modelli e le metodologie di elaborazione impiegate, le principali criticità ed incertezze rilevate ed i risultati e gli elaborati cartografici prodotti.

Nel complesso il presente studio è quindi costituito da:

- 15 Tavole cartografiche – suddivise in 9 quadranti cadauna – descritte al capitolo 8;

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

- 10 Sezioni litostratigrafiche (Allegato 1);
- Archivi digitali dei dati informatizzati;
- Rapporti di prova delle indagini di nuova esecuzione (Allegato 2);
- Rapporti delle verifiche puntuali di suscettibilità a liquefazione (Allegato 3);
- Relazione illustrativa.

Tutti gli elaborati sono stati realizzati in conformità con quanto indicato nell'allegato A1 della D.G.R. n. 630/2019; tali specifiche rimandano sostanzialmente alle linee guida emanate dalla Commissione tecnica per la microzonazione sismica "Standard MS 4.1", che dettagliano ogni aspetto legato a tali studi.

2 Definizione della pericolosità di base e degli eventi di riferimento

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

- il CPTI15 - Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani versione 2015 (Rovida *et al.*, 2016; <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>), che raccoglie dati parametrici omogenei, sia macrosismici che strumentali, relativi ai terremoti con intensità massima ≥ 5 o magnitudo ≥ 4.0 d'interesse per l'Italia nella finestra temporale 1000-2017;
- il DBMI15 - Database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI15 (Locati *et al.*, 2016; <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>), che fornisce un set omogeneo di intensità macrosismiche provenienti da diverse fonti relativo ai terremoti con intensità massima ≥ 5 e d'interesse per l'Italia nella finestra temporale 1000-2017;
- il DISS versione 3.2.1 - Database delle Sorgenti Sismogenetiche Italiane (DISS Working Group, 2018; <http://diss.rm.ingv.it>), che contiene informazioni relative a sorgenti individuali e composite in grado di generare terremoti di magnitudo pari a 5.5 o superiore. Le sorgenti sono rappresentate in pianta in modo semplificato tramite segmenti o aree georeferenziate che indicano rispettivamente singole

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

faglie (sorgenti individuali) o regioni contenenti faglie (sorgenti composite). Per ognuna delle sorgenti il database contiene informazioni che consentono la ricostruzione tridimensionale della struttura sismogenetica;

- il Database ISIDe (ISIDe Working Group 2010; <http://iside.rm.ingv.it>), che contiene tutti gli eventi registrati dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale relative ai terremoti avvenuti dal 2003 ad oggi; tale portale, attualmente in fase di dismissione, sarà sostituito dal nuovo sito del Centro Nazionale Terremoti raggiungibile al seguente indirizzo: <http://cnt.rm.ingv.it/>;
- il Catalogo della Sismicità Italiana (Castello *et al.*, 2006; <http://csi.m.ingv.it/>), che contiene tutti gli eventi registrati dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale dal 1981 al 2002;
- il CFTI4Med - Catalogo dei Forti Terremoti in Italia ed in area mediterranea (Guidoboni *et al.*, 2007; <http://storing.ingv.it/cfti4med/>), che riporta, per numerose località, i risentimenti di circa 300 tra i più forti terremoti storici italiani, e fornisce informazioni sul contesto storico, sociale e demografico in cui gli eventi si sono prodotti. Nel catalogo sono anche presenti dati relativi ai parametri epicentrali, ad effetti locali sismoindotti (fagliazione superficiale, frane, maremoti, ecc.) e danni ai centri storici ed a beni monumentali;
- la Mappa di Pericolosità Sismica Nazionale (INGV, 2004; <http://esse1.mi.ingv.it/>), che definisce una “pericolosità di base” su un reticolo di punti di riferimento. Ai punti del reticolo sono attribuiti, per nove differenti periodi di ritorno del terremoto atteso, i valori di a_g (accelerazione orizzontale massima del suolo) e dei principali “parametri spettrali” riferiti all’accelerazione orizzontale, da utilizzare per il calcolo dell’azione sismica;
- la Zonazione Sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004; <http://zonesismiche.mi.ingv.it/documenti/App2.pdf>), che individua sul territorio italiano 42 macrozone-sorgente e che ha rappresentato il riferimento per i calcoli di pericolosità sismica di base a scala nazionale.

2.1 Sismicità storica

La ricostruzione della sismicità storica del territorio di Ferrara è stata effettuata basandosi innanzitutto sull’analisi del Database Macrosismico Italiano - DBMI15 (Locati *et al.*, 2016), il quale consente la consultazione online dei dati macrosismici di tutte quelle località a cui sono associate osservazioni di danno riferibili ad almeno 3 eventi sismici nella finestra temporale 1000-2017.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

In relazione al Comune di Ferrara il database contiene 140 record relativi ad eventi sismici storici; data l'ampia mole di dati presenti, è stato deciso di prendere in considerazione solamente quelli riportanti intensità macrosismiche IMCS ≥ 5 (Tabella 2-1 e Figura 2-1).

Per ciascun terremoto sono stati quindi riportati i valori di intensità macrosismica (IMCS) osservata nel territorio comunale in occasione degli eventi considerati, l'area epicentrale, il numero di Macroseismic Data Point (NMDP), l'intensità epicentrale (I_0) e la magnitudo momento (M_w) stimata mediante relazioni empiriche. I valori di intensità sono espressi in accordo con la scala Mercalli-Cancani-Sieberg (Sieberg, 1930), come riportato in Tabella 2-2.

IN OCCASIONE DEL TERREMOTO DEL:										EFFETTI
DATA						AREA EPICENTRALE	NMDP	I_0	M_w	IMCS FERRARA
Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se					
1117	01	03	15	15		Veronese	55	9	6.52	V-VI
1222	12	25	12	30		Bresciano-Veronese	18	7-8	5.68	VI
1234	03	20				Ferrara	1	7	5.10	VII
1285	12	13				Ferrara	2	7	5.10	VII
1304	10	23	00	45		Pianura emiliana	4			V
1339	11	16	14	10		Ferrara	1	6	4.63	VI
1365	03	04				Pianura veneta	4	5	4.63	V
1403	08	17	00	35		Ferrara	1	6	4.63	VI
1410	05	09	22	30		Ferrara	1	6-7	4.86	VI-VII
1411	01	09	02			Ferrara	1	7	5.10	VII
1425	08	10				Ferrarese	2	6	4.63	VII
1483	03	03	22			Ferrara	1	5-6	4.40	V-VI
1483	08	11	19	40		Romagna	14	8	5.69	V
1487	01	11	15	40		Ferrara	2	4	3.70	V
1504	12	31	04			Bolognese	15	6	5.02	V
1505	01	03	02			Bolognese	31	8	5.62	VI
1505	01	20	23	50		Bolognese	11	5-6	4.76	V
1508	10	26				Ferrarese	1	5	4.16	V
1511	03	26	15	30		Friuli-Slovenia	120	9	6.32	VI
1536	08	17	00	05		Appennino settentrionale	10	6-7	5.12	VI
1561	11	24	01	25		Ferrarese	3	5-6	4.40	VI-VII
1570	11	17	19	10		Ferrarese	58	7-8	5.44	VIII
1591	07	10				Romagna	6	6-7	5.13	V
1594	10	03				Ferrara	1	5	4.16	V

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

1624	03	19				Argenta	18	7-8	5.43	VI
1661	03	22	12	50		Appennino forlivese	79	9	6.05	V
1672	04	14	15	45		Riminese	92	8	5.59	V
1678	07	15				Ferrara	1	5	4.16	V
1688	04	11	12	20		Romagna	39	8-9	5.84	V
1695	02	25	05	30		Asolano	107	10	6.40	VI
1695	02	28				Ferrara	1	5-6	4.40	V-VI
1743	05	29				Ferrara	1	6-7	4.86	VI-VII
1781	07	17	09	40		Faentino	96	9-10	6.12	V
1787	07	16	10			Ferrara	3	5-6	4.40	VI-VII
1787	07	26	07	15		Ferrara	1	6-7	4.86	VI-VII
1796	10	22	04			Emilia orientale	27	7	5.45	VII
1832	03	13	03	30		Reggiano	97	7-8	5.51	V
1870	10	30	18	34		Forlivese	41	8	5.61	V
1875	03	17	23	51		Costa romagnola	144	8	5.74	V-VI
1909	01	13	00	45		Emilia-Romagna orientale	867	6-7	5.36	VI
1914	10	27	09	22		Lucchesia	660	7	5.63	V
1915	10	10	23	10		Reggiano	30	6	4.87	V
1920	09	07	05	55	4	Garfagnana	750	10	6.53	V
1983	11	09	16	29	5	Parmense	850	6-7	5.04	V

Tabella 2-1 - Valori di intensità macrosismica osservati nel Comune di Ferrara in occasione dei principali eventi, tratti dal database DBMI15 (Locati *et al.*, 2016).

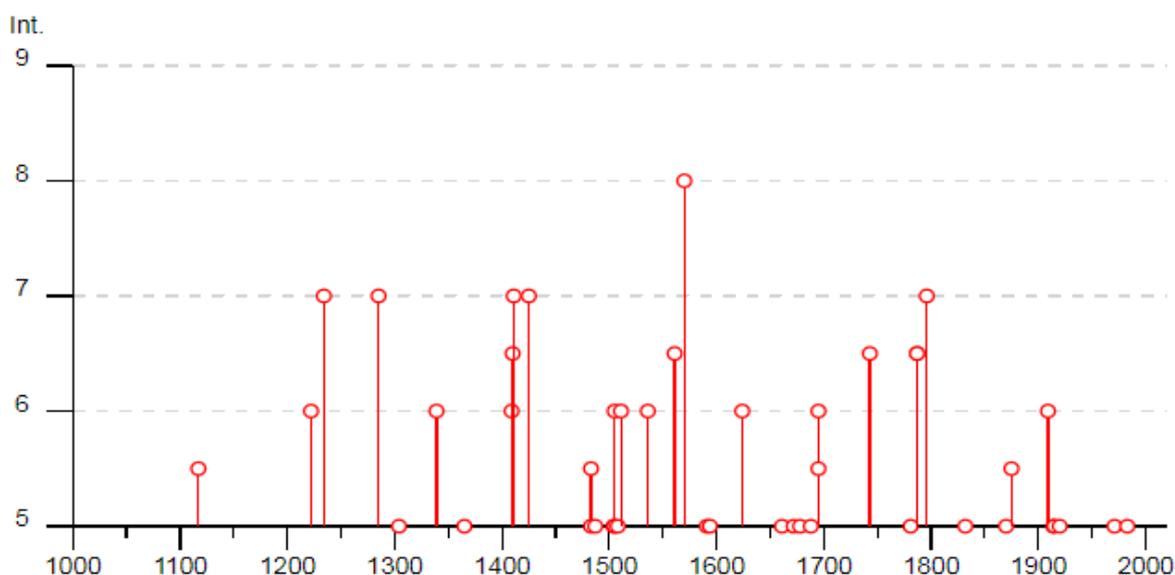


Figura 2-1 - Valori di intensità macrosismica $I_{MCS} \geq 5$ attribuite al Comune di Ferrara, dall'anno 1000 al 2017, tratte dal database DBMI15 (Locati *et al.*, 2016).

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

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

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

Come è possibile notare dai dati disponibili, fra i terremoti a maggiore intensità più recenti con epicentro nelle vicinanze dell'area di studio, quello a più elevata intensità è avvenuto il 17 novembre 1570, con intensità epicentrale pari al VIII grado e magnitudo equivalente pari a 5.46; in tale catalogo non sono invece riportati quelli che si sono verificati il 20 ed il 29 maggio 2012.

Del terremoto a più elevata intensità del 17 novembre 1570, si riporta di seguito un estratto dal catalogo CFTI4med dei commenti storico-critici e delle descrizioni degli effetti locali.

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

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

Numerosissime e frequenti furono le repliche ricordate e descritte, fino ai primi mesi del 1572, dalle fonti, tra le quali molteplici lettere degli ambasciatori presenti a Ferrara rintracciate negli archivi di Firenze, Urbino, Mantova, Torino. Qualche scossa fu avvertita anche nel 1573 e nel 1574.

Le fonti storiche riportano anche evidenze di effetti geologici di sito legati al sisma, come i fenomeni di *liquefazione del terreno nell'area urbana di Ferrara e nelle immediate vicinanze (in alcuni casi con emissione di fumi o con fuoriuscita di sabbie bollenti) e apertura di fessure con fuoriuscita di "una schiuma nera"*. Tra gli effetti viene anche riportato come *presso Stellata il Po subì un temporaneo arresto del flusso delle acque; il loro innalzamento e il successivo rapido abbassamento causarono danni ai mulini*.

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

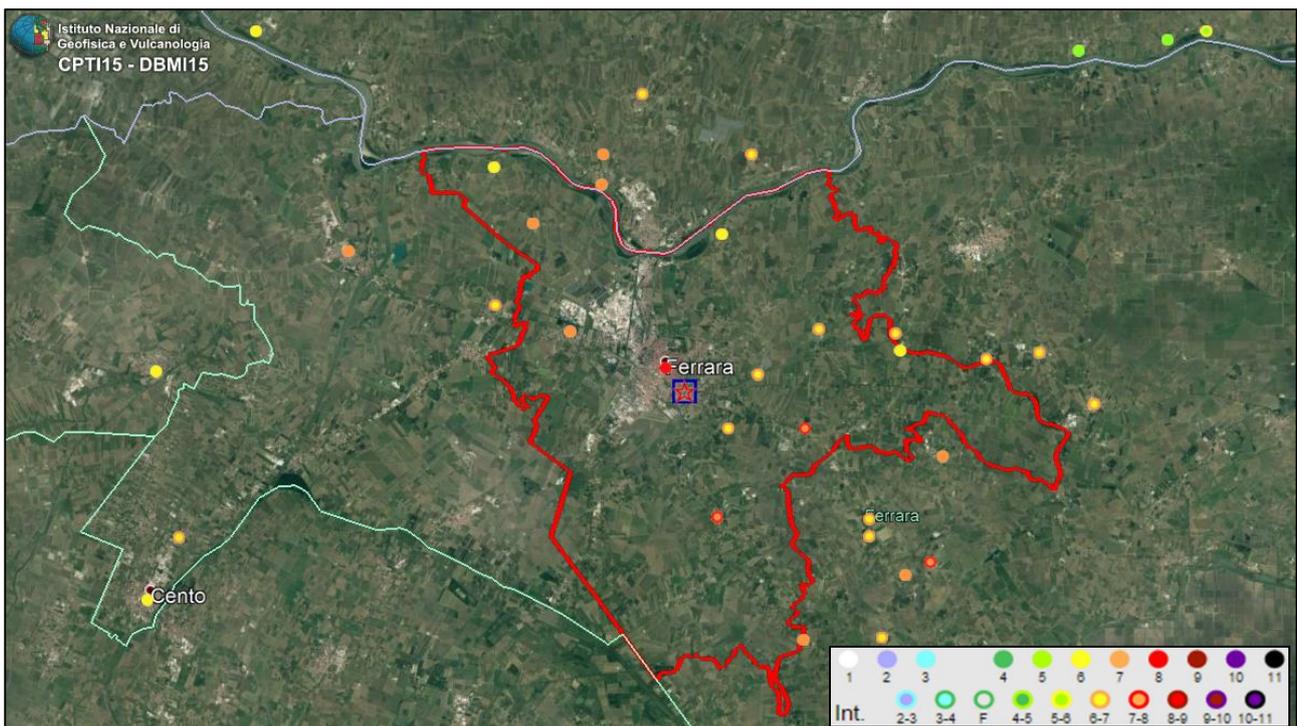


Figura 2-2 - Distribuzione degli effetti del sisma del 17 novembre 1570. Dati DBMI15. In rosso è rappresentato il territorio di Ferrara.

La Mappa di Pericolosità Sismica di riferimento (INGV, 2004) mostra, per l'area in esame, un'accelerazione massima attesa su suolo rigido compresa tra 0,175-0,075 g, con probabilità di superamento del 10% in 50 anni (Figura 2-3). Nel dettaglio, si attendono le accelerazioni massime più elevate nella parte sud-orientale del territorio comunale (0,150-0,175 g), per poi decrescere verso la parte nord-occidentale dello stesso (0,075-0,100 g).

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

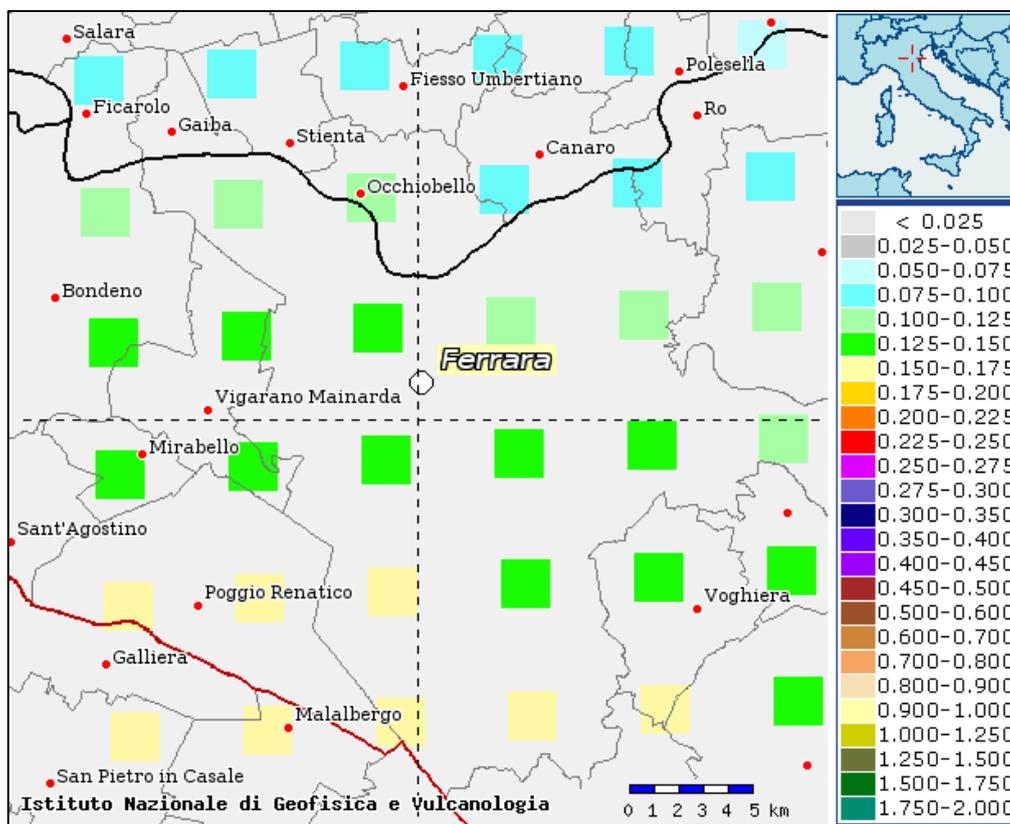


Figura 2-3 - Mappa di Pericolosità Sismica di riferimento nell'intorno dell'area di studio.

2.1.1 La sequenza del 2012

Tra il 20 maggio ed i primi di giugno 2012, un'importante sequenza sismica ha interessato una vasta area della bassa Pianura Padana, compresa tra le Province di Bologna, Modena, Reggio Emilia, Mantova e Ferrara. La sequenza sismica è stata generata da strutture fragili della parte frontale della catena appenninica sepolta, le cosiddette Pieghie Ferraresi (Pieri e Groppi, 1981), serie di pieghe e sovrascorrimenti a vergenza nord-orientale che coinvolgono sia la successione carbonatica Mesozoica, sia la copertura sedimentaria Terziario - Quaternaria; nelle parti profonde e meridionali analoghe strutture compressive coinvolgono anche il basamento metamorfico varisco. La sequenza è stata caratterizzata da due scosse principali; la prima, di magnitudo locale M_L 5.9, il 20 maggio, alle 4:03 ora locale, con epicentro tra Finale Emilia e San Felice sul Panaro ($44^{\circ}51'50''$ N, $11^{\circ}14'31''$ E, profondità 6,3 km - Figura 2-4), mentre la seconda, di M_L 5.8, è avvenuta il 29 maggio alle 9:00 ora locale, con epicentro tra Mirandola e Medolla, ($44^{\circ}50'00''$ N, $11^{\circ}03'37''$ E, profondità 13,5 km - Figura 2-4; Massa *et al.*, 2012).

Scosse successive hanno interessato un'area estesa per oltre 50 km, in direzione est - ovest; in particolare sono state registrate cinque repliche di $M_w \geq 5.0$, con epicentri tra Novi di Modena e Vigarano Mainarda

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

(Figura 2-4) ed oltre 3.700 scosse di $M_w \geq 1.5$ (Figura 2-4). Per l'area del Comune di Ferrara appare particolarmente rilevante la forte scossa del primo pomeriggio del 20 maggio, avvenuta alle ore 15:18 ora locale, con magnitudo di 5.1, nei pressi di Vigarano Mainarda, che, nelle porzioni sud-occidentali del territorio comunale, ha prodotto accelerazioni superiori agli altri eventi, con associati danni. Un altro sisma di magnitudo superiore a 4 è avvenuto, all'interno del territorio comunale, con epicentro poco a sud di Casaglia e parecchi altri eventi sismici minori si sono originati direttamente nel sottosuolo urbano.

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

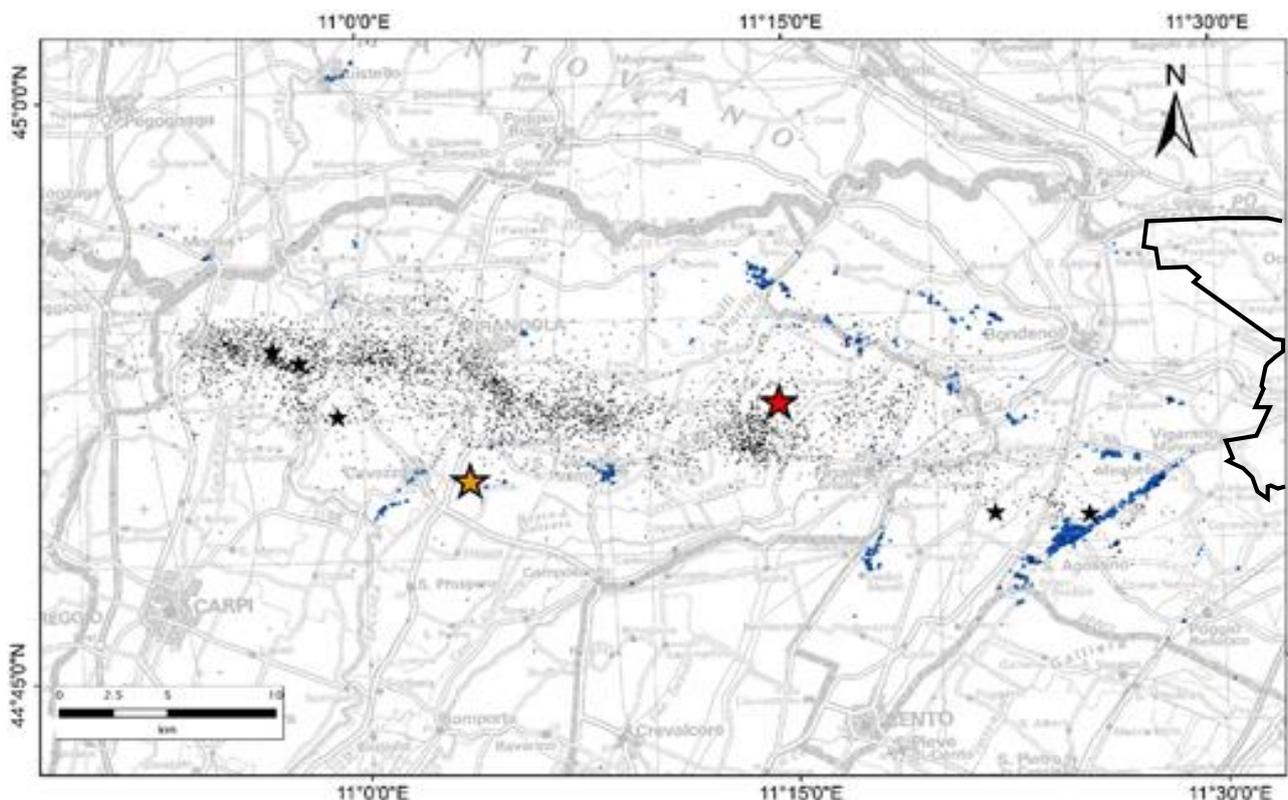


Figura 2-4 - Sequenza sismica emiliana del 2012. Le stelle rosse e arancio rappresentano rispettivamente le scosse principali del 20 e 29 maggio. Le stelle nere riportano la localizzazione degli *aftershocks* con $M_w \geq 5.0$, mentre i piccoli punti neri indicano gli eventi con $M_w \geq 1.5$. I piccoli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

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

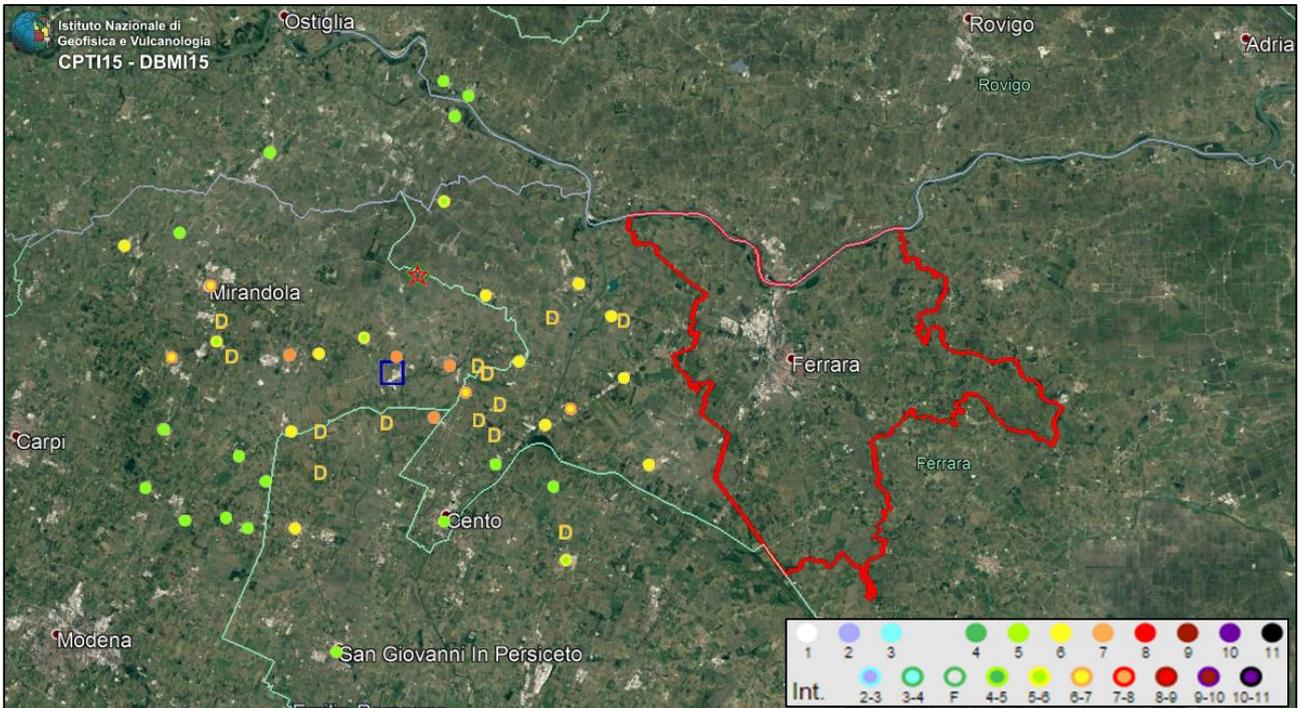


Figura 2-5 - Distribuzione degli effetti del sisma del 20 maggio 2012. Dati DBMI15. In rosso è rappresentato il territorio di Ferrara.

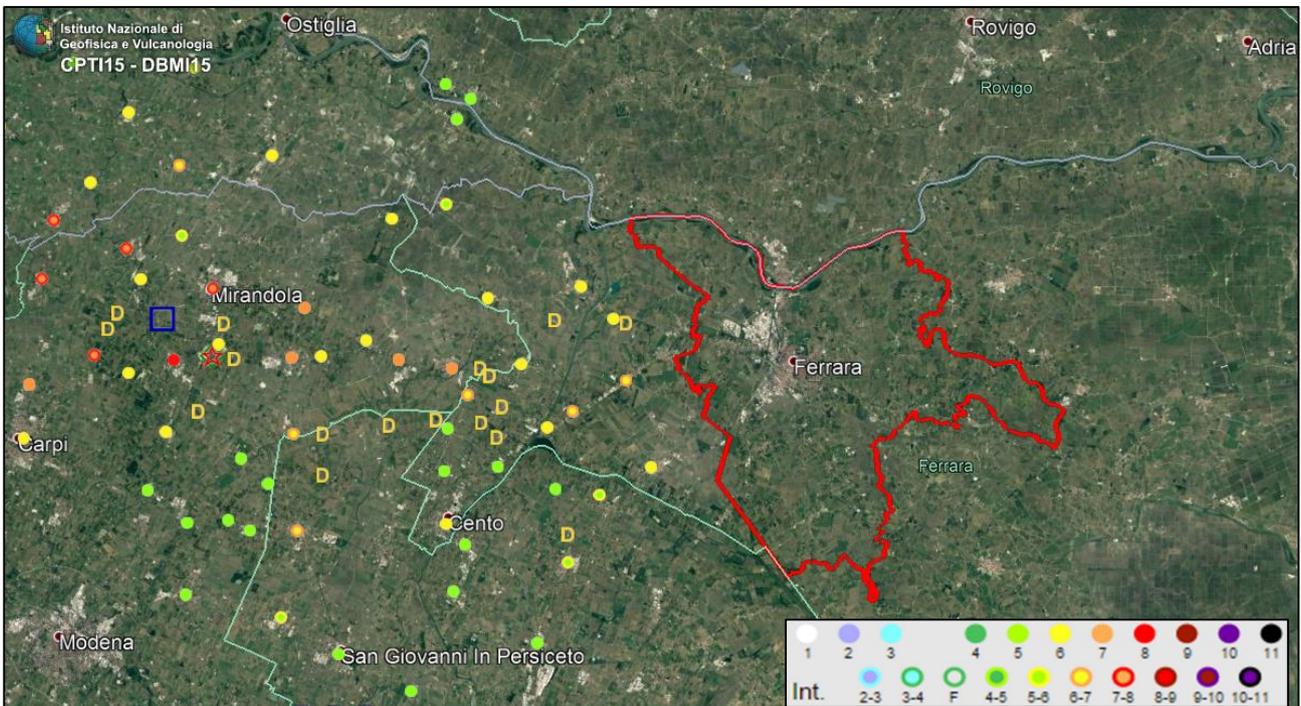


Figura 2-6 - Distribuzione degli effetti del sisma del 29 maggio 2012. Dati DBMI15. In rosso è rappresentato il territorio di Ferrara.

Le scosse del 20 e 29 maggio 2012 non hanno prodotto vittime o diffusi crolli all'interno del territorio comunale di Ferrara. Nonostante i rilievi macrosismici eseguiti immediatamente dopo le scosse (Galli *et al.*,

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

2012a e 2012b) abbiano determinato, nei comuni limitrofi, valori di intensità macrosismica pari al VI e VI-VII grado della scala MCS, le mappe di distribuzione degli effetti macrosismici non mostrano alcun valore riferito al territorio comunale (Figura 2-5 e Figura 2-6), benché siano stati in realtà numerosi i danni riscontrati. Questo è dimostrato anche dall'elevato numero degli edifici resi inagibili, dopo i sopralluoghi tecnici e la compilazione delle schede AEDES secondo le procedure della Protezione Civile, la mole di pratiche edilizie per la riparazione dei danni sismici. Molti edifici storici, in particolare religiosi, e sedi museali sono tuttora danneggiati ed inagibili.

Al momento non esiste però uno studio adeguato degli effetti degli eventi sismici sulle strutture architettoniche di Ferrara; appare quindi opportuno formulare alcune considerazioni qualitative e non esaustive sull'estensione dei danni, particolarmente diffusi e gravi nel centro storico e nella parte sud-occidentale del vasto territorio comunale, porzione più prossima alle aree epicentrali. Le informazioni sintetiche su danni e lavori post-sismici sono aggiornate al marzo 2020.

A causa dei valori di accelerazione sismica comunque contenuti, non si sono verificati significativi episodi di liquefazione delle sabbie sature, tranne che in corpi di sabbie di riempimento di canali di Po, sub-affioranti nell'area di Casaglia. Si sono inoltre verificati alcuni cedimenti spondali lungo canali, come in quello della Diamantina. Diffusi sono stati invece i danni alle strutture architettoniche con vari crolli, durante le prime scosse del 20 maggio, che non hanno fortunatamente prodotto vittime. I danni, anche strutturali, agli edifici, sono però stati diffusi, particolarmente nell'edificato storico. Nel Comune, 46 scuole sono state classificate con un livello di danno E, oggi in buona parte riparato.

Fra gli edifici civili di Ferrara, spiccano i danni al Castello Estense, in cui si è verificato il parziale crollo della lanterna della torre nord-orientale. Significative lesioni sono state riscontrate in tutte quattro gli attici – ricostruiti dopo i precedenti crolli cosismici del 1570 – e nelle lanterne delle quattro torri. Lesioni si sono osservate anche nelle sottostanti murature medievali, ove localmente riattivano pregresse lesioni attribuibili alle scosse sismiche del 1570. Danni, ora riparati, hanno interessato anche lo scalone elicoidale. Anche gli apparati pittorici dei Filippi nel Salone dei Giochi, dipinti su supporti lignei ed in canniccio – realizzati dopo i crolli causati dal suddetto terremoto cinquecentesco –, hanno riportato fratture e danni. Le scosse sismiche hanno danneggiato anche la Torre dell'Orologio nella Piazza centrale ed il Palazzo Schifanoia, con crolli in via Scandiana, che hanno danneggiato in modo non grave il portale quattrocentesco, e lesioni all'appoggio delle capriate lignee della copertura, che hanno richiesto lavori di restauro e la chiusura del relativo museo. Danni significativi ha riportato il Palazzo Massari – oggetto poi di estesi interventi di restauro e miglioria strutturale attualmente non terminati –, ed il palazzo dell'Archivio di

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

Stato in via Giovecca, il cui archivio principale risulta tuttora inagibile. Danni significativi sono stati registrati anche in numerosi edifici storici privati, come ad esempio nella Casa Arienti in XX Settembre, in cui si sono rese necessarie demolizioni e riduzioni volumetriche.

Il Palazzo del Paradiso, oggi sede della Biblioteca Ariostea, ha subito qualche danno, che ha comportato la rimozione della lanterna dalla torre tardo-rinascimentale. Danni minori sono stati riportati dal Palazzo dei Diamanti, dal Teatro Comunale, dal Palazzo Comunale, già Reggia Estense, e da molti altri edifici storici. Gli edifici storici dell'Università di Ferrara hanno subito diffusi danni, in buona parte ancora da riparare. In particolare, risultano inagibili le varie sedi di via Savonarola, fra cui il Palazzo detto di Renata di Francia ed i contigui edifici già sede dei dipartimenti umanistici. Danni più gravi ha riportato il vicino cinquecentesco Palazzo Contughi-Gulinelli. Il Palazzo Turchi-Di Bagno ha riportato alcuni danni alle parti alte e coperture, che hanno comportato la perdurante chiusura del Museo Geo-Paleontologico. Altri edifici universitari storici hanno riportato solo danni minori, grazie a precedenti interventi di miglioria della risposta sismica, come il caso del Dipartimento di Architettura. Danni sismici significativi si sono verificati anche in edifici universitari di recente costruzione, come quelli del polo scientifico-tecnologico, nel cui Blocco F si sono riscontrati visibili spostamenti e lesioni dei pannelli prefabbricati. Gli edifici religiosi storici hanno riportato danni particolarmente diffusi e gravi, anche strutturali, tanto che la maggior parte di essi è stata poi dichiarata inagibile. Danni significativi sono stati riportati dal complesso delle sinagoghe di via Mazzini, ancora in parte inagibile, come il caso della Scuola Fanese e dei locali del Museo Ebraico.

Particolarmente diffusi e significativi sono stati i danni registrati dalle chiese storiche, che risultano spesso ancora chiuse ed inagibili. La Cattedrale, attualmente chiusa, ha subito lesioni diffuse, in particolare nell'area presbiteriale sovrastante l'altare maggiore e nelle strutture della parte gotica del protiro e nei sovrastanti pinnacoli in facciata, che hanno richiesto lavori urgenti di messa in sicurezza. Danni strutturali preoccupanti sono stati riportati dagli edifici inagibili dell'Oratorio dell'Annunziata in via Borgo di Sotto, della chiesa di Santa Apollonia in via XX Settembre, della chiesa della Visitazione o Madonnina, di San Giuseppe e Santa Tecla. Danni significativi hanno riportato, fra le altre, le chiese ancora inagibili di San Paolo, ricostruita dopo il terremoto del 1570, di San Domenico, di San Carlo, delle Stimate di San Francesco, di Santa Maria della Consolazione, di Santa Agnese, di San Gregorio, di San Antonio Abate in via Saraceno. Fra gli edifici religiosi oggetti di interventi di restauro e ora riaperti al culto si segnalano, fra gli altri, San Francesco, che ha riportato in particolare danni alle pseudovolte ricostruite dopo i crolli del 1570, Santa Maria in Vado, San Antonio in Polesine, Santo Spirito, San Cristoforo alla Certosa, San Benedetto, del Gesù, di Santa Maria Nuova. Fra le chiese soppresse, si segnalano, fra gli altri, i danni a San Nicolò ed a

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

Santa Agnesina. Danneggiati ed inagibili sono anche molti locali annessi alle precedenti chiese, come ad esempio nei casi di San Domenico e Santa Maria in Vado. Fuori dal centro storico, fra gli altri edifici religiosi, hanno riportato danni significativi le chiese di Porotto e Madonna Boschi prossime all'area epicentrale della scossa pomeridiana del 20 maggio 2012.

Danni strutturali sono stati riscontrati in vari tratti delle fortificazioni che circondano il centro storico, come ad esempio un aggravamento delle lesioni al Bastione di San Antonio, sul lato meridionale della cinta. Anche edifici moderni non sono stati esenti da significativi danni sismici, come gli edifici novecenteschi di abitazione in Corso Piave o l'edificio a telaio in cemento armato dell'ex Genio Civile in viale Cavour. Danni si sono verificati in numerosi edifici industriali, spesso in cattivo stato di manutenzione, come il caso del crollo delle coperture del magazzino dell'ex magazzino dello zuccherificio nei pressi di via Maverna. Crolli si sono verificati anche in alcuni edifici agricoli nella porzione sud-occidentale del territorio comunale. Ai fini della sicurezza urbana appare particolarmente significativo il crollo non strutturale di elementi litici di coronamento di varie strutture storiche durante la prima scossa del 20 maggio, come la statua della Vergine Maria, crollata dal timpano della chiesa di Santa Maria in Vado, sfondando la pavimentazione in trachite, i "vasi" in calcare caduti in via Giovecca dal portale del Parco Pareschi. Quello precipitato dal Palazzo già del Monte di Pietà, poi Borsa in Corso Ercole d'Este. Numerosi i crolli di comignoli e parti di cornicioni, come ad esempio in via Voltapaletto ed in Corso Biagio Rossetti, da Palazzo Massari, in via Scandiana dal Palazzo Schifanoia. A seguito di questi eventi, sono stati rimossi vari elementi di fastigio, come dalla Prospettiva di via Giovecca, dalla facciata della chiesa di San Girolamo e da quella di San Paolo.

2.2 Sorgenti sismogenetiche

Il *Database of Individual Seismogenic Sources* (DISS Working Group, 2018) mostra come il territorio comunale di Ferrara sia interessato dalla presenza di due sorgenti sismogenetiche composite, ITCS050 nella parte settentrionale ed ITCS102 in quella meridionale (Figura 2-7).

La prima struttura, denominata Poggio Rusco-Migliarino, delimita il settore più esterno delle Pieghie Ferraresi e si estende con orientazione ovest - nord-ovest – est - sud-est; essa comprende la sorgente individuale di Ferrara (ITIS090), caratterizzata da magnitudo momento massima Mw_{max} pari a 5.5, profondità tra 1 e 8 km e slip-rate compreso tra 0,39 e 0,45 mm/anno. L'esistenza di tale sorgente è avvalorata sia da dati di sottosuolo (Pieri e Groppi, 1981; Boccaletti e Martelli, 2004; Burrato *et al.*, 2003; 2012), sia da attività tettonica "relativamente recente", alla quale si riconduce il terremoto di Ferrara del 17 novembre 1570; l'ubicazione della stessa è stata proposta in base ad anomalie del reticolo idrografico,

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

in particolare alla deviazione dell'alveo del fiume Po in prossimità di Stellata, interpretata come possibile conseguenza della deformazione indotta dall'attività tettonica della struttura sepolta.

La seconda struttura invece, denominata Malalbergo-Ravenna ed anch'essa orientata ovest - nord-ovest – est - sud-est, comprende la sorgente individuale di Argenta (ITIS141) ed è caratterizzata da magnitudo momento massima $M_{w_{max}}$ pari a 6, profondità tra 2 e 8 km e slip-rate compreso tra 0,49 e 0,55 mm/anno.

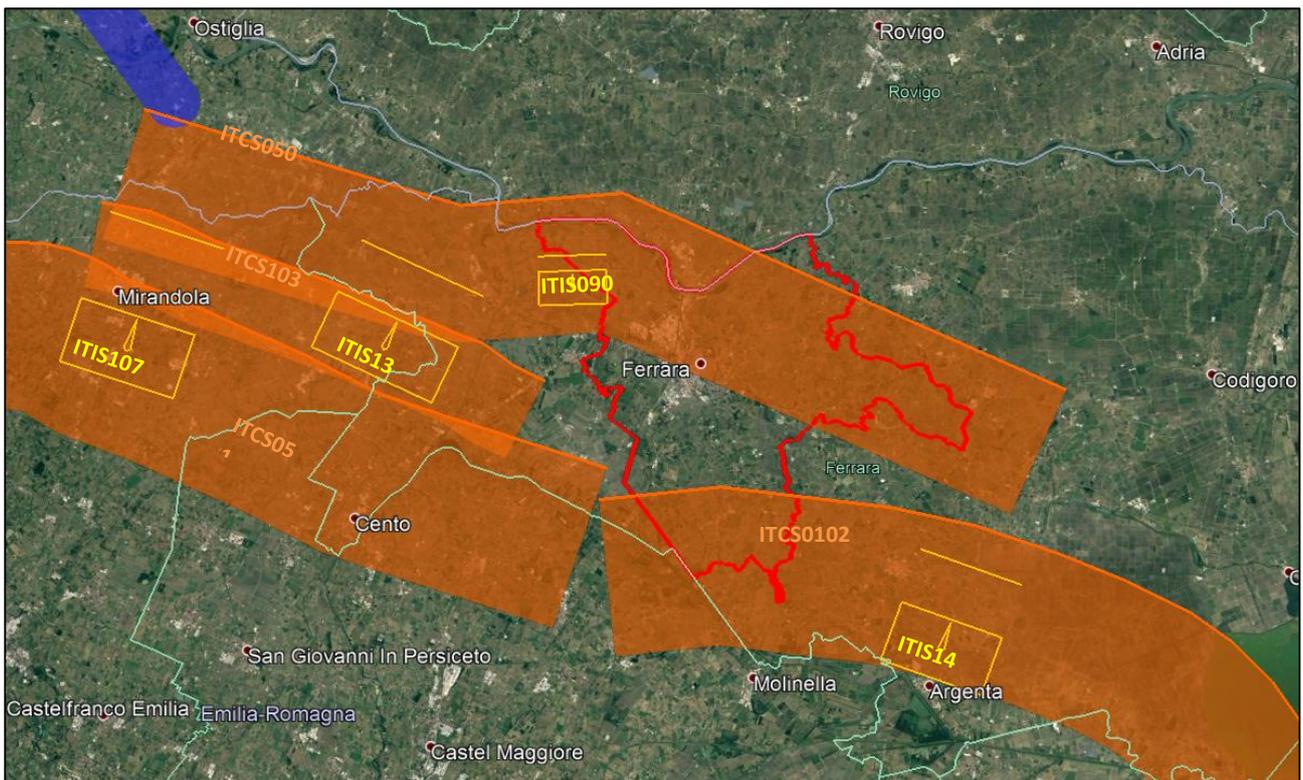


Figura 2-7 - Sorgenti sismogenetiche composite (poligoni arancioni) ed individuali (rettangoli gialli) presenti nel database DISS 3.2.1, nell'intorno dell'area di studio. In rosso è rappresentato il territorio di Ferrara.

L'area di studio è inoltre bordata ad ovest da altre due sorgenti sismogenetiche composite anch'esse approssimativamente orientate ovest - nord-ovest – est - sud-est e denominate Finale Emilia-Mirabello (ITCS103) e Carpi-Poggio Renatico (ITCS051).

La prima di queste si estende verso occidente in direzione di Mirandola e comprende la sorgente individuale di Finale Emilia (ITIS134); essa è caratterizzata da magnitudo momento massima $M_{w_{max}}$ pari a 6.1, profondità tra 3.5 e 10 km e slip-rate compreso tra 0,25 e 0,5 mm/anno. La seconda struttura comprende invece la sorgente individuale di Mirandola (ITIS107) ed è caratterizzata da magnitudo momento massima $M_{w_{max}}$ pari a 6, profondità tra 2 e 10 km e slip-rate compreso tra 0,5 e 1,04 mm/anno.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

I caratteri strutturali e sismogenetici di queste strutture fragili sepolte, i cui singoli lineamenti tettonici mostrano scarsa estensione areale, determinano – in caso di sisma – la liberazione di un quantitativo di energia normalmente moderato, in grado comunque di determinare effetti significativi in superficie, data la ridotta profondità delle strutture e gli importanti fattori di focalizzazione ed amplificazione sismica. Nonostante siano tra le meglio documentate tra quelle presenti nel sottosuolo della pianura, per le strutture sismogenetiche appartenenti all’Arco Ferrarese permangono interrogati relativi ai tempi di ritorno degli eventi associati alle sorgenti individuali ed alla magnitudo massima attesa per l’area sottesa alla sorgente composita.

Secondo la Zonazione sismogenetica del Territorio Italiano - ZS9, prodotta dall’Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia INGV nel 2004 (Meletti e Valensise, 2004), che rappresenta il riferimento per le valutazioni di pericolosità sismica nel territorio nazionale, il territorio di Ferrara ricade dentro alla Zona 912 “Dorsale Ferrarese”, caratterizzata da un valore di $M_{w_{max}}$ pari a 6.14 (Figura 2-8).

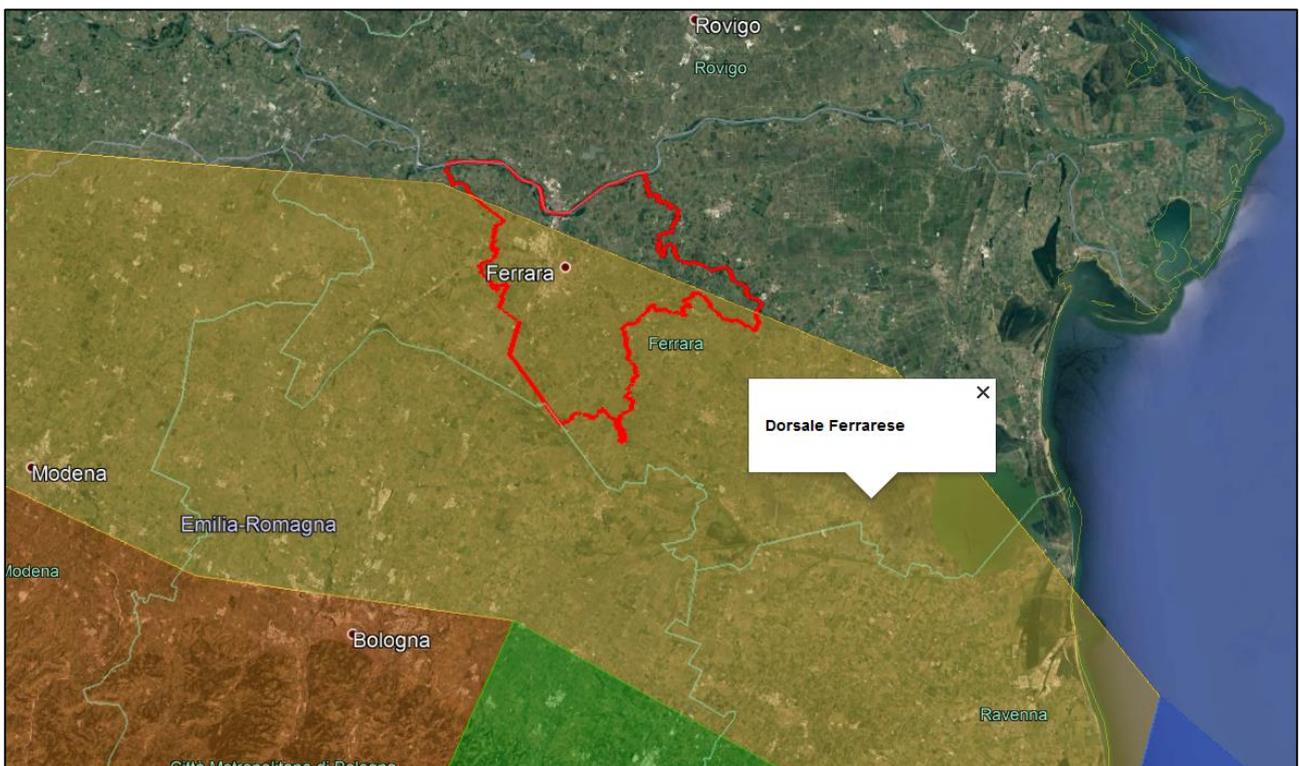


Figura 2-8 - Ubicazione del territorio comunale di Ferrara (in rosso) rispetto alla Zonazione Sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004).

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

3 Assetto geologico e geomorfologico dell'area

Nei paragrafi seguenti sono delineati i caratteri geografici, geologico-geomorfologici e tettonici dell'area con particolare riguardo alla successione sedimentaria che costituisce il sottosuolo del Comune di Ferrara.

3.1 Contesto geografico e geomorfologico

Situato nella parte nord-orientale della Regione Emilia-Romagna, il territorio del Comune di Ferrara si estende nella bassa pianura alluvionale del Po e ricade all'interno dei Fogli 185 "Ferrara", 186 "Copparo", 203 "Poggio Renatico" e 204 "Portomaggiore", prodotti dall'Istituto Geografico Militare in scala 1:50.000 (Figura 3-1).



Figura 3-1 - Inquadramento geografico dell'area di studio su ortofoto AGEA 2011. In giallo il confine comunale, in arancio le principali arterie stradali ed in nero le linee ferroviarie. Sono riportati anche i quadranti topografici al 50.000 con i rispettivi codici.

Limitato a nord dal fiume Po, il territorio confina a sud con Baricella ed Argenta, ad occidente con Poggio Renatico, Vigarano Mainarda e Bondeno, mentre ad oriente con i comuni di Voghiera, Masi Torello,

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

Ostellato, Tresignana, Copparo e Riva del Po. La città di Ferrara sorge sulle sponde del Po di Volano, che separa la città medioevale dal primitivo borgo di San Giorgio e segna il confine con i nuovi insediamenti a sud delle mura. Il nucleo storico della città nasce, infatti, lungo l'antico tracciato altomedioevale del Po di Ferrara, oggi ridotto a canale di bonifica e di scolo, e fin dalle origini si lega alla storia evolutiva del fiume Po e dei propri rami deltizi.

Dal punto di vista geomorfologico, la Carta Geomorfologica della Pianura Padana alla scala 1:250.000 (Castiglioni *et al.*, 1998) risulta ancora essere uno strumento fondamentale per la comprensione di tutte le pianure dell'Italia settentrionale. La rappresentazione del territorio ferrarese, curata da Marco Bondesan, appare molto convincente nonostante la necessità di una forte sintesi dovuta alla scala utilizzata e di una rappresentazione grafica non sempre intuitiva. In questa carta sono rappresentati tutti i corpi di paleoalveo principali affioranti, le depressioni interalvee, le zone di colmata artificiale, i ventagli da rotta, ecc. (Figura 3-2).

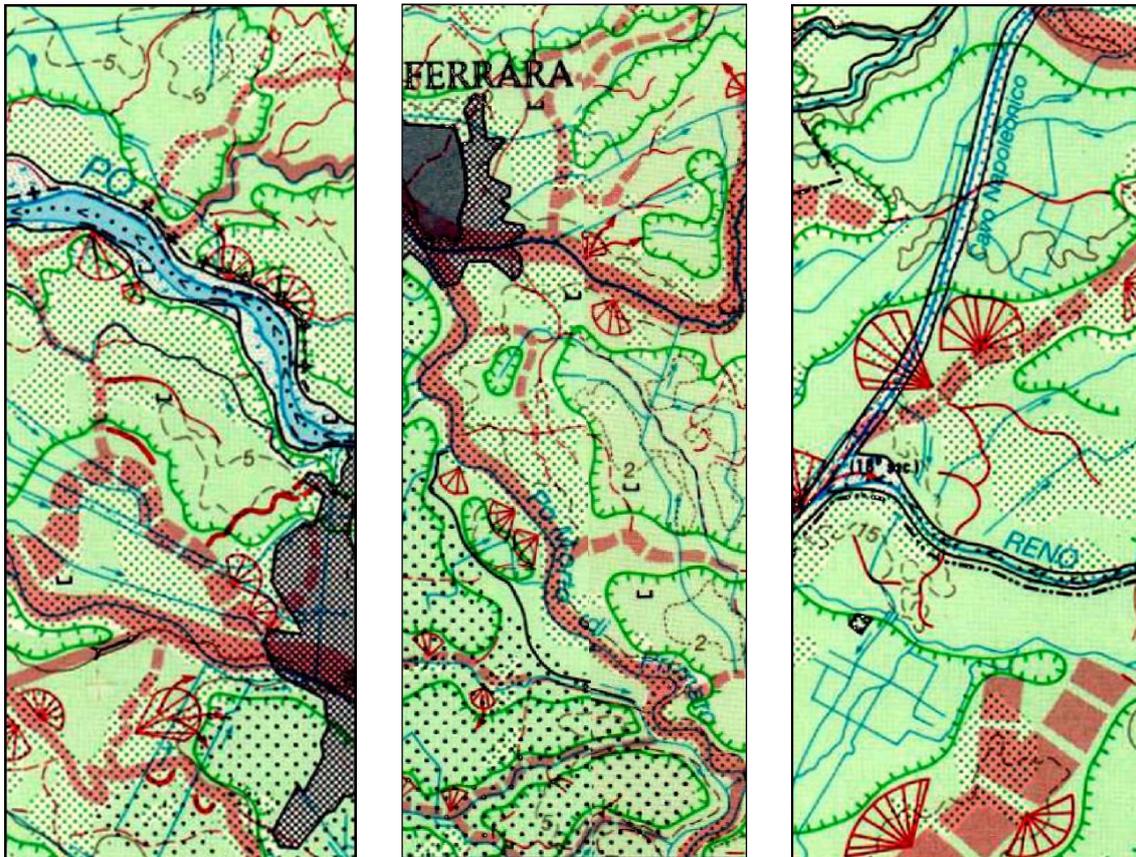


Figura 3-2 - Stralci della Carta Geomorfologica della Pianura Padana alla scala 1:250.000, rappresentanti aree ad ovest, sud-est e sud della città, in cui sono ben visibili dossi di paleoalveo di Po e di Reno (Castiglioni G.B. Ed. 1999).

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

La morfologia del territorio risulta quindi caratterizzata da un articolato microrilievo, costituito da dossi fluviali ed estesi corpi di argine naturale che sfumano in depressioni interalvee; tali caratteristiche risultano estremamente evidenti grazie alle tecniche di telerilevamento laser (LIDAR), che permettono una ricostruzione altimetrica di elevato dettaglio.

Nel dettaglio, il territorio di Ferrara può essere suddiviso in tre grandi settori con caratteristiche distinte nette: pianura a meandri del fiume Po – in gran parte di età pre-romana –, bassa pianura alluvionale e deltizia del Po – accumulatasi in età pre-romana, romana e medievale –, pianura alluvionale di fiumi appenninici, di età moderna.

3.1.1 Pianura a meandri del fiume Po

L'area mostra caratteri assai peculiari, dato che le ampie fasce di alvei a meandro che la caratterizzano non presentano le morfologie dossive allungate tanto diffuse e caratteristiche della bassa pianura fluviale circostante e della piana deltizia, ma al contrario mostrano morfologie arcuate e poco accentuate. Prima delle arginature artificiali di età storica, in questa area non si svilupparono fiumi pensili veri e propri, anzi, alvei più recenti presentano relazione di intersezione erosiva "a livello", tanto che alvei di diversa età si ritrovano alla stessa quota, se non addirittura debolmente incassati e terrazzati. Subito ad occidente del territorio comunale, infatti, i depositi meandrici recenti del Panaro risultano topograficamente più bassi di quelli del Po medievale ed antico. L'alveo romano e medievale del Po di Ferrara, posto al limite meridionale di tale settore, presenta invece una netta sopraelevazione morfologica, in buona parte legata alle massicce arginature artificiali di età storica. Totalmente arginato appare anche l'attuale corso del Po, che però, fra Ficarolo e Pontelagoscuro, presenta una pensilità sulla piana circostante assai ridotta o addirittura assente e comunque di origine assai recente.

Le uniche vere aree morfologicamente depresse corrispondono alla Diamantina, situata appena ad occidente del limite comunale, ed alla zona circostante l'area di servizio "Po", lungo l'Autostrada A13 Bologna-Padova.

Tali caratteristiche morfologiche risultano estremamente evidenti grazie alle tecniche di telerilevamento laser (LIDAR), che permettono una ricostruzione di elevato dettaglio dell'altimetria al suolo (Figura 3-3).

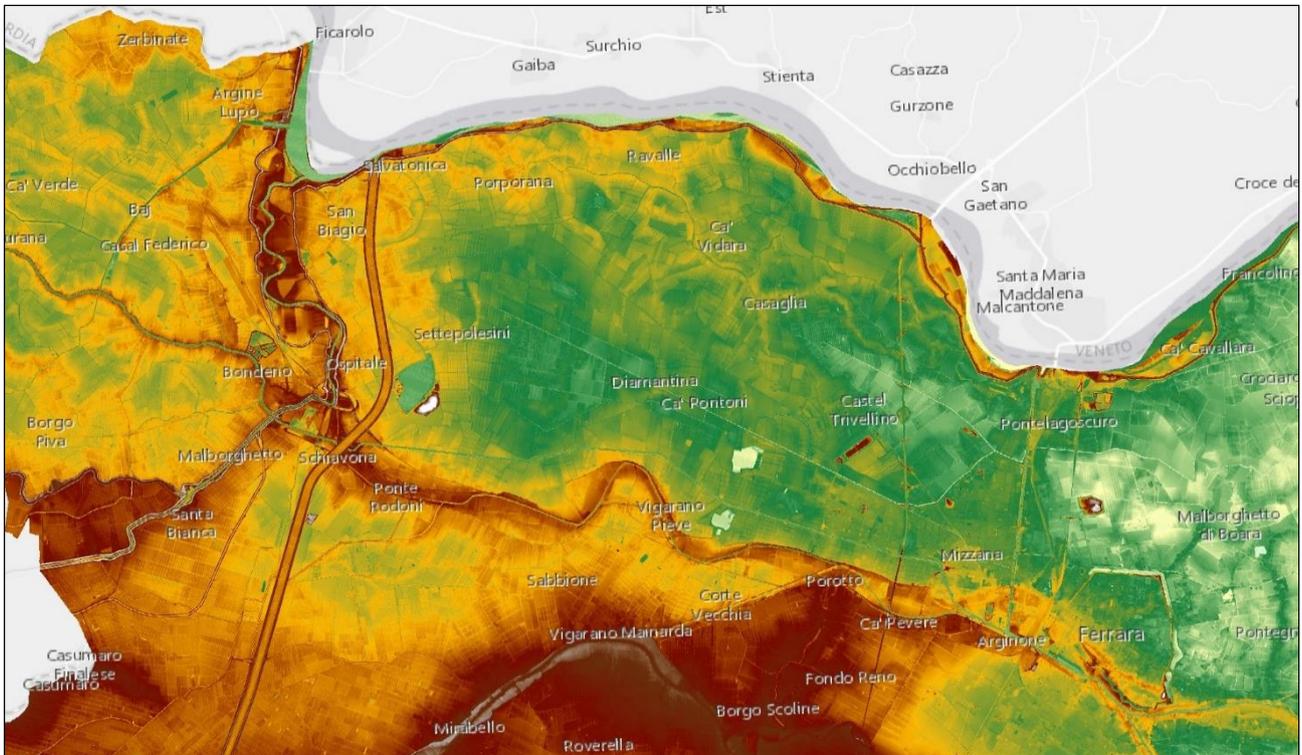
APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

Figura 3-3 - Pianura a meandri a nord-ovest della città di Ferrara. I corpi di alveo meandriforme non generano dossi pensili e presentano quindi una ridotta espressione morfologica. Forme planimetriche curvilinee, legate a meandri preistorici del Po, sono ben visibili fra Casaglia e Vigarano Pieve e nei pressi di Salvatonica, subito ad occidente del confine comunale.

3.1.2 Bassa pianura alluvionale e deltizia del fiume Po

A valle di Pontelagoscuro e Cassana l'area di studio mostra i classici caratteri distintivi della bassa pianura alluvionale. I corpi di paleoalveo, formati negli ultimi 2000 anni, costituiscono pronunciati dossi allungati, decisamente sopraelevati sulle ampie depressioni interalvee circostanti, che corrispondono a forme morfologiche chiuse, in buona parte sede di ristagno di acque fino a prima delle bonifiche idrauliche dell'epoca industriali. Nella parte sud-orientale del Comune, a sud di Cona e nella zona dei Prati di Palmirano, queste depressioni si trovano attualmente anche al di sotto del livello del mare. I corpi fluviali più antichi sono progressivamente livellati e sepolti da sedimenti successivi, soprattutto di piana interalvea, tanto da perdere progressivamente la propria espressione morfologica, fino a scomparire nel sottosuolo. Ben evidente, appena ad est del nucleo cittadino, appare l'apertura del delta padano con la separazione dei due maggiori canali distributori del Primaro, a sud, e del Volano, a nord.

Questi canali, il cui sviluppo avvenne in epoca altomedievale, rappresentano ancora oggi gli elementi morfologici più rilevanti di questo settore orientale del Comune di Ferrara. Anche se meno rilevato risulta ancora ben visibile l'alveo dell'Eridano di ordine pre-romana.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

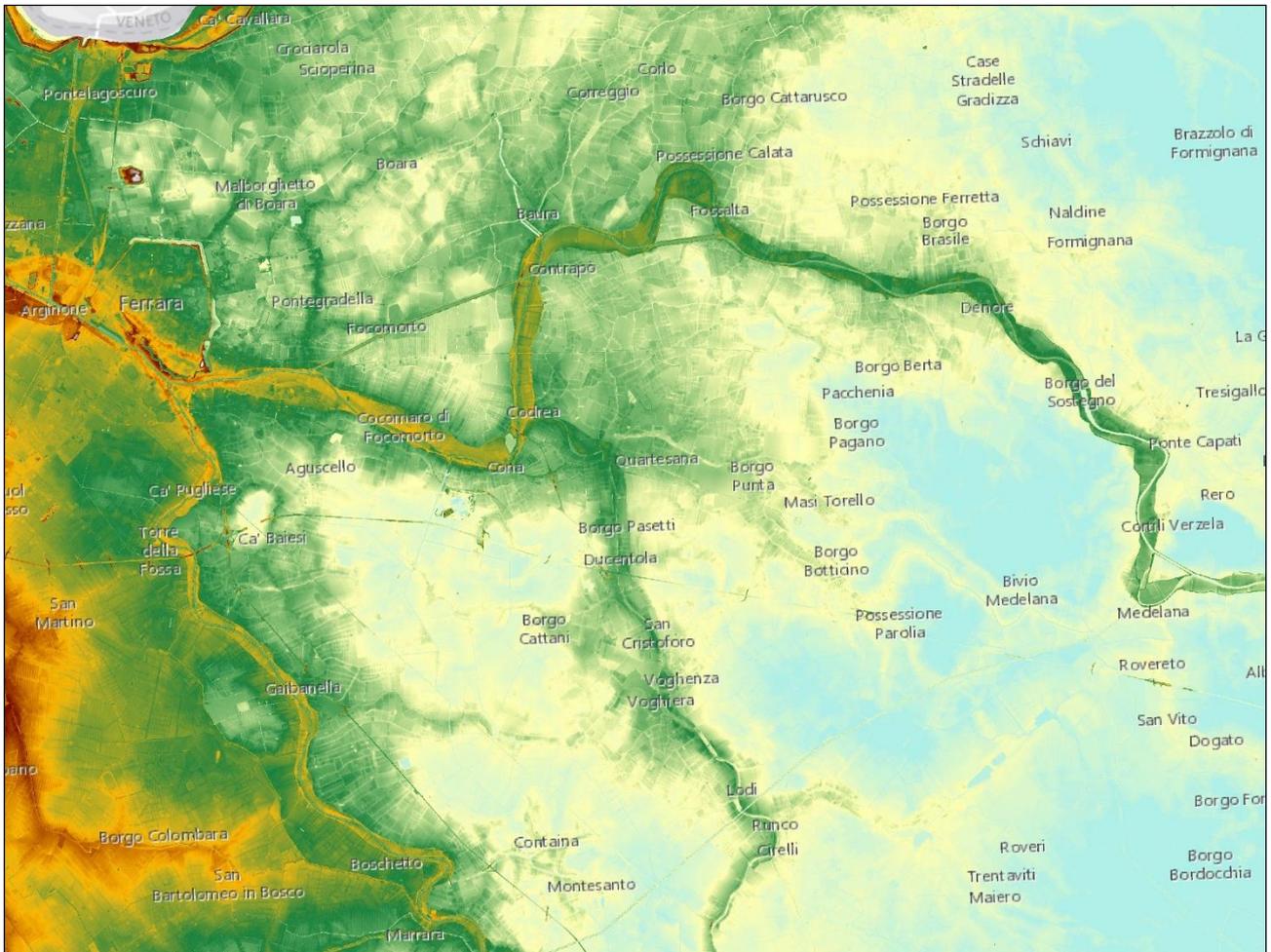


Figura 3-4 - Bassa pianura alluvionale e deltizia, ad oriente di Ferrara, dominata dai dossi allungati dei paleoalvei del Po, fortemente pensili sulle circostanti depressioni interalvee. Ben visibile il paleoalveo del Po di Volano, che scorre da Ferrara verso Medelana; da esso si stacca verso sud il dosso del Po di Primaro che serpeggia in direzione di Marrara.

3.1.3 Pianura alluvionale dei fiumi appenninici

A meridione dell'alveo del Po di Ferrara, si sviluppa la grande piana costituita interamente da depositi di fiumi appenninici di epoca molto recente, formatasi in gran parte nel XVII secolo.

L'area è caratterizzata dai dossi formati dal riempimento degli alvei del Reno e dei fiumi appenninici minori, e dagli estesi corpi di argine naturale che sfumato in depressioni interalvee, particolarmente sviluppate a sud di Coronella. Data la larghezza delle strutture dossive, le pendenze sono minori di quelle che contraddistinguono gli argini naturali del Po.

Questo settore sud-occidentale è costituito dai terreni topograficamente più rilevati di tutto il territorio comunale, dove le quote più elevate si raggiungono lungo il dosso del vecchio Reno in località Borgo Scoline.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

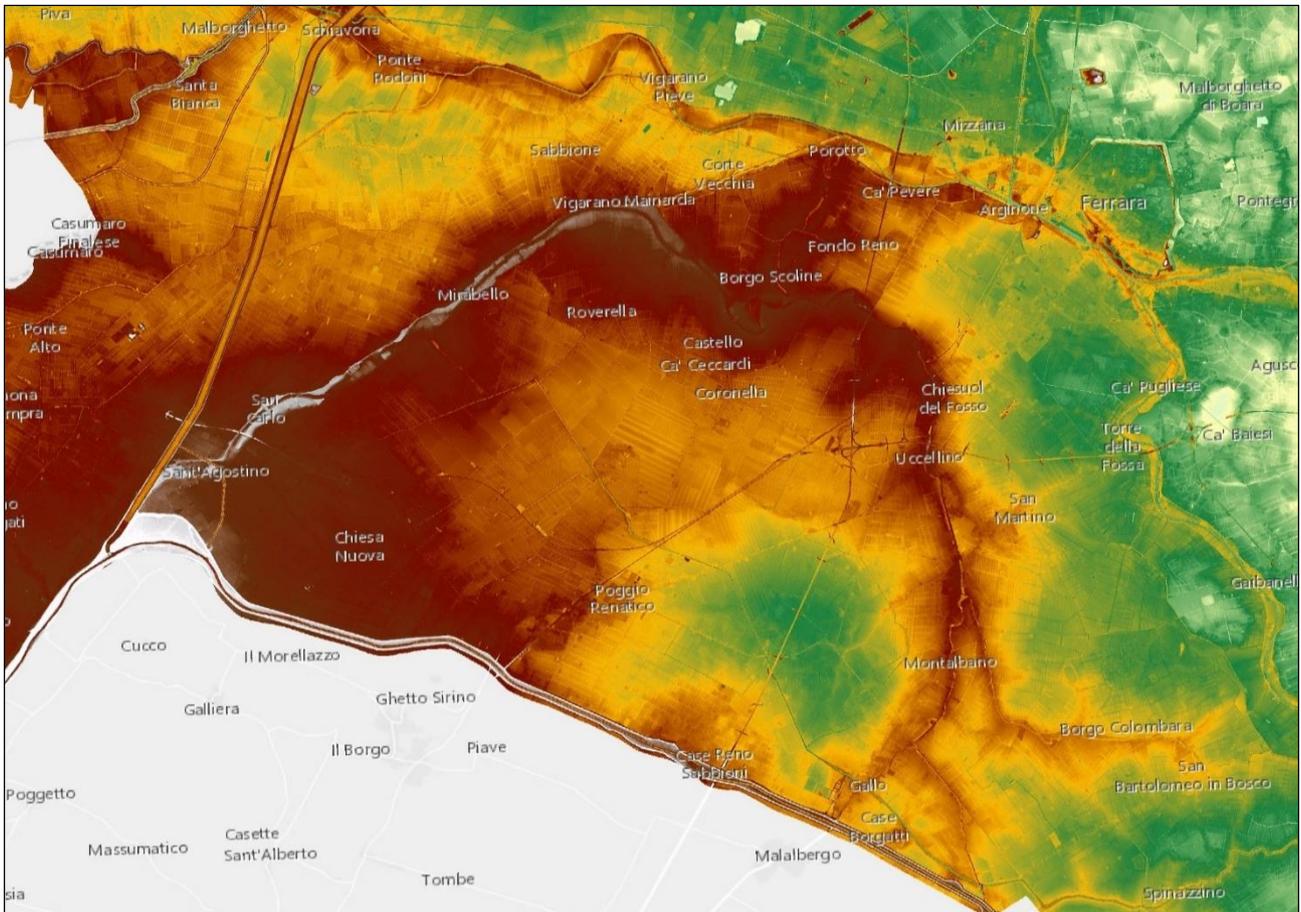


Figura 3-5 - Pianura formata dal Reno in età moderna, in gran parte durante il XVII secolo. Molto ben visibile il dosso del Reno, che da Sant'Agostino si allunga verso Vigarano Mainarda, per poi rigirarsi verso sud est ed aprirsi nei due rami del Gallo e della Cervella, a sud di San Martino.

3.2 Contesto geologico

L'unico prodotto ufficiale della Carta Geologica d'Italia realizzata dal Servizio Geologico Nazionale di Roma, che interessi tutto il territorio comunale, è il Foglio 76 "Ferrara" in scala 1:100.000, rilevato con i criteri del tempo da Bruno Accordi fra il 1952 ed il 1953 e pubblicato nel 1955 (Figura 3-6). Con criteri analoghi, furono cartografate alla stessa scala le aree di pianura dei contigui Foglio 87 "Bologna", Foglio 75 "Mirandola", Foglio 64 "Rovigo", Foglio 77 "Comacchio" e Foglio 88 "Imola".

In tali fogli geologici sono state riportate indicazioni sommarie sulle litologie di superficie, descritte sulla base della prevalenza percentuale di sabbie o argille e della frazione organica, ed indicazioni sulla stratigrafia e le strutture tettoniche profonde, derivate dalle indagini geofisiche e da perforazioni esplorative per la ricerca di idrocarburi; non sono state invece riportate indicazioni sulla distribuzione dei corpi di paleoalveo o su evidenze geomorfologiche.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL
COMUNE DI FERRARA



Figura 3-6 - Riproduzione della parte centrale del Foglio 76 "Ferrara" in scala 1:100.000 della Carta Geologica d'Italia, realizzata nel 1955 a cura del Servizio Geologico Nazionale.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

I prodotti cartografici più recenti sono rappresentati dai fogli della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 nell'ambito del progetto Nazionale di Cartografia Geologica (CARG); tale progetto ha però interessato solo una porzione meridionale minoritaria del territorio comunale, ricadente nei pressi del bordo settentrionale dei fogli 203 "Poggio Renatico" e 204 "Portomaggiore", pubblicati entrambi nel 2009. Con il progetto CARG sono stati infatti rilevati tutti i fogli delle varie aree di pianura della Regione Emilia-Romagna, ad eccezione dei soli fogli 183 "Suzzara", 184 "Mirandola", 185 "Ferrara" e 186 "Copparo", sviluppati a cavallo del Po e comprendenti aree pertinenti alla Regione Lombardia ed alla Regione Veneto. La sovrapposizione di competenze amministrative diverse ha probabilmente ritardato la realizzazione di questi fogli, lasciando ad oggi le aree epicentrali dei terremoti del 2012 prive di una moderna cartografia geologica. Il Foglio 187 "Codigoro" è invece stato rilevato nei primi anni 2000, perché la Regione Emilia-Romagna ha finanziato anche le indagini nelle aree di pertinenza veneta.

Pertanto, prima degli eventi sismici del 2012, le conoscenze geologiche dell'area di studio erano quindi limitate alla parte meridionale del territorio comunale.

È con i primi studi, realizzati durante l'emergenza sismica del 2012 nelle aree adiacenti al Comune di Ferrara, che sono state gettate le basi per i successivi approfondimenti, delineando in maniera generale i principali caratteri geologico-evolutivi dell'area. La carta geologica di superficie in scala 1:100.000, allegata allo studio di microzonazione sismica dell'Ordinanza 70/2012 già indicava come i depositi affioranti fossero costituiti da sabbie di canale, argine e rotta fluviale, giustapposte ad argille e limi organici di palude interalvea.

Secondo i criteri stratigrafici adottati dalla cartografia nazionale del Progetto CARG, la quasi totalità dei sedimenti affioranti nel territorio comunale sono riferibili all'Unità di Modena (AES_{8a}), di età post-romana. Questa unità costituisce la porzione sommitale del Subsistema di Ravenna (AES₈), inquadrato a sua volta nella parte terminale del Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES) (cfr. Note Illustrative Foglio CARG 203 "Poggio Renatico").

La conoscenza dei corpi geologici affioranti nel territorio comunale è stata ulteriormente migliorata ed inquadrata nel contesto geologico della Provincia di Ferrara, grazie alla realizzazione dei prodotti di cartografia geologia comunale e provinciale, curati da Geotema S.r.l. tra il 2015 ed il 2016.

Le cartografie sono basate sull'analisi di immagini satellitari, modelli altimetrici ed informazioni derivanti da cartografia storica, integrate da rilevamenti di terreno e confronti con indagini geognostiche sul sottosuolo prossimo alla superficie.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

3.2.1 Pianura a meandri del fiume Po

Questi depositi formano la parte nord-occidentale del territorio comunale, ove affiorano ampi corpi di sabbie a meandro o di paleoalveo fortemente sinuoso, alternati a depositi più fini di interalveo. Affiorano qui i sedimenti più antichi di tutto il territorio comunale, ascritti al Subsistema di Ravenna (AES8). La presenza di queste strutture meandriiformi è in parte legata al rimaneggiamento di precedenti sabbie singlaciali (AES7); ciò ha permesso lo svilupparsi, anche in questa fascia di bassa pianura, di morfologie simili a quelle di aree poste molto più a monte lungo il corso del Po, come ad esempio fra Piacenza e Sabbioneta.

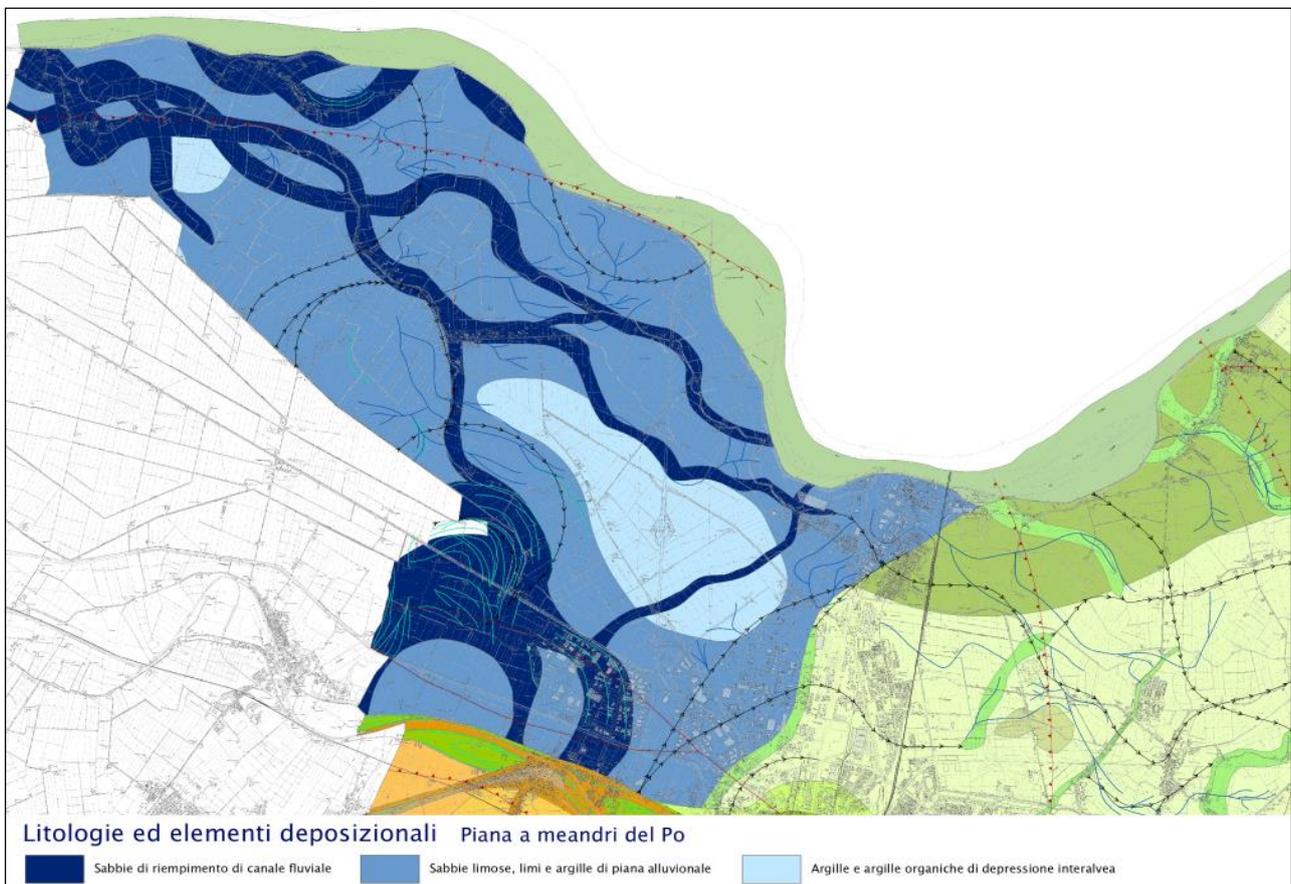


Figura 3-7 - Stralcio della Carta Geologica del Comune di Ferrara (2015), rappresentante la parte nord-occidentale del territorio comunale, dominata dalle sabbie di riempimento di canali a meandro del Po.

3.2.2 Bassa pianura alluvionale e deltizia del fiume Po

Costituisce un'ampia porzione del territorio comunale, ad est del Canale Boicelli ed a nord-est del Canale di Primario. A scala regionale, si estende ampiamente verso oriente, ove sfuma nell'area deltizia vera e propria, più prossima al mare. Questa zona è dominata dai grandi corpi sabbiosi dei canali del Po,

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

di età preistorica, romana e medievale, che qui iniziavano a divergere nei canali distributori che a valle alimentavano i vari lobi deltizi. I corpi di paleoalveo di età medievale appaiono tuttora decisamente sopraelevati sulle ampie depressioni interalvee circostanti.

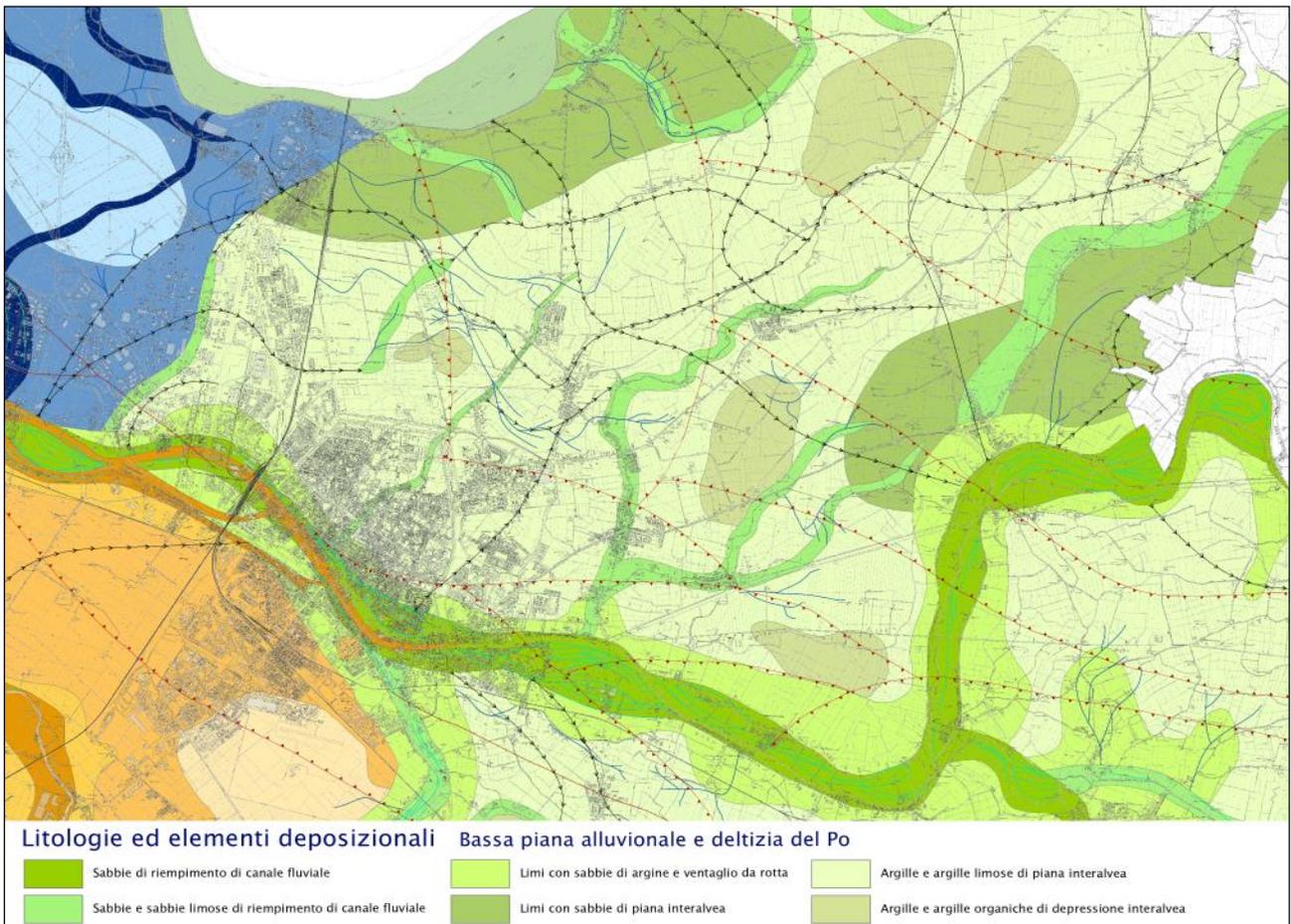


Figura 3-8 - Stralcio della Carta Geologica del Comune di Ferrara (2015), rappresentante il centro storico e la parte centro-orientale del territorio comunale, dominata da grandi corpi allungati di sabbie di canale di Po, fiancheggiati dai relativi corpi di argine naturale e da aree interalvee, ricchi di fanghi e torbe.

3.2.3 Pianura alluvionale dei fiumi appenninici

Costituisce una vasta area meridionale del territorio comunale, dominata da spessi depositi del fiume Reno e, nella sua porzione più sud-occidentale, da quelli del Savena oltre a quelli dello Zena, in gran parte posti subito ad est del confine comunale. Gran parte di questi sedimenti sono stati depositi in epoca storica molto recente, specialmente durante il XVII secolo. A scala regionale, la bassa pianura alluvionale appenninica, storicamente ricca di acquitrini e con canali fluviali molto instabili, si estende fin poco a nord della Via Emilia, ove passa ad una stretta fascia di depositi pedecollinari.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

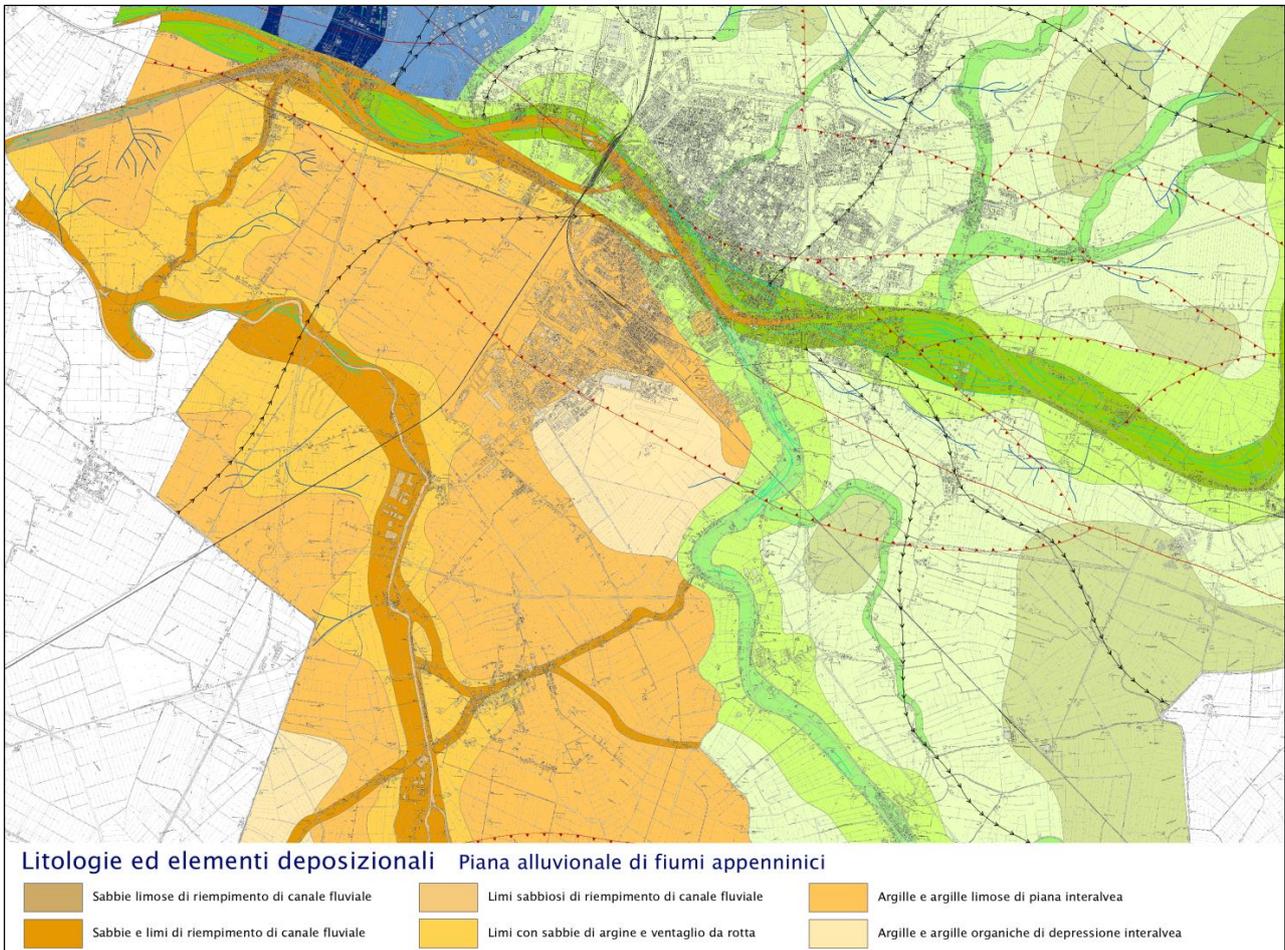


Figura 3-9 - Stralcio della Carta Geologica del Comune di Ferrara (2015), a sud del centro storico che illustra il grande corpo di paleoalveo del fiume Reno, in gran parte deposto durante il XVII secolo. Notare l'accumulo di sedimenti di Reno entro il precedente alveo del Po a sud e sud-ovest del centro storico.

3.3 Contesto strutturale

L'area esaminata fa parte del bacino di Avanfossa dell'Appennino, qui sviluppato nella regione compresa tra la dorsale dell'Appennino settentrionale ed i primi rilievi veneti.

L'assetto strutturale delle successioni sepolte sotto la Pianura Padana è noto, nelle sue linee generali, attraverso numerosi profili di sismica a riflessione e sondaggi profondi, realizzati per la ricerca di idrocarburi, soprattutto da parte dell'AGIP. Il sottosuolo è caratterizzato da una complessa serie di piani di scollamento e sovrascorrimenti, con vergenza settentrionale e piano di scorrimento immergente verso sud associati ad anticlinali di rampa e più ampie pieghe sinclinaliche, interposte fra i fasci di sovrascorrimento. Queste strutture compressive hanno progressivamente coinvolto l'avanfossa appenninica in età geologica recente, durante il Neogene ed il Quaternario.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

Le prospezioni petrolifere hanno permesso di riconoscere una complessa serie di pieghe e sovrascorrimenti con geometria a pianta arcuata e vergenza nord e nord-est (Pieri e Groppi, 1975, 1981; Bigi *et al.*, 1990; Boccaletti *et al.*, 2004; Cerrina Feroni *et al.*, 2002). All'interno delle pieghe che formano il fronte esterno della catena appenninica sepolta, è possibile distinguere (Pieri e Groppi, 1975) due fasci maggiori di pieghe, con concavità rivolta verso il margine appenninico, denominati "Arco delle Pieghe Emiliane", a nord-ovest, ed "Arco delle Pieghe Ferraresi-Romagnole", ad sud-est (Figura 3-10).

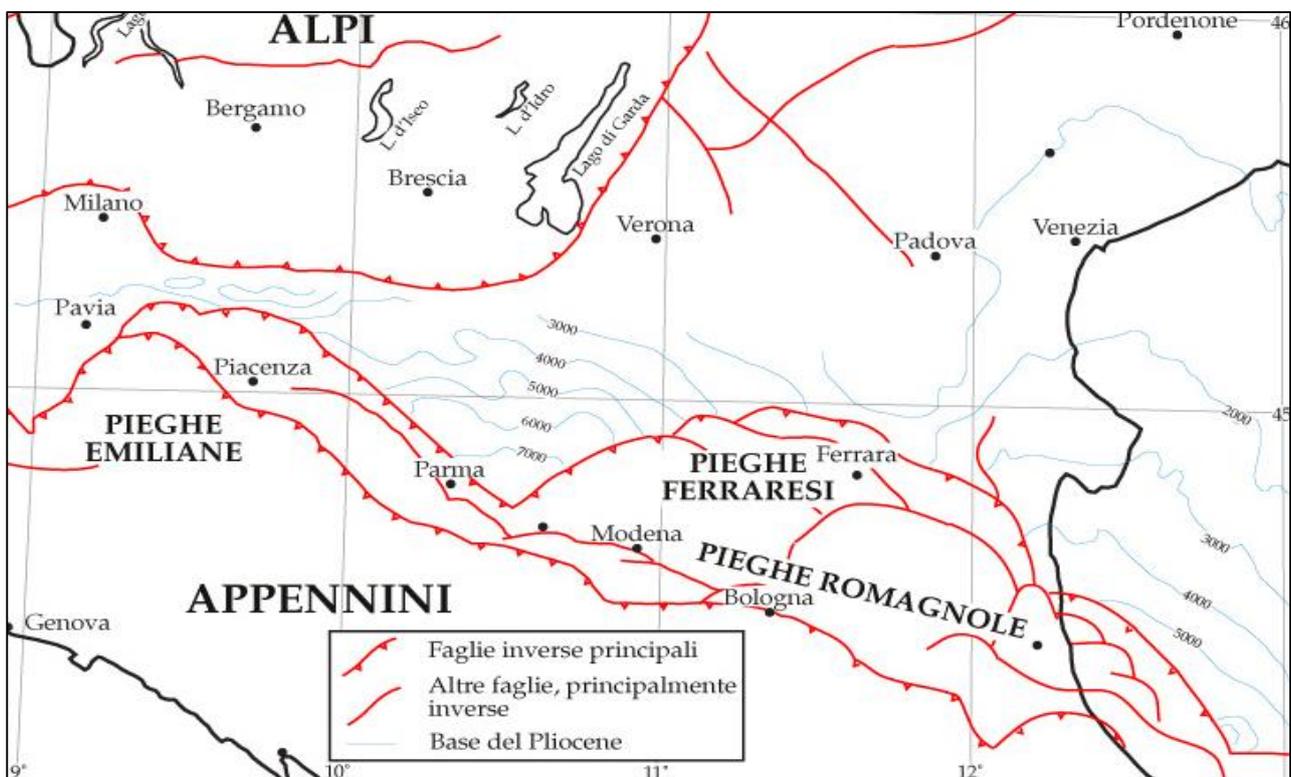


Figura 3-10 - Carta strutturale semplificata della Pianura Padana centro-orientale (Modificata da Burrato *et al.*, 2003, da Pieri e Groppi, 1975). L'area analizzata si trova nella parte meridionale del fascio di pieghe ferraresi.

L'arco orientale può essere a sua volta suddiviso in tre strutture minori dette "Pieghe Ferraresi", "Pieghe Romagnole" e "Pieghe Adriatiche" (Bigi *et al.*, 1990). Le Pieghe Ferraresi (Dorsale Ferrarese o "Ferrara Folds" in Pieri e Groppi, 1981) rappresentano le strutture più settentrionali, estese tra Reggio Emilia e la costa adriatica (Figura 3-10, Figura 3-11), che si spingono a nord del Po tra Occhiobello e Ferrara (Bigi *et al.*, 1990) e registrano le fasi più recenti e tuttora in atto della deformazione. La complessa struttura sismogenetica delle Pieghe Ferraresi si sviluppa a nord della direttrice San Pietro in Casale-Pieve di Cento. Verso sud, questa struttura è limitata da una fascia di pieghe e sovrascorrimenti sepolti lungo la direzione Minerbio-San Giorgio di Piano, più prossima al margine appenninico ("Pieghe Romagnole" in Pieri e Groppi,

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

1981). Nel settore occidentale delle Pieghe Ferraresi, si possono osservare una serie di depressioni tettoniche e pieghe sinclinali che complicano ulteriormente la geometria strutturale (Figura 3-12).

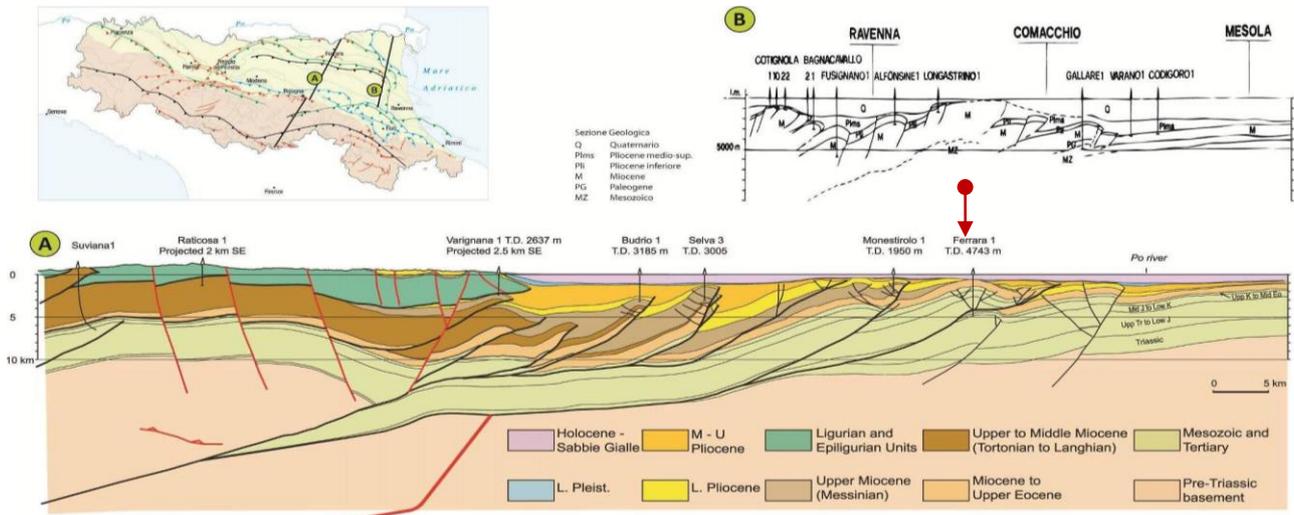


Figura 3-11 - Contesto strutturale della porzione emiliano-romagnola dell'Avanfossa Appenninica. La sezione superiore (B) deriva da Pieri e Groppi, 1981, mentre la sezione inferiore è presa (A) da Toscani *et al.*, 2009. L'area indagata, ubicata all'incirca in corrispondenza della freccia rossa, attraversa varie fasce strutturali di pieghe e faglie, come ben visibile dalla sezione geologica.

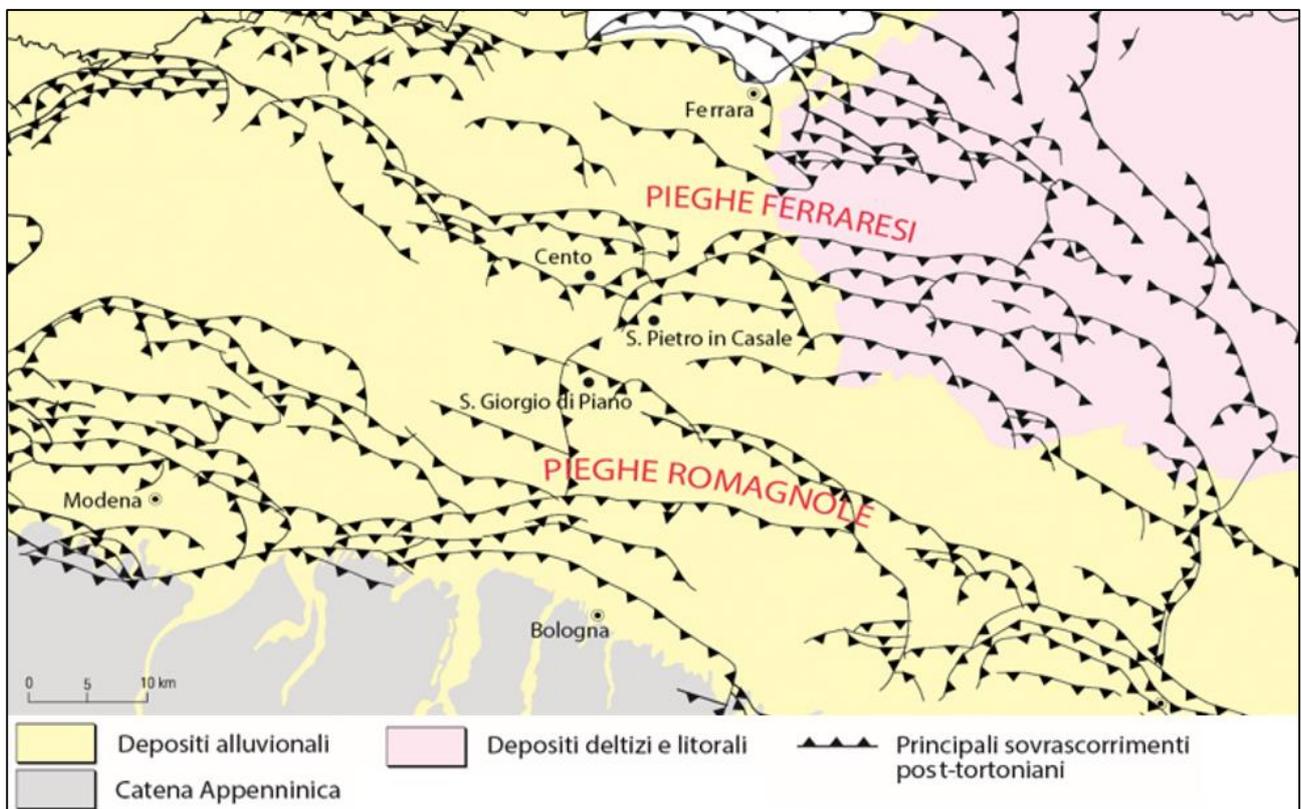


Figura 3-12 - Inquadramento delle strutture tettoniche sepolte, che illustra la complessità dell'arco delle Pieghe Romagnole e Ferraresi. Modificato dalle Note Illustrative del Foglio CARG 203, Poggio Renatico.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

La Figura 3-11 illustra due profili attraverso le Pieghe Ferraresi. La sezione A è tratta da Toscani *et al.* (2009), mentre la sezione B, localizzata alcuni km più ad est, è tratta da Pieri e Groppi (1981). Entrambe le sezioni mostrano un sovrascorrimento (*thrust*) principale profondo, che verso l'esterno si apre in ventagli (*splay*) di faglie meno profonde, associati retroscorrimenti di ordine minore. In sezione A, sono evidenti scollamenti multipli a diversi livelli strutturali, mentre la sezione B mostra superfici di scollamento generalmente più profonde. Nella porzione centrale, la struttura di Ferrara presenta un secondo gruppo di anticlinali di rampa, ben evidente in entrambe le sezioni.

L'insieme delle Pieghe Ferraresi e delle Pieghe Romagnole rappresenta la culminazione strutturale che delimita, a nord, un ampio bacino di *piggy-back* (Ori e Friend, 1984), all'interno del quale si sono depositi notevoli spessori sedimentari che costituiscono la successione pliocenica marina e quaternaria marino-continentale (Figura 3-11). L'architettura stratigrafica dei depositi plio-quaternari è stata fortemente influenzata dalla deformazione tettonica e presenta quindi spessori massimi nelle aree di sinclinale e minimi sulle anticlinali sepolte (Correggiari *et al.*, 1992; Amorosi *et al.*, 1997 a, b; Di Dio e Caporale, 1998; Di Dio e Molinari, 2000). Questo andamento è evidente anche dalle abbondanti variazioni laterali di spessore delle successioni più recenti, in buona parte deposte in condizioni di pianura alluvionale. Il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore, deposto negli ultimi 350.000 - 450.000 anni (Regione Emilia-Romagna ed ENI-AGIP, 1998) e limitato al tetto da una superficie topografica, mostra spessori che variano da meno di 70 m in corrispondenza della culminazione dell'Anticlinale di Casaglia, ad anche oltre 400 m nelle aree di sinclinale più depressa. Queste grandi variazioni di spessore registrano quindi altrettanto grandi variazioni laterali di subsidenza, indotte anche dalla deformazione delle strutture tettoniche sismogenetiche.

Il territorio del Comune di Ferrara si sviluppa sulla parte frontale delle strutture a pieghe e sovrascorrimenti dell'Appennino sepolto dalle successioni terrigene di Avolfossa Padana. Le porzioni settentrionali dell'area corrispondono ad un sistema di anticlinali di rampa, associate al sovrascorrimento frontale della catena sepolta, che si sviluppa a nord dell'attuale corso del fiume Po. Tali strutture sono ben visibili nei profili di sismica a riflessione prodotti negli anni '50 dalla Società Petrolifera Italiana (ora ENI-AGIP) e nelle diverse interpretazioni geologiche degli stessi, proposte in letteratura (es. Bigi *et al.*, 1990; Boccaletti *et al.*, 2004; Cerrina Feroni *et al.*, 2002; Corrado *et al.*, 2010; Pieri e Groppi, 1981; Toscani *et al.*, 2009). A queste strutture è associata la sorgente sismogenetica individuale "ITIS090" (si veda paragrafo 2.2), ritenuta responsabile degli eventi sismici del 1570.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL
COMUNE DI FERRARA

Il territorio indagato può essere schematicamente suddiviso in tre settori principali, strutturalmente omogenei e con caratteri stratigrafici ben distinti:

- a) la parte nord-occidentale, indicativamente a nord del Canale di Burana ed ad ovest del Canale Boicelli, corrisponde ad un pronunciato alto strutturale, costituito da un'anticlinale complessa segmentata da faglie inverse e retroscorrimenti. L'analisi dei profili sismici ha permesso di verificare come la culminazione assiale degli strati mesozoici sia sviluppata più a sud rispetto a quella dei depositi terziari. In quest'area le rocce marine del Miocene si trovano spesso anche a meno di 150 m di profondità e sono superiormente troncate da una superficie di discordanza angolare e lacuna, a cui si sovrappongono direttamente sedimenti sciolti fluviali del Quaternario. L'area presenta una scarsa subsidenza rispetto ad altre aree della pianura emiliano-romagnola, per cui i depositi singlaciali risultano sepolti a più debole profondità;
- b) la parte centro-settentrionale ed orientale, sita a nord del canale del Po di Volano, corrisponde anch'essa ad un fascio di anticlinali sepolte, ma decisamente più depresse rispetto alla culminazione di Casaglia. La parte occidentale dell'area si sviluppa sotto il centro storico e la periferia settentrionale di Ferrara. Le strutture più elevate sembrano interessare la parte nord-occidentale, presso Pontelagoscuro. Pare non vi sia una prosecuzione diretta fra gli assi delle pieghe di Casaglia e quelle della zona qui discussa, che sono verosimilmente separate da una struttura trascorrente ad alto angolo che svincola i due segmenti. La mancanza di profili sismici nel centro urbano rende incerta la ricostruzione della struttura di svincolo. Procedendo verso est, le pieghe mostrano un andamento periclinale e virano verso sud, creando un arco convesso verso nord. Un sovrascorrimento e relativa anticlinale di rampa sembrano svilupparsi anche verso sud-est, nella zona di Cona. Le informazioni stratigrafiche sul sottosuolo profondo sono incomplete ma, ad oriente del centro storico, i profili sismici di recente acquisizione (Affatato *et al.*, 2019) sembrano indicare la presenza di facies del Quaternario Marino, con corpi deltizi progradanti assenti nell'area di Casaglia. La parte centro-settentrionale del territorio di Ferrara presenta tassi di subsidenza naturale medi, che divengono più accentuati verso oriente;
- c) la parte meridionale del territorio è dominata da un'ampia struttura sinclinalica. Le successioni stratigrafiche plio-pleistoceniche ed oloceniche presentano qui i massimi spessori sviluppati all'interno dell'area di indagine, mentre le superfici di discordanza stratigrafica sono meno nette ed associate a lacune cronologiche minori. Le spesse successioni di mare profondo del Pliocene e Pleistocene basale evolvono, in modo più graduale, verso successioni costiere del Quaternario Marino e poi nei corpi

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

sedimentari fluviali ricchi, in quest'area, di apporti di provenienza appenninica. Nell'area meridionale sono registrati i maggiori tassi di subsidenza.

Nei pressi del confine meridionale comunale, si sviluppa un fascio di anticlinali ed alti strutturali meno marcati di quelli settentrionali, associati a piani di sovrascorrimento nord-vergenti. Queste strutture si sviluppano prevalentemente a sud del territorio comunale, allungandosi da Sant'Agostino a Poggio Renatico, Montalbano e Malalbergo. La prosecuzione verso sud-est di questo fascio di faglie, associate ad anticlinali di rampa, diede origine al distruttivo terremoto di Argenta del 1624.

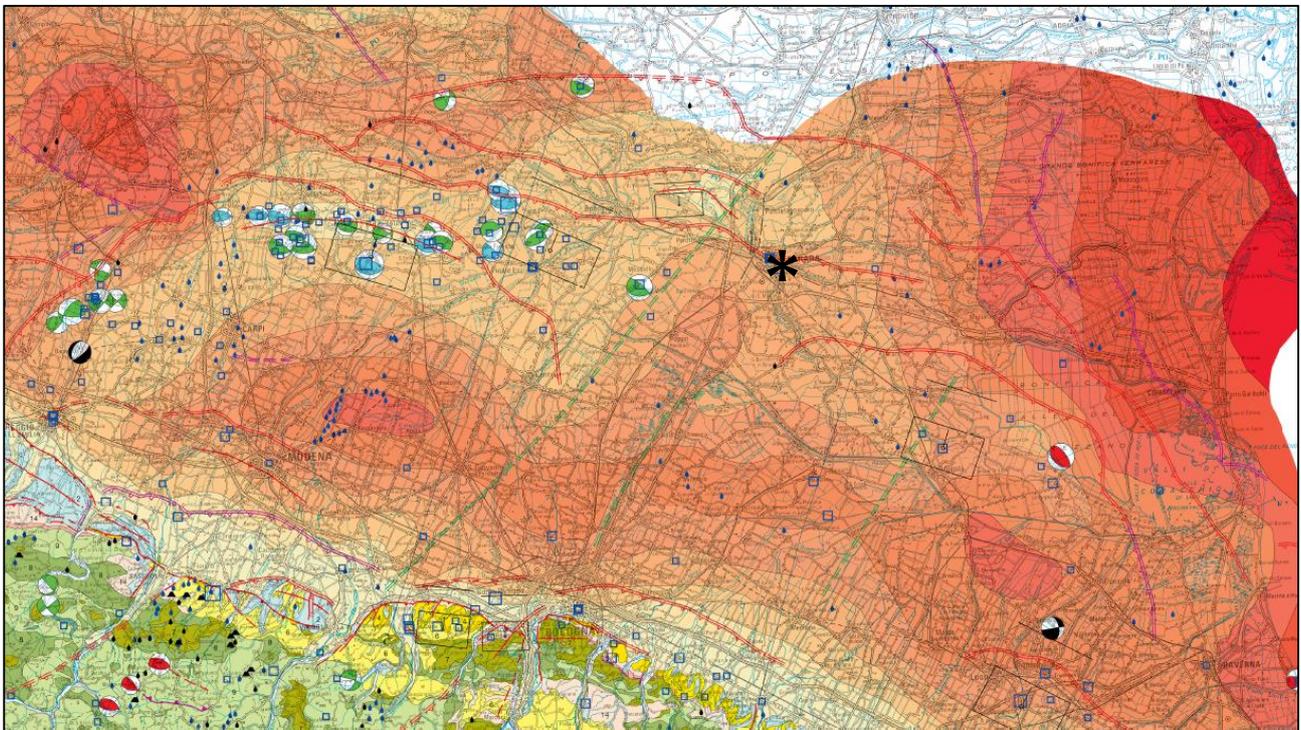


Figura 3-13 - Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna ed aree limitrofe edizione 2016 (Martelli *et al.*, 2017). L'area analizzata è indicata dall'asterisco.

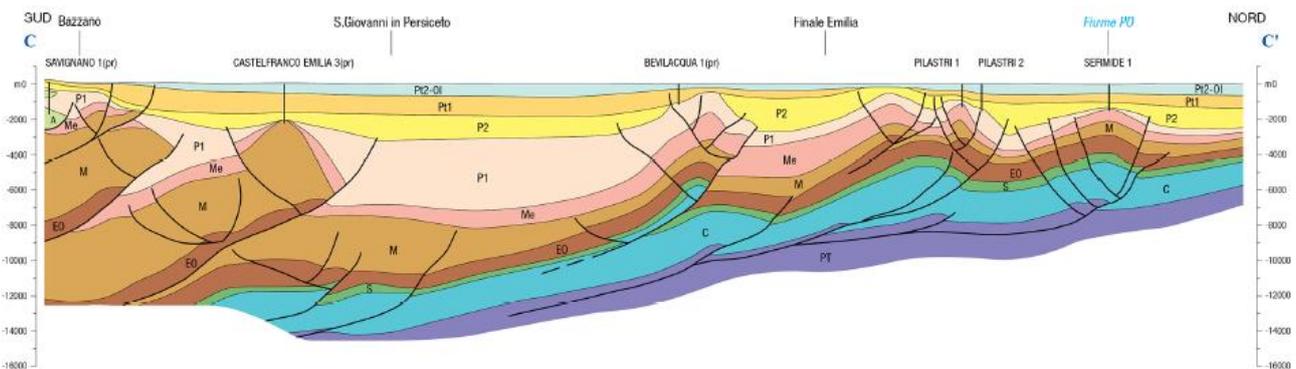


Figura 3-14 - Sezione geologica profonda C - C', da Bazzano (BO) al Po. Fonte: Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe edizione 2016 (Martelli *et al.*, 2017).

4 Dati geognostici e geofisici

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

In relazione ai sistemi d'indagine indiretta, sono stati analizzati i log parametrici di prove penetrometriche statiche (CPT), con piezocono (CPTu) e dilatometri (DMT). Sono stati inoltre esaminati i rapporti di prova di indagini geofisiche tipo Down-Hole (DH, SCPTu, SDMT), HVSr e MASW.

Le ubicazioni delle prove utilizzate per lo studio di microzonazione sismica sono riportate nella carta delle indagini (Tavole A₁₋₉) descritta al paragrafo 8.1.

4.1 Indagini di repertorio

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

Aggiungendo alle indagini recuperate negli archivi sopracitati quelle raccolte presso alcuni geologi liberi professionisti nonché quelle raccolte da Geotema S.r.l., nel complesso si sono potute utilizzare ai fini della microzonazione sismica ben 4.242 prove numeriche pregresse (di cui per 3.552 sono disponibili i rapporti originali) di buona affidabilità, suddivise per numero e tipologia così come riportato in Tabella 4-1. Da ultimo sono stati considerati i dati di sottosuolo dei Comuni confinanti; ciò ha permesso di aumentare le conoscenze geologiche e meglio definire geometrie e limiti dei corpi deposizionali e delle aree a diverso rischio liquefazione lungo le fasce di confine.

TIPOLOGIA DI PROVA	SIGLA	NUMERO
Prove penetrometriche statiche con punta meccanica	CPT (C)	1.550
Prove penetrometriche statiche con piezocono	CPTu (U)	295
Prove penetrometriche statiche con cono sismico	SCPTu (B)	210
Prove penetrometriche dinamiche	DN (D)	81

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

Prove dilatometriche e dilatometriche sismiche	DMT e SDMT (L)	4
Sondaggio per idrocarburi	SI (G)	20
Sondaggi a distruzione di nucleo	SD (P1, P2)	87
Sondaggi a carotaggio continuo	S (P4, P5)	938
Pozzi per acqua	PA (P6, P7)	443
Misure di microtremore a stazione singola	HVSR (R)	171
Sondaggio elettrico verticale	SEV (V)	203
Multi-channel Analysis of Surface Waves	MASW (J)	9
Array sismici	ESAC (N)	7
Prova sismica in foro tipo Down-Hole	DH (F)	2
Altre tipologie di prove	-	222
	TOTALE	4.242

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

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

Per agevolare l'archiviazione, e la conversione dei dati al formato regionale, si è ricorso all'utilizzo di un applicativo basato su Microsoft Access sviluppato dal Servizio Geologico e Sismico della Regione Emilia-Romagna nell'ambito del progetto CARG.

Il software consente la memorizzazione dei dati in tabelle costituite da insiemi di record mediante maschera di inserimento, personalizzabile a seconda della tipologia di dato trattato. Tale maschera è suddivisa in due sezioni distinte: la prima consente di immettere informazioni di carattere geografico e generale, come ad esempio localizzazione dell'indagine, modalità esecutive, archivio di provenienza, attendibilità e riservatezza del dato (Figura 4-1) mentre la seconda permette di memorizzare le caratteristiche "geologiche" relative ai terreni indagati (Figura 4-2).

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL
COMUNE DI FERRARA

CTR	185160	PROGRESSIVO	P4080	SIGLA	185160P4080	COMUNE	FERRARA	Nuova
TIPO PROVA	carotaggio continuo	QUOTA	7	PROFONDITA'	20	COMMITTENTE	SIG. MONTI ALBERTO	Clona
AVANZAMENTO	carotaggio continuo	PROVA RER		TETTO GHIAIE		DITTA ESEC.	GEOL. TADDIA	Trova Prova
DATA ESECUZIONE	13/07/2002	RISERVATEZZA	pubblico	PRECISIONE UBICAZIONE	alta	PROPR. ARCHIVIO	COMUNE DI FERRARA	Trova Progr.

Figura 4-1 - Sezione I - "Anagrafica e dati generali" della maschera d'inserimento MS Access, nella quale sono inserite le informazioni di carattere generale sull'indagine geognostica.

All'interno della prima sezione il campo "sigla" rappresenta l'identificativo univoco della prova geognostica, che viene costruito mediante la concatenazione del numero della sezione "CTR" nella quale ricade la prova e del codice alfanumerico che identifica sia la tipologia di prova geognostica, che il "progressivo" della stessa all'interno della sezione CTR in esame.

Il prefisso (lettera) del codice "progressivo" serve a discriminare il tipo di prova da inserire, ad esempio:

- B → penetrometria statica con cono sismico;
- C → penetrometria statica con punta meccanica;
- D → penetrometria dinamica non S.C.P.T.;
- F → indagine sismica in foro tipo Down-Hole;
- G → pozzo AGIP per idrocarburi;
- J → indagine Multi-channel Analysis of Surface Waves;
- L → dilatometria;
- N → array sismico;
- P → sondaggio o pozzo di cui si dispone di log litologico (P1, P2: Sondaggi a distruzione di nucleo; P4, P5: Sondaggi a carotaggio continuo; P6, P7: Pozzi per acqua).
- R → indagine di microtremore a stazione singola;
- U → penetrometria statica con piezocono;
- V → sondaggio elettrico verticale.

La parte numerica del codice, invece, oltre a fornire indicazione del progressivo, delimita anche degli intervalli entro i quali le diverse tipologie di prove devono essere contenute; nella fattispecie:

- 001 – 399, penetrometrie, trivellazioni a secco, sondaggi a distruzione;
- 400 – 499, sondaggi a carotaggio continuo;
- 500 – 599, sondaggi o penetrometrie eseguiti dalla Regione Emilia-Romagna;
- 600 – 899, pozzi per acqua;
- 900 – 950, sondaggi elettrici verticali;
- 951 – 999, indagini sismiche.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

Il codice può prevedere un suffisso (lettera) che indica la compresenza di un dato numero di indagini sulla medesima verticale, come:

- A → Z (esclusa la X), presenza di più indagini sulla stessa coordinata xy (es: C001D = quattro penetrometrie statiche ubicate nello stesso punto xy);
- X, sondaggio RER coincidente con penetrometria RER ma ubicati su CTR in due punti differenti.

L'accesso alla seconda parte della maschera d'inserimento di MS Access è consentito solamente per le indagini di tipo diretto, cioè per tutte le tipologie di sondaggio geognostico, identificate dalla lettera "P" nel codice alfanumerico. Tramite questa sezione è possibile inserire e memorizzare le informazioni di carattere litologico e sedimentologico riferite ai singoli "strati" individuati nelle stratigrafie di sondaggio (Figura 4-2). Per questi strati la maschera consente l'inserimento delle caratteristiche litologiche principali ("litologia di strato") ed intercalate ("litologia delle intercalazioni"), nonché quelle dei componenti accessori (resti vegetali, resti fossili, concrezioni calcaree) e caratterizzanti (colorazioni) eventualmente indicati nei log originali.

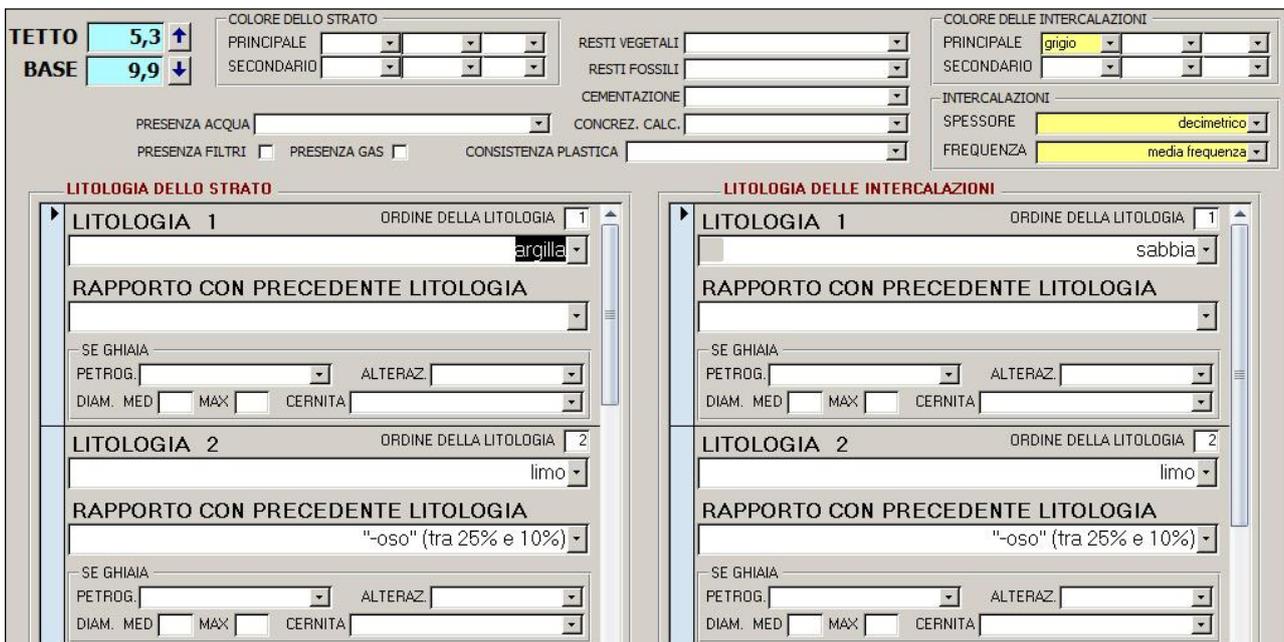


Figura 4-2 - Sezione II - "Dati generali e composizione litologica del singolo strato" della maschera d'inserimento MS Access, nella quale sono inserite le informazioni generali e composizionali relative ai singoli strati individuati dall'indagine geognostica.

L'inserimento della descrizione del log originario avviene strato per strato, fissando dapprima i limiti degli stessi (base e tetto) e successivamente selezionando le caratteristiche sedimentologiche e litologiche identificative tra le diverse voci predefinite disponibili nei corrispondenti menu a tendina. Le frecce di

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

colore blu permettono di spostarsi all'interno della stratigrafia del terreno indagato, consentendo di visualizzare quanto già inserito o di proseguire nell'inserimento delle caratteristiche degli strati sottostanti. Poiché la litologia di uno strato può essere composta da un insieme di tipi litologici elementari, la maschera contempla l'inserimento di n. campi litologici ("litologia 1, litologia 2, ecc.") e consente d'impostare tra loro relazioni di ordine gerarchico, basate sul principio dell'abbondanza relativa ("ordine della litologia"). Nel caso di uno strato la cui litologia sia composta da più tipi litologici elementari (es. argille limoso-sabbiose), la litologia di ordine 1 è rappresentata dall'argilla, la litologia di ordine 2 dal limo, mentre la litologia di ordine 3 dalla sabbia. Per stabilire le percentuali del rapporto di abbondanza tra le varie litologie vengono, quindi, suggeriti criteri basati su prefissi e suffissi che consentono di attribuire dei valori numerici indicativi (nell'esempio il suffisso -oso indica una presenza di limo compresa tra il 10 ed il 25%).

Nel caso in cui lo strato contenga delle intercalazioni litologiche queste vengono descritte con le stesse modalità già viste per le litologie principali, utilizzando i campi dedicati alla "litologia delle intercalazioni". Al fine di meglio dettagliare le caratteristiche delle litologie intercalate, la maschera di Access permette l'inserimento di spessore e frequenza delle stesse, selezionando le voci predefinite nei campi dedicati. Sia per quanto concerne le litologie sia per le intercalazioni, la maschera fornisce la possibilità di inserire le rispettive colorazioni, attraverso l'utilizzo di due campi colore a scelta predefinita ("principale" e "secondario"). Se lo strato appare monocromatico si procede all'inserimento del solo colore principale; se invece lo strato presenta sfumature o coppie di colori, è necessario compilare anche il colore secondario. Infine, per quanto riguarda l'archiviazione di componenti accessori degli strati ("resti vegetali", "resti fossili", "concrezioni calcaree") questa avviene selezionando, nell'apposito campo, una delle voci predefinite che ne indicano la relativa abbondanza.

Ogni prova raccolta è stata archiviata nel database sotto forma di dato numerico, quando disponibile, oppure attraverso copia in formato *.pdf* del documento originale.

L'ubicazione geografica della prova è stata inserita in uno *shapefile* puntuale georeferenziato, contenente il codice identificativo alfanumerico regionale che è stato poi utilizzato come chiave primaria (*primary key*) per effettuare il collegamento (*lookup*) al database in MS Access, contenete tutte le informazioni geologico-stratigrafiche delle indagini disponibili (Figura 4-3).

La distribuzione geografica delle indagini geognostiche nel territorio comunale è rappresentata nella carta delle indagini (Tavole A_{1:9}). In merito alle indagini della banca dati geognostica regionale, si sottolinea che non sempre queste sono state fornite corredate dalla copia in formato *.pdf* del documento originale; questo comporta che le ubicazioni geografiche contenute in banca dati siano in numero maggiore rispetto

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

ai file .pdf in essa archiviati, e che le informazioni geologiche ad esse precedentemente associate non siano ad oggi più verificabili.

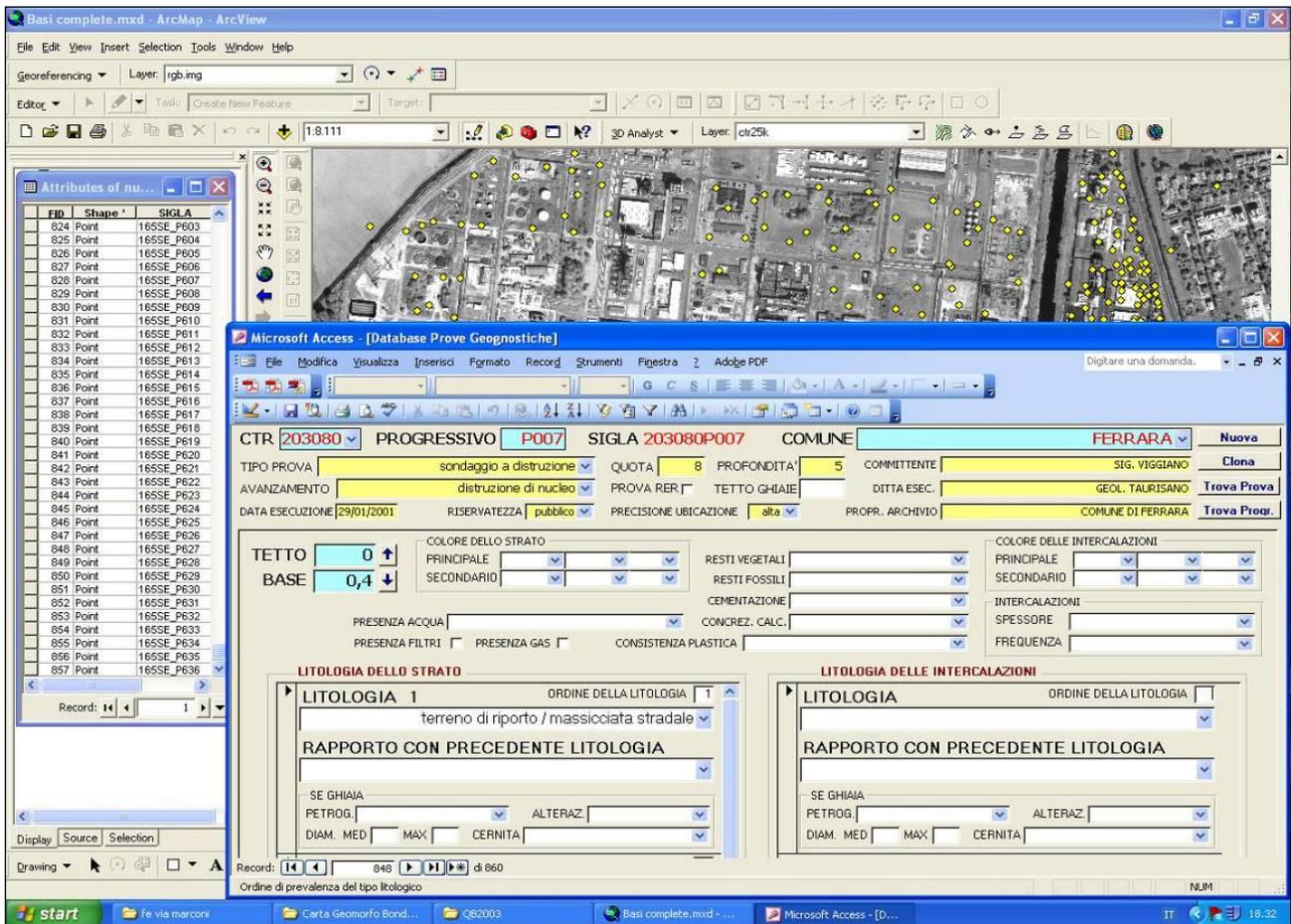


Figura 4-3 - Esempio di link tra il database in formato Microsoft Access e lo *shapefile* contenente la ubicazione geografica delle indagini geognostiche.

4.2 Indagini eseguite per la microzonazione sismica

A supporto dello studio di microzonazione sismica del Comune di Ferrara è stato necessario realizzare una specifica campagna di acquisizioni di microtremore sismico di lunga durata. Le misure realizzate, anche in notturna, hanno avuto lo scopo di verificare la presenza di amplificazioni alle basse frequenze come indicato in alcuni lavori pubblicati su riviste scientifiche internazionali (es. Mascandola *et. al.*, 2019, Mascandola *et. al.*, 2017, Milana *et. al.*, 2014).

L'abbondanza e l'omogenea distribuzione delle indagini geognostiche pregresse, ha invece consentito un'accurata ricostruzione del quadro litostratigrafico ed una buona correlabilità generale delle proprietà geotecniche dei terreni presenti nei primi 30 m di sottosuolo. Per alcune aree si è ritenuto comunque

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

opportuno realizzare approfondimenti attraverso l'esecuzione di nuove indagini geotecniche di tipo CPTu e DMT.

La buona disponibilità di prove geofisiche ha permesso infine di definire le variazioni di V_{s30} alla scala dell'intero territorio indagato, anche grazie all'esecuzione delle nuove indagini SCPTu e SDMT realizzate nel centro storico e nell'area di Porporana.

4.2.1 Indagini realizzate in situ

Come detto, a supporto del presente studio sono state realizzate diverse indagini (Tabella 4-2) con lo scopo di meglio caratterizzare dal punto di vista geotecnico e geofisico alcune aree di interesse per l'Ufficio di Piano del Comune di Ferrara. Di seguito vengono invece descritte le metodologie di esecuzione e di analisi delle stesse.

TIPOLOGIA DI PROVA	SIGLA	NUMERO
INDAGINI REALIZZATE IN SITU		
Prove penetrometriche statiche con piezocono	CPTu	6
Prove penetrometriche statiche con cono sismico	SCPTu	1
Prove dilatometriche sismiche	SDMT	2
Misure di microtremore a stazione singola	HVSR	37
	TOTALE	46

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

4.2.1.1 Prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTu)

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

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

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

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

Le prove, che hanno interessato le località riportate in Tabella 4-3 sono state generalmente spinte fino a 20 m, profondità entro la quale possono verificarsi fenomeni di liquefazione cosismica in presenza di terreni granulari poco addensati e saturi in acqua. I dati penetrometrici (q_c , f_s) sono stati elaborati sia per ricavare i principali parametri tessiturali e meccanici dei sedimenti attraversati, sia per eseguire verifiche a liquefazione con metodi semplificati.

PROVA	ID_SPU	LAT. (WGS84)	LONG. (WGS84)	LOCALITA'	DATA	PROF.	QUOTA FALDA DA P.C.
CPTu1	185160U043	44.835516°	11.619536°	P.zza Trento Trieste, Ferrara	17/10/2018	20 m	1,20 m
CPTu2	185160U044	44.830714°	11.617462°	Sottomura Baluardo San Lorenzo, Ferrara	18/10/2018	30 m	2,00 m
CPTu3	186090U001	44.872711°	11.731141°	S.P. 22, Correggio	07/10/2019	20 m	1,60 m
CPTu4	186050U002	44.915384°	11.704297°	Via Chiorboli, Sabbioni	07/10/2019	20 m	3,92 m
CPTu5	186050U001	44.907107°	11.687648°	Via Acquedotto, Pescara	07/10/2019	20 m	4,40 m
CPTu6	186130U003	44.832165°	11.678149°	Via Casazza, Focomorto	07/10/2019	20 m	0,92 m

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

4.2.1.2 Prove penetrometriche statiche con cono sismico (SCPTu)

Rispetto alla prova CPTu, applicando al piezocono elettrico un'asta contenete accelerometri tridimensionali è possibile la registrazione di segnali sismici generati artificialmente; la prova SCPTu (*Seismic Cone Penetration Test*) è infatti in grado di acquisire, oltre ai parametri già descritti per le CPTu, le velocità delle onde di taglio V_s e di compressione V_p , una volta che queste siano indotte tramite sistema di energizzazione (martello) montato su di un supporto a lato del penetrometro ed infisso nel terreno. Anche questa indagine, realizzata presso la località di Porporana (FE), è stata eseguita mediante penetrometro statico equipaggiato della medesima punta elettrica Tecnopenta G1-CPL2IN con coppia di sensori sismici distanziati di un metro (cfr. ASTM D 7400).

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

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

PROVA	ID_SPU	LAT. (WGS84)	LONG. (WGS84)	LOCALITA'	DATA	PROF.	QUOTA FALDA DA P.C.	V_{s30} (m/s)
SCPTu1	185060B001	44.924238°	11.475791°	S.P. 19, Porporana	08/10/2019	30 m	3,60 m	218

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

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

I valori parametrici riportati nel rapporto di prova allegati allo studio, sono stati utilizzati anche per eseguire la verifica del potenziale di liquefazione mediante metodi semplificati, come dettagliato nel paragrafo 7.2.1.

4.2.1.3 Prove dilatometriche sismiche (SDMT)

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

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

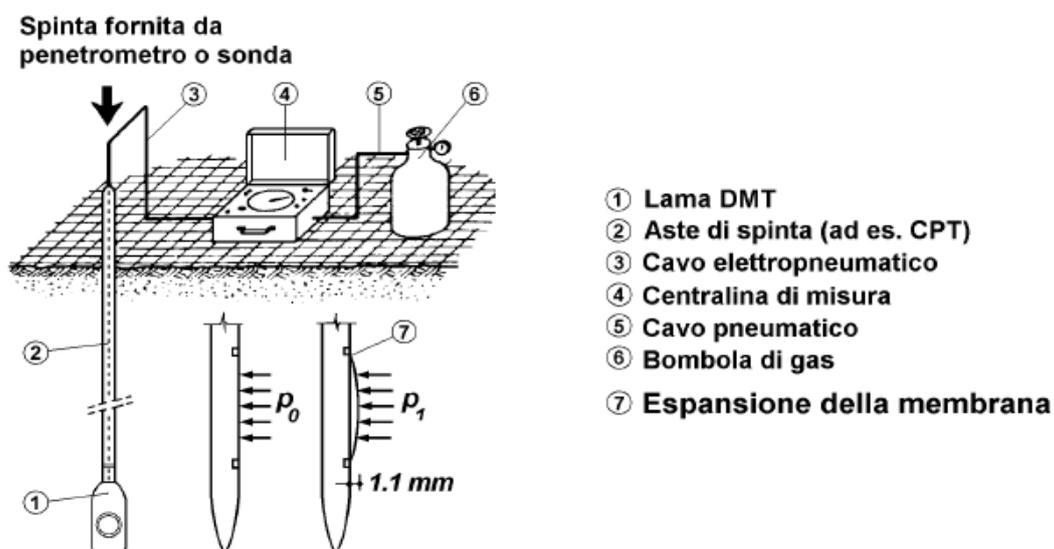


Figura 4-4 - Schema generale della prova DMT.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

La prova consiste nell'infiggere verticalmente la lama nel terreno mediante spinta statica, agendo su una batteria di aste, espandendo la membrana con gas in pressione e misurando le pressioni corrispondenti a due livelli di deformazione predeterminati della membrana. La lama è collegata ad una centralina di misura in superficie per mezzo di un cavo elettropneumatico (che trasmette pressione di gas e continuità elettrica) passante all'interno delle aste di spinta. Una bombola di gas, collegata alla centralina di misura per mezzo di un cavo pneumatico, costituisce la sorgente di gas necessaria per espandere la membrana. La centralina di misura è dotata di un regolatore di pressione, di manometri, di un segnalatore audiovisivo e di valvole di sfiato.

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

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

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

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

I_D = Indice di Materiale;

K_D = Indice di Spinta Orizzontale;

E_D = Modulo Dilatometrico.

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

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

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

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

OCR = Rapporto di sovraconsolidazione (terreni coesivi);

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

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

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

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

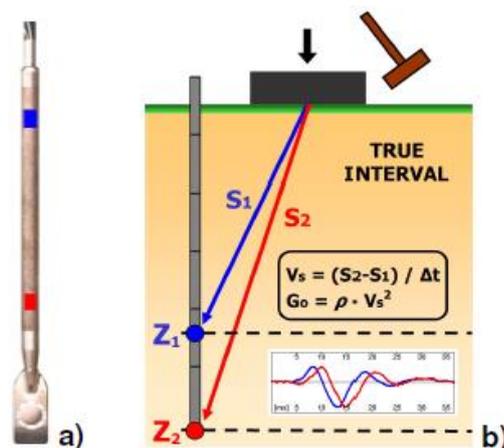


Figura 4-5 - Lama DMT e modulo sismico (a); Schema generale della prova con SDMT (b).

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

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

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

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

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

PROVA	ID_SPU	LAT. (WGS84)	LONG. (WGS84)	LOCALITA'	DATA	PROF.	GWT
SDMT1	185160L001	44.835516°	11.619536°	P.zza Trento Trieste, Ferrara	17/10/2018	15 m	1,20 m
SDMT2	185160L002	44.830714°	11.617462°	Sottomura Baluardo San Lorenzo, Ferrara	18/10/2018	30 m	2,00 m

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

4.2.1.4 Misure di microtremore a stazione singola (HVSr)

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

Il rumore di fondo (microtremore), presente diffusamente sulla superficie terrestre ed associato sia a fenomeni atmosferici sia all'attività antropica, è relativo ad oscillazioni molto piccole (10-15 m/sec²), con componenti spettrali che vengono scarsamente attenuate nello spazio e misurabili con tecniche di acquisizione di tipo "passivo".

Tutte le onde elastiche dalla sorgente al sito, subiscono modifiche al loro tragitto ed attenuazioni in relazione alla natura del sottosuolo attraversato. Le informazioni stratigrafiche contenute nei microtremori sono sovrapposte al rumore casuale e possono essere estratte attraverso metodologie come quella di Nakamura dei rapporti spettrali (HVSr - *Horizontal to Vertical Spectral Ratio*). Tale tecnica è utilizzata anche per la determinazione dell'amplificazione sismica locale e per stimare le frequenze principali di risonanza del sottosuolo, dati molto utili anche per la progettazione ingegneristica delle strutture (Castellaro, 2012; Castellaro e Mulargia, 2011).

Il metodo considera i microtremori derivanti da onde di superficie (onde di *Rayleigh*) nelle componenti orizzontali e verticali, che vengono amplificate per effetto di sito a causa della presenza di discontinuità stratigrafiche nel sottosuolo. È quindi possibile ricostruire la forma spettrale del microtremore, in cui i picchi alle diverse frequenze rappresentano il rapporto tra le due componenti dei segnali registrati. A supporto del presente studio sono state effettuate 48 registrazioni di microtremore sismico. Le misure sono state eseguite con tromografi digitali "SARA" modello SL06 e modello SL07, entrambi equipaggiati con sensore velocimetrico a tre componenti da 2.0 Hz e tecnicamente equivalenti in

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

relazione al tipo di misura richiesta. Tuttavia, per confermare l'analogia risposta dei due strumenti ed effettuare una taratura reciproca, sono state realizzate 2 coppie di misure, in cui gli strumenti sono stati posti a circa 10 m di distanza l'uno dall'altro. I punti di misura sono stati georiferiti tramite GPS con precisione variabile tra 2 e 3 m, mentre le singole ubicazione sono state scelte considerando la distribuzione di indagini disponibili di analoga tipologia.

L'acquisizione dei dati è stata effettuata con frequenza di campionamento di 250 Hz (SL06) e 100 Hz (SL07), con un tempo di singola registrazione variabile da 30 a 60 minuti. Alcune misure sono state effettuate in notturna, in particolare nell'area urbana e periferica della città. Diverse registrazioni sono state ripetute in quanto soggette ad evidenti disturbi di natura antropica.

Tra le registrazioni effettuate 37 sono state considerate affidabili ed inserite nella banca dati a supporto dello studio (Tabella 4-6).

PROVA	ID_SPU	LAT. (WGS84)	LONG. (WGS84)	LOCALITA'	DATA	DURATA	f0	A0
HVSR1	185160R021	44.829095°	11.624063°	Via XX Settembre, Ferrara	19/06/2019	60 min	0,61	3,60
HVSR2	185160R022	44.828140°	11.609498°	Via Tancredi Trotti Mosti, Ferrara	26/07/2019	60 min	0,65	3,10
HVSR3	185160R026	44.808365°	11.597582°	Via Caselli, Ferrara	24/07/2019	55 min	0,58	3,00
HVSR4	185150R008	44.813230°	11.569290°	Via Vecchio Reno, Ferrara	18/07/2019	60 min	0,44	3,14
HVSR5	203030R001	44.787845°	11.578708°	Via Corazza, San Martino	18/07/2019	30 min	0,81	2,31
HVSR6	203030R002	44.765957°	11.571555°	Via Navigazione, Bosca di Sotto	24/07/2019	85 min	0,81	2,80
HVSR7	185150R009	44.832343°	11.571975°	Via Pelosa, Ferrara	18/07/2019	30 min	0,74	3,20
HVSR8	185150R007	44.834913°	11.508355°	Via Fondo Reno, Fondo Reno	05/07/2019	60 min	0,63	3,90
HVSR9	203080R002	44.740992°	11.617347°	Via Sgarbata, Borgo Colombara	11/07/2019	30 min	0,82	4,10
HVSR10	203080R003	44.706842°	11.629267°	Via della Cembalina, Spinazzino	11/07/2019	60 min	0,82	2,90
HVSR11	204050R003	44.697990°	11.689345°	Via Bova, Bova	11/07/2019	30 min	0,68	4,10
HVSR12	204050R004	44.705257°	11.700595°	Via del Vescovo, La Bova	11/07/2019	60 min	0,88	2,80
HVSR13 bis	186140R003	44.816532°	11.802867°	Via Ponte Assa, Borgo Berta	31/07/2019	30 min	0,74	3,89
HVSR15	186130R003	44.844785°	11.736762°	Via della Bosca, Contrapò	31/07/2019	30 min	0,70	3,96
HVSR16	186130R004	44.840662°	11.727163°	Via della Mensa, Contrapò	10/07/2019	30 min	0,81	2,28

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL
COMUNE DI FERRARA

HVSR17	186090R003	44.874565°	11.729765°	S.P. 22, Correggio	10/07/2019	60 min	0,81	2,27
HVSR19	186130R005	44.817587°	11.690177°	Via della Ginestra, Cocomaro di Focomorto	10/07/2019	30 min	0,93	2,33
HVSR21	186090R004	44.880773°	11.668398°	Via Acquedotto, Crociarola	10/07/2019	60 min	0,81	2,85
HVSR22	185110R006	44.884565°	11.553250°	Via Eridano, Castel Trivellino	09/07/2019	30 min	0,37	5,40
HVSR22 bis	185110R007	44.876292°	11.550013°	Via Ponti Sette, Ferrara	24/07/2019	30 min	0,58	6,10
HVSR22 ter	185110R008	44.876277°	11.550048°	Via Ponti Sette, Ferrara	24/07/2019	30 min	0,58	5,38
HVSR25	185160R023	44.826691°	11.623933°	Via del Gambone, Ferrara	18/07/2019	60 min	0,80	2,50
HVSR26	204020R001	44.798823°	11.773162°	Via Cremona, Quartesana/Borgo Punta	24/07/2019	55 min	0,53	3,59
HVSR27	204010R001	44.779253°	11.677872°	Via Prato delle Donne, Gaibanella	18/07/2019	30 min	0,74	2,44
HVSR28	203040R003	44.786705°	11.651258°	Via del Gorgo, Fossanova San Marco	18/07/2019	30 min	0,74	2,50
HVSR29	203040R004	44.781495°	11.625118°	Via Bassa, Torre Fossa	18/07/2019	30 min	0,77	2,50
HVSR30	185160R024	44.842553°	11.630240°	Via delle Vigne, Ferrara	29/07/2019	60 min	0,63	4,10
HVSR31	185070R041	44.903155°	11.542190°	Via del Riposo, Casaglia	24/04/2019	30 min	0,68	8,42
HVSR33	185120R036	44.855422°	11.648922°	Via S. Margherita, Malborghetto di Boara	10/07/2019	30 min	0,81	3,01
HVSR35	186130R006	44.821410°	11.672947°	Via Scorsuro, Cocomaro di Focomorto	10/07/2019	30 min	0,81	2,48
HVSR36	185160R027	44.822020°	11.649618°	Via Giglioli, Ferrara	01/01/2019	60 min	0,67	2,34
HVSR37	186130R007	44.836543°	11.666488°	Via Botter, Pontegradella	31/07/2019	30 min	0,61	4,07
HVSR39	186130R008	44.819487°	11.719790°	Via Piffarello, Codrea	10/07/2019	30 min	0,89	2,13
HVSR40	185160R025	44.835516°	11.619536°	Piazza Trento Trieste, Ferrara	18/10/2018	54 min	0,80	2,70
HVSR41	185070R042	44.924375°	11.514820°	Via Saracca, Ravalle	09/07/2019	30 min	0,70	7,49
HVSR41 bis	185070R043	44.924396°	11.514792°	Via Saracca, Ravalle	09/07/2019	30 min	0,70	7,07
HVSR42	185060R062	44.922057°	11.477979°	Via Spagnolina, Porporana	11/07/2019	30 min	0,58	6,15

f_0 = Frequenza naturale

A_0 = Ampiezza del picco di f_0

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

5 Modello del sottosuolo

Una fase fondamentale per l'elaborazione della microzonazione sismica è stata l'individuazione del substrato sismico, caratterizzato da elevati valori di rigidità e di velocità di propagazione delle onde sismiche. Esso è definito in normativa dal valore di velocità delle onde seconde superiore agli 800 m/s. Dato che una determinata distribuzione dell'amplificazione spettrale alle varie frequenze oscillatorie è compatibile con molte diverse combinazioni di spessori e velocità sismiche dei diversi corpi, per ottenere una stima affidabile della distribuzione delle velocità del sottosuolo occorre disporre una calibrazione del sottosuolo derivante da fonti indipendenti, come sondaggi e profili sismici. Il basamento sismico è generalmente sepolto a notevoli profondità, ad eccezione dei settori nord-occidentali dove risale per motivi tettonici, sino a trovarsi a quote piuttosto elevate rispetto al contesto del sottosuolo della Pianura Padana. Il substrato è in genere raggiunto solo da un ridotto numero di pozzi, effettuati in passato per la ricerca di idrocarburi. A queste profondità nel sottosuolo, non sono di norma disponibili misure dirette in pozzo delle velocità sismiche. I pochi dati disponibili (Di Capua e Tarabusi, 2013; Garofalo *et al.*, 2016; Minarelli *et al.*, 2016) mostrano come le velocità delle onde sismiche aumenti con la profondità, non però in modo lineare, dato che esse subiscono brusche accelerazione attraverso varie superfici di discontinuità stratigrafica, che inquadrano le unità deposizionali nel sottosuolo. L'individuazione delle profondità dei limiti discordanti è stata ottenuta utilizzando diversi metodi geofisici, interpretati nel contesto stratigrafico regionale. I principali contrasti di impedenza associati a tali limiti sono stati identificati mediante l'uso di numerose linee sismiche, anche di recente acquisizione (Affatato *et al.*, 2019), e di misure di microtremore che hanno permesso di ricostruire la variazione a diverse frequenze del rapporto tra le componenti oscillatorie orizzontali e verticali (H/V).

L'analisi di questi dati, associata alla stima delle proprietà meccaniche delle diverse unità stratigrafiche regionali, ha permesso di individuare le superfici che generano i principali contrasti di impedenza rilevabili con la tecnica HVSR. La superficie associata al maggior aumento di rigidità e di velocità di propagazione delle onde di taglio (V_s), è raggiunta nel settore nord-occidentale ed individuata in corrispondenza del tetto di successioni marine marnose del Miocene. Esse sono limitate al tetto da una superficie netta, associata ad una discordanza angolare. La superficie risulta ampiamente piegata dalla deformazione tettonica, motivo per cui la si ritrova a profondità notevolmente variabili, che possono raggiungere le molte centinaia di metri nel sottosuolo. Nel settore nord-occidentale del territorio comunale a questa superficie si sovrappongono sedimenti quaternari, prevalentemente continentali, caratterizzati da velocità di propagazione

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

delle onde sismiche marcatamente più basse di quelle del substrato (Di Capua e Tarabusi, 2013). In gran parte del territorio comunale invece le unità oligo-mioceniche sono ricoperte da successioni torbiditiche del Pliocene. Queste areniti si sono deposte in ambienti marini profondi e hanno subito un processo di cementazione e litificazione. Su di esse si sviluppano, in discordanza, le spesse sequenze deposizionali quaternarie, che evolvono, in modo graduale, da sedimenti deposti in ambienti marini profondi verso successioni costiere e deltizie e, successivamente, in corpi sedimentari fluviali.

Dati diretti di velocità delle onde di taglio rilevati in successioni quaternarie in aree prossime a Ferrara (Minarelli *et al.* 2016), mostrano come tra i 200 ed i 300 m di profondità i valori di Vs siano ancora bassi, con velocità spesso inferiori ai 400 m/s. Questi valori non sono evidentemente compatibili con quelli caratteristici del substrato sismico, che va quindi ricercato a maggiori profondità. Questo livello corrisponde verosimilmente ad un picco di risonanza a bassa frequenza e ad un marcato riflettore sismico (Affatato *et al.*, 2019), correlabile con il tetto dei depositi arenacei pliocenici, che possono essere assunti come bedrock sismico in gran parte dell'area di studio. Anche questa superficie è ampiamente deformata dalla tettonica, per cui si ritrova a profondità assai variabili, comprese tra i 400 e gli 800 m.

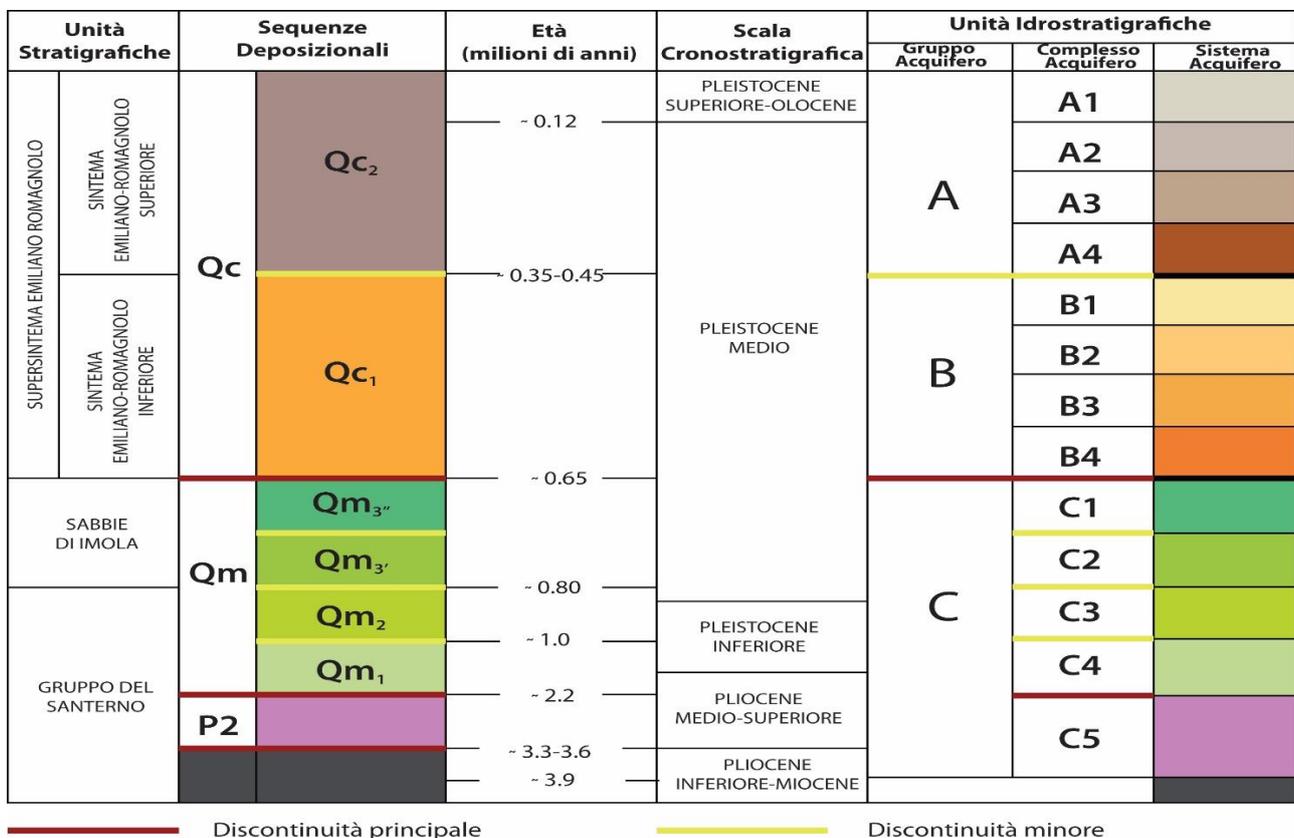


Figura 5-1 - Schema stratigrafico dei depositi plio-quaternari del bacino padano, con indicazione delle principali unità stratigrafiche e superfici di discontinuità, sequenze deposizionali ed unità idrostratigrafiche (da Regione Emilia-Romagna ed ENI-AGIP, 1998).

5.1 Substrato

Ai fini del presente studio, con il termine “substrato” sono qui definite tutte le unità stratigrafiche sottostanti il Quaternario Marino (QM).

Il substrato è generalmente limitato da una superficie di discordanza, legata ad una fase di deformazione e riorganizzazione strutturale dell’Avanfossa Appenninica. Le indagini profonde per la prospezione di idrocarburi da parte dell’ENI-AGIP hanno rivelato che il sottosuolo dell’area indagata registra importanti passaggi laterali di facies, sviluppatisi durante l’evoluzione mesozoica del margine continentale passivo della Tetide.

L’area intorno a Casaglia, ad occidente di Ferrara, è caratterizzata da successioni relativamente poco potenti, simili a quelle della Piattaforma giurassica di Trento, in cui i depositi di piattaforma carbonatica della Formazione dei Calcarei Grigi sono seguiti dai depositi di altofondo pelagico del Rosso Ammonitico. Al contrario, le parti orientali del territorio esaminato sono caratterizzate da successioni giurassiche affini a quelle del Bacino di Belluno, caratterizzate da successioni bacinali fin dalla parte basale del Giurassico. Seguono spessi depositi prevalentemente carbonatici del Mesozoico e del Paleogene. Ai calcari selciferi pelagici del Biancone, seguono i depositi calcareo-marnosi della Scaglia Rossa e della Scaglia Cinerea. Questi depositi si trovano a profondità relativamente ridotte in corrispondenza dell’accentuato alto strutturale di Casaglia. Le successioni terziarie registrano un crescente apporto terrigeno, per cui ai calcari pelagici fanno seguito marne e argille marine.

Nell’area meridionale del territorio indagato, buona parte del Miocene è rappresentata da fanghi deposti in ambienti marini profondi, anche anossici. Durante la deposizione della Formazione Marnoso-Arenacea dell’Appennino, continuata fino al Tortoniano, la zona esaminata era ancora dominata dalla sedimentazione di fanghi argillosi di ambiente marino profondo. Seguono potenti unità torbiditiche del Miocene superiore e del Pliocene, deposte nel bacino d’avanfossa appenninica. Durante le fasi pre-evaporitiche e sin-evaporitiche del Messiniano, al limite meridionale del territorio indagato, si depositavano spessi corpi sabbiosi di conoide torbiditica, con alimentazione dall’area lombarda, ascritti alla Formazione di Bagnolo, secondo la terminologia ENI-AGIP (Ghielmi *et al.*, 2010). Lo spessore di queste unità supera spesso il chilometro. Il Messiniano post-evaporitico è inizialmente caratterizzato da un’ulteriore migrazione verso nord della sedimentazione torbidica, mentre nella maggior parte del territorio indagato si depositavano fanghi di ambiente anossico, arricchiti in carbonio organico, con qualche intercalazione carbonatica. Il Pliocene è inferiormente formato ancora da potenti corpi di torbiditi molto arenacei, ascritti alla

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

Formazione di Canopo, mentre in porzioni centrosettentrionali del territorio continuavano a depositarsi fanghi di rampa.

Nell'area nord-occidentale dell'area indagata, corrispondente alla struttura anticlinale complessa di Casaglia, il Pliocene e parte del Miocene sono invece in lacuna, a causa di eventi di emersione ed erosione, verificatesi durante il Pleistocene inferiore e, verosimilmente, nel Pliocene superiore. Le unità plioceniche furono infatti progressivamente coinvolte nella propagazione verso l'avampaese della deformazione tettonica compressiva. Nell'area indagata, durante il Pliocene, si è infatti sviluppato il fascio di sovrascorrimenti ed anticlinali di rampa che dall'area di Mirandola prosegue verso sud-est, verso Argenta e Ravenna, culminando appunto nell'area fra Bondeno, Casaglia e la periferia occidentale di Ferrara. Questa deformazione sin-sedimentaria ha fortemente influenzato spessori e ambienti deposizionali ed indotto superfici di discordanza stratigrafica e lacuna, legate a periodi di non deposizione od erosione, sia sottomarina che subaerea (Ghielmi *et al.*, 2010). Lacune e discordanze, anche angolari, sono particolarmente diffuse nelle aree corrispondenti ad anticlinali sepolte.

Questi importanti movimenti compressivi indussero quindi una forte differenziazione paleogeografica, in cui le isole emergenti nell'area di Casaglia erano circondate da ambienti di piattaforma e rampa terrigena poco profondo nelle aree settentrionali, mentre nelle parti meridionali dell'area di Ferrara e Coronella si sviluppavano strutture sinclinali subsidenti, inizialmente sede di rapida sedimentazione torbidityca, poi di ambienti marini sottoalimentati, con sedimentazione fine. L'interruzione degli apporti torbidityci fu legata all'innalzamento del fondo marino, dovuto allo sviluppo di strutture compressive e transpressive sinistre nell'area prossima a Mirandola, che hanno deviato i flussi torbidityci a nord ed a sud rispetto all'area di Ferrara. La presenza delle strutture compressive, delle connesse lacune stratigrafiche e delle brusche variazioni laterali di spessore di corpi sedimentari sono ben visibili nel profilo sismico di Figura 5-2 che si estende da Bologna alla periferia occidentale di Ferrara. I depositi prevalentemente torbidityci, compresi fra le superfici di discordanza A e B, sono rappresentati in rosa. Il Quaternario Marino è rappresentato dalle tre unità sovrapposte di colore verde. Notare le lacune e discordanze angolari in corrispondenza della anticlinale di rampa dell'area di San Pietro in Casale-Poggio Renatico. Lacune più pronunciate sono sviluppate sull'Alto di Casaglia, contiguo al limite settentrionale del profilo sismico (Figura 5-2).

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

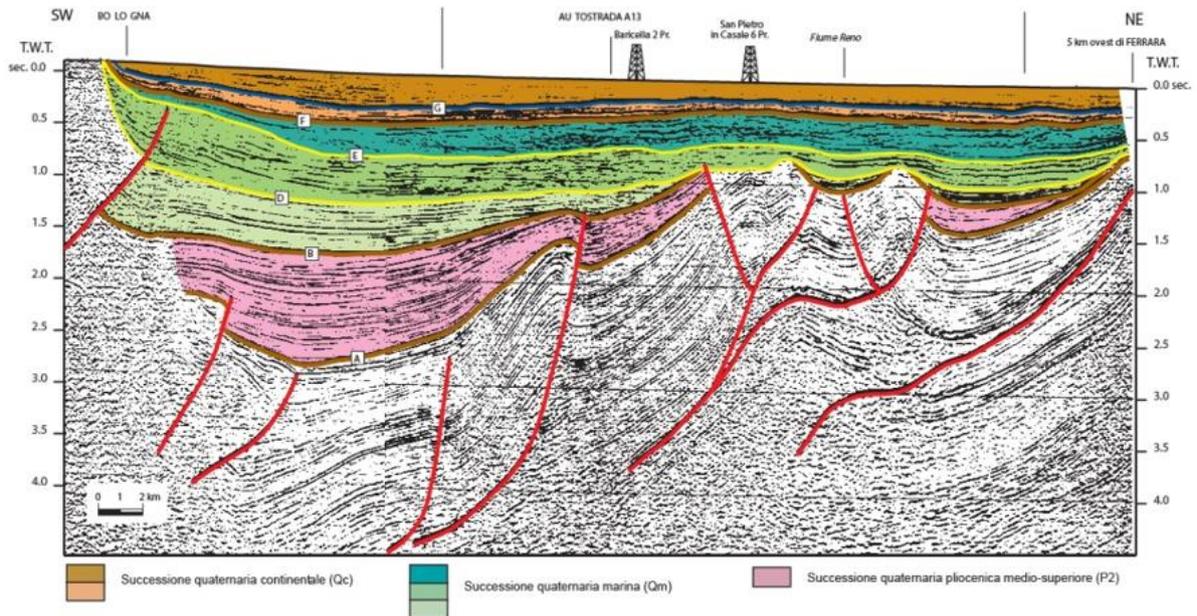


Figura 5-2 - Profilo sismico interpretato tratto da Riserve Idriche Sotterranee della Regione Emilia-Romagna (Regione Emilia-Romagna ed ENI-AGIP, 1998).

5.2 Terreni di copertura

La successione quaternaria è formata da sedimenti assai poco litificati e consolidati, che sono attribuibili, in base alle proprietà elasto-meccaniche ed alla posizione stratigrafica, ai “terreni di copertura”. Questi terreni presentano comunque notevoli variazioni petrofisiche e litologiche interne che ne hanno permesso la suddivisione in una serie di unità stratigrafiche descritte di seguito.

5.2.1 Supersistema Quaternario Marino

Le successioni del Quaternario inferiore sono inquadrare nell’unità stratigrafica del Quaternario Marino e sono formate da argille a foraminiferi platonici, passanti superiormente a facies di prodelta e sabbie di fronte delizio. Queste sequenze si sono deposte nella prosecuzione occidentale dell’antico Mare Adriatico, soggetta a forte subsidenza ed apporto sedimentario. Nel sottosuolo studiato questi sedimenti sono riferiti alla Formazione di Ravenna, da non confondersi con l’omonimo recente Subsistema. Facies deposizionali analoghe sono studiabili in affioramento, nella fascia collinare ai piedi dell’Appennino, in aree ove queste unità sono state innalzate dalla deformazione compressiva tardo-quaternaria. Questi sedimenti argillosi erano tradizionalmente conosciuti come Calabriano, talvolta anche Piacenziano, mentre sono oggi inquadrati nelle unità litostratigrafiche affioranti della Formazione di Castell’Arquato, Argille di Riolo Terme ed Argille di Terra del Sole (Ricci Lucchi *et al.*, 1982). Questa unità, nella pianura ferrarese e bolognese,

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

è raggiunta solo da un limitato numero di sondaggi stratigrafici descritti in modo sufficientemente accurato, generalmente realizzati per fini di ricerca di idrocarburi.

Nell'area considerata, l'unità del Quaternario Marino è in gran parte costituita da argille di mare aperto con spessori di oltre 500 m nella zona di sinclinale meridionale e spessori assai più ridotti nelle zone di alto strutturale. Nelle parti meridionali sinclinali dell'area in esame, i depositi deltizi si sovrappongono, in condizioni di relativa continuità, ai fanghi di mare più aperto e profondo verso nord, gli spessori del Quaternario Marino si riducono rapidamente. L'unità del Quaternario Marino può risultare completamente assente nell'area della culminazione tettonica di Casaglia, ove più recenti depositi continentali quaternari si sovrappongono direttamente sulle successioni di marine mioceniche.

Il Quaternario Marino è frequentemente limitato al tetto da una discordanza stratigrafica, anche angolare, associata ad una lacuna cronologica, che lateralmente passa in condizioni di paraconcordanza. La discordanza è legata alla fase di riorganizzazione strutturale datata a circa 650.000 anni (Regione Emilia-Romagna ed ENI-AGIP, 1998).

5.2.2 Supersistema Emiliano-Romagnolo

La discordanza sopradescritta è stata scelta come limite inferiore del Supersistema Emiliano-Romagnolo, formato, in questa area, da depositi fluviali continentali, intercalati inferiormente da subordinati livelli marini, costieri o salmastri, particolarmente sviluppati nelle aree di sinclinale presenti nella parte più settentrionale del territorio comunale qui analizzato. Il Supersistema Emiliano-Romagnolo registra la prosecuzione di un'evoluzione complessivamente regressiva, che porta da condizioni marine e deltizie alle attuali condizioni francamente continentali. Nell'area indagata, il Supersistema si accumulava nella fascia di interazione fra i depositi di provenienza appenninica e quelli di provenienza padana.

Nel tempo geologico, il fronte dei sedimenti di provenienza appenninica è migrato verso nord, a discapito di quelli padani. Tutte i sedimenti affioranti o presenti nelle prime decine di metri di sottosuolo sono infatti riferibili ai sedimenti del fiume Reno e di altri fiumi di provenienza appenninica.

Il Supersistema Emiliano-Romagnolo è formato da ripetute alternanze di livelli dominati da sedimenti granulari sabbiosi ed altri ricchi di sedimenti fini. Questa alternanza è stata fortemente influenzata dal susseguirsi di fasi glaciali ed interglaciali. Le fasi glaciali sono registrate da depositi fluviali di pianura alluvionale fredda, con granulometrie marcatamente più grossolane di quelle delle fasi interglaciali. Le fasi di massima trasgressione sono caratterizzate da influenze marine, qui presenti solo nella parte bassa del Supersistema.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

Il Supersistema Emiliano-Romagnolo è bipartito in Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI) e Superiore (AES) da una superficie di discordanza, influenzata dalla deformazione tettonica delle Pieghie Ferraresi sepolte, fra 400.000 ed 350.000 anni fa circa.

La discordanza corrisponde, in questa area, alla definitiva scomparsa di intervalli con chiari caratteri marini.

5.2.2.1 Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore

Il Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI) costituisce la parte più bassa del Supersistema Emiliano-Romagnolo e di norma si sviluppa a notevoli profondità. La caratterizzazione di quest'unità è stata effettuata sulla base delle informazioni ottenute attraverso sondaggi stratigrafici profondi, realizzati nell'ambito del progetto CARG dalla Regione Emilia-Romagna (Foglio 203 "Poggio Renatico", Foglio 204 "Portomaggiore"), oltre che di diversi log di pozzo per idrocarburi ENI-AGIP (Baura, Casaglia, Cona, Ferrara, Pavonara, Pontelagoscuro, Porotto).

Mai affiorante nell'area di studio, il Sintema è troncato superiormente dalla netta discordanza erosiva ed angolare costituente il tetto dell'unità. Nei settori meridionali maggiormente subsidenti, il Sintema può raggiungere spessori di varie centinaia di metri, mentre può risultare del tutto assente nelle aree più nord-occidentali, in corrispondenza della Dorsale Ferrarese sepolta, come ad esempio nei pozzi di Casaglia. Ove presente, il Sintema è dominato da facies marine e deltizie, costituite da alternanze cicliche di depositi fini argilloso-limosi a foraminiferi marini e depositi prevalentemente sabbiosi, riferibili ad associazioni di facies di piana fluvio-deltizia, che superiormente possono sfumare in depositi di piana alluvionale (sondaggio 203-S9 e campi pozzi per idrocarburi: Baricella, Cona, Marrana, Minerbio, Montalbano, Pieve di Cento, S. Pietro in Casale, La Selva, Spinazzino).

Sulla base della posizione stratigrafica, l'unità è attribuita al Pleistocene medio, cioè nell'intervallo temporale compreso tra i 650.000 e 350.000 anni (Regione Emilia-Romagna ed ENI-AGIP, 1998).

5.2.2.2 Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore

Il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES) costituisce la porzione superiore del Supersistema Emiliano-Romagnolo. Al margine dell'Appennino ed in corrispondenza della Dorsale Ferrarese, la sua base corrisponde ad una discordanza erosiva ed angolare che taglia depositi marini mio-pliocenici. Nel sottosuolo di vasti settori di alta pianura, il limite inferiore è marcato dalla sovrapposizione di corpi ghiaiosi di conoide alluvionale su una discordanza erosiva, incisa in depositi fluviodeltizi di AEI. Procedendo verso NE, in porzioni più distali della pianura, il limite risulta meno marcato e paraconcordante. In queste aree, il limite fra i due sistemi corrisponde alla brusca sovrapposizione di sabbie alluvionali (AES)

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

su depositi prevalentemente fluvio-deltizi ed argille marine (AEI). Lo spessore di AES varia da poche decine di metri, nei pressi della fascia pedeappenninica (es. Foglio 240 "Forlì"), ai 70 m circa nell'area dell'anticlinale di Casaglia, fino ad oltre 500 m in corrispondenza del margine costiero (es. Foglio 187 "Codigoro"). Gli spessori medi si aggirano sui 200-300 m in corrispondenza delle zone di bassa pianura (es. Foglio 204 "Portomaggiore").

La base del Sintema è attribuita, per posizione stratigrafica, al Pleistocene medio (350.000-450.000 anni secondo Regione Emilia-Romagna ed ENI-AGIP, 1998). Il limite superiore corrisponde invece all'attuale superficie topografica ed appartiene alla parte più recente dell'Olocene.

L'intero Sintema è organizzato in quattro o cinque cicli deposizionali trasgressivo-regressivi, ciascun avente uno spessore approssimativamente di un centinaio di metri. Le facies trasgressive marino-costiere non sembrano estendersi in AES più a sud dell'allineamento Molinella-Altedo-S.Pietro in Casale, avvicinandosi al limite sud-orientale dell'area di Ferrara solo nella parte inferiore del Sintema AES.

La porzione *trasgressiva* basale di ciascun ciclo è caratterizzata dalla frequente presenza di argille organiche di piana alluvionale, palude e piana costiera, con occasionali intercalazioni di sabbie litorali o fanghi salmastri. Il limite inferiore di ognuno di questi cicli rappresenta una superficie di disattivazione della sedimentazione fluviale grossolana singlaciale e si collega nel settore litorale con una superficie di ingressione marina. La porzione *regressiva* di ciascun ciclo è formata da depositi fini di piana alluvionale, in cui le sabbie di canale fluviale sono subordinate e presenti solo come corpi nastriformi isolati. Al tetto del ciclo, le sabbie di canale fluviale risultano più abbondanti, fino alla formazione di corpi sabbiosi composti, lateralmente estesi in tutto il sottosuolo della bassa Pianura ferrarese.

6 Interpretazioni e incertezze

In questo capitolo vengono esaminate le principali scelte interpretative che hanno guidato gli approfondimenti geologico-sismici del Comune di Ferrara. Saranno quindi evidenziate ragioni ed elementi a supporto delle interpretazioni effettuate, valutando al contempo inevitabili incertezze ad esse connesse ed eventuali criticità rilevate nell'ambito dello studio.

6.1 Frequenza naturale dei terreni (f_0)

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

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

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

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

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

Viste le problematiche rilevate è stato necessario realizzare 48 registrazioni prima di ottenere 37 misure di sismica passiva a stazione singola affidabili. In fase di elaborazione dei dati, infatti, si è potuta spesso accertare la presenza di disturbi a varie frequenze, di chiara origine antropica, che hanno portato a scartare diverse misure realizzate.

Le nuove registrazioni di microtremore (paragrafo 4.2.1.4) sono state estese a tutto il territorio comunale privilegiando ambiti privi di dati pregressi e, quando possibile, sono state ubicate lungo tracce di sezioni geologiche disponibili (cfr. Allegato 1) al fine di identificare i principali contrasti di impedenza nella successione stratigrafica e stimare la profondità del substrato sismico (si veda paragrafo 5.1).

Quasi la metà delle acquisizioni ha avuto durata media di 60 minuti e sono state analizzate con finestre di 60 secondi, in modo da poter meglio indagare le basse frequenze. Come già detto, alcune di esse sono state effettuate in notturna, in particolare nell'area urbana e periferica della città; questo si è reso necessario per limitare l'effetto dei transienti legati al traffico veicolare e ferroviario e ad altre attività antropiche in genere. Le misure di lunga durata hanno permesso di individuare picchi a bassa frequenza, compresi tra 0,2 e 0,5 Hz, la cui presenza è avvalorata da lavori scientifici pubblicati su riviste internazionali (e.g. Mascandola *et al.*, 2019; Mascandola *et al.*, 2017; Milana *et al.*, 2014).

Questi picchi a bassa frequenza non sono sempre visibili nelle misure HVSR pregresse disponibili. L'assenza di tali evidenze è in gran parte legata alle caratteristiche della strumentazione, ai tempi di

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

acquisizione delle registrazioni e all'approccio di elaborazione. Gran parte delle misure pregresse sono state infatti realizzare con strumentazione poco sensibile alle basse frequenze, dotata di sensori a 4,5 Hz. Altri fattori che compromettono la "visibilità" dei picchi a bassa frequenza sono certamente legati ai tempi di acquisizione, in genere non superiori a 30 minuti, e ad elaborazioni eseguite con finestre non più lunghe di 30 secondi. Nonostante l'inevitabile disomogeneità ed il differente grado di affidabilità delle numerose misure di rumore sismico ambientale disponibili, è stato comunque possibile identificare in modo sufficientemente chiaro le frequenze di vibrazione caratteristiche del territorio indagato.

Le misure di microtremore analizzate mostrano, in genere, un picco di frequenza prevalente compreso tra 0,6 e 0,9 Hz. Un secondo picco a frequenze più basse ($< 0,5$ Hz) è inoltre visibile in buona parte delle misure eseguite sul territorio comunale ad eccezione di quelle realizzate nella porzione nord-occidentale, dove il picco a bassa frequenza risulta pressoché assente. Tali osservazioni hanno dettato la scelta di realizzare due distinte carte delle frequenze di risonanza dei terreni relative agli intervalli di frequenza compresi tra 0,1 e 0,5 Hz e maggiori di 0,5 Hz (Tavole C1₁₊₉ e Tavole C2₁₊₉, paragrafo 8.3).

Dall'analisi delle ampiezze dei picchi rilevati per frequenze maggiori di 0,5 Hz è inoltre possibile notare importanti variazioni a livello comunale. Nella zona nord-occidentale, i valori di ampiezza della frequenza di picco sono sempre molto elevati e variabili tra 6 e 8,5.

L'osservazione è confermata anche dall'analisi H/V sul dato in continuo della stazione accelerometrica della rete sismica nazionale denominata "FERS" (http://itaca.mi.ingv.it/ItacaNet_30/#/station/IV/FERS). Questo indica che nell'area più occidentale del territorio comunale esiste un elevato contrasto di impedenza acustica all'interno della successione stratigrafica. I valori di frequenza rilevati, le stratigrafie dei pozzi ed i profili di velocità delle onde di taglio (Vs) disponibili individuano il contrasto a profondità variabili tra 130 e 200 m, al passaggio tra i terreni di copertura e il substrato sismico.

Nelle restanti aree del territorio comunale le ampiezze relative alle frequenze di picco nell'intervallo 0,5 - 1 Hz sono invece molto inferiori e sempre compresi tra 2 e 4. Questo indica la presenza di contrasti minori nella successione stratigrafica e che il substrato sismico deve essere ricercato a maggiori profondità rispetto a quelle indicate per l'area di Casaglia.

6.2 Substrato rigido

Confrontando e correlando i dati geofisici con le sezioni stratigrafiche disponibili (Allegato 1) si è tentato di associare i contrasti di impedenza alle discontinuità stratigrafiche che separano le principali unità riconosciute nel sottosuolo a scala regionale.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

Le associazioni proposte contengono un notevole grado di incertezza legato alle caratteristiche intrinseche del contesto deposizionale, costituito da successioni stratigrafiche che mostrano, in genere, bassi contrasti di impedenza e graduali incrementi delle velocità delle onde sismiche con la profondità.

Per tentare di convalidare le attribuzioni sono stati inoltre analizzati i dati di alcuni pozzi per idrocarburi presenti nel territorio comunale di Ferrara e quelli di alcune misure di microtremore realizzate nell'ambito della microzonazione sismica di Vigarano Mainarda (FE). Oltre a ciò sono stati considerati i dati di Vs provenienti dall'indagine di down-hole profondo eseguite a Casaglia (185070P503) ed a Mirabello (FE) per gli studi di microzonazione.

La Figura 6-1 mostra l'ubicazione delle principali indagini e delle sezioni geologiche utilizzate per la definizione del substrato sismico. In Figura 6-2 e Figura 6-3 sono invece schematizzati i risultati delle indagini eseguite e le interpretazioni proposte, ottenute dalle correlazioni tra dati geofisici e stratigrafici.

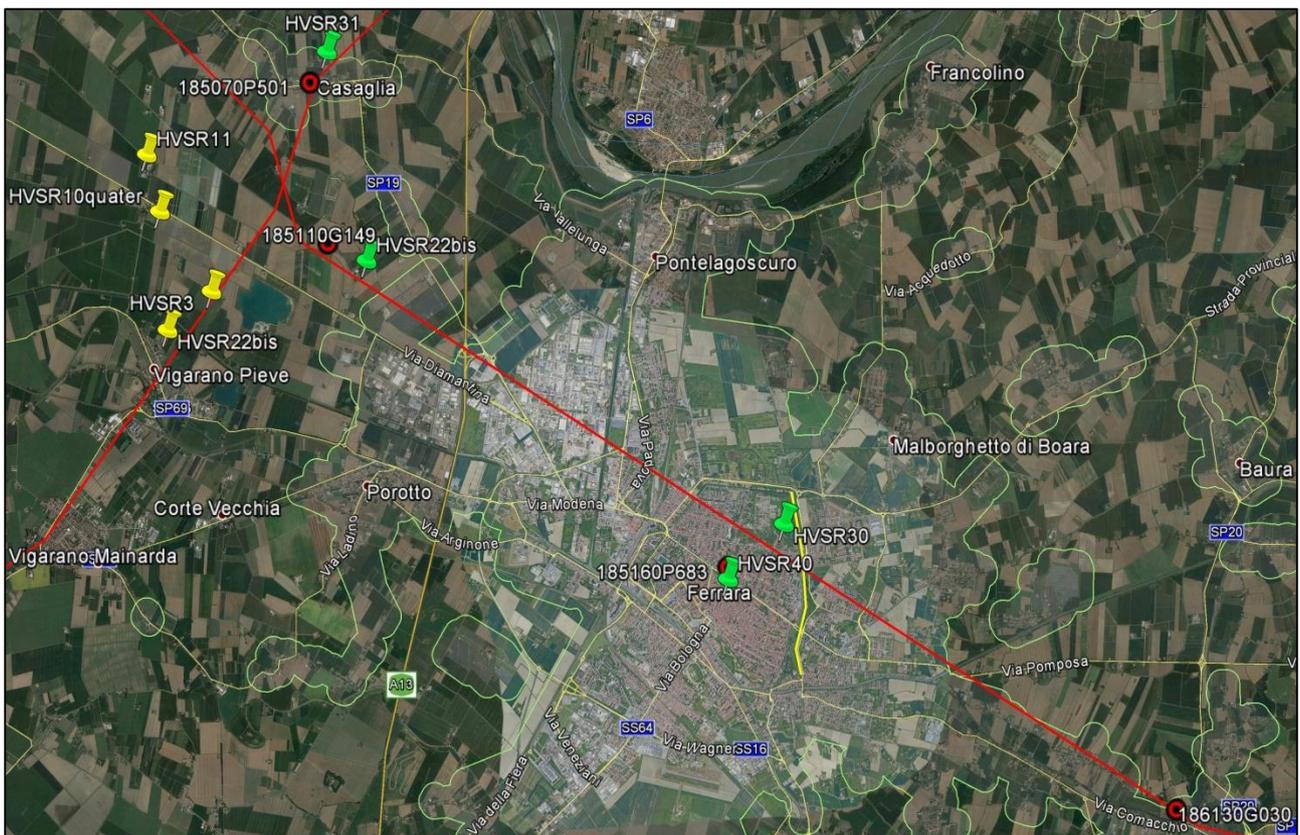


Figura 6-1 - La mappa riporta i principali elementi utilizzati per la definizione del substrato sismico. Le tracce rosse rappresentano porzioni di sezioni geologiche di bibliografia (Sezione B-B' e Sezione J-J' - Allegato 1). In verde sono rappresentate le ubicazioni delle misure HVSr realizzate per gli approfondimenti geologico-sismici di Ferrara, mentre in giallo sono indicate quelle eseguite nell'ambito della microzonazione sismica di Vigarano Mainarda (Figura 6-2). In rosso sono inoltre indicati i carotaggi profondi utilizzati per le correlazioni stratigrafiche, mentre la traccia gialla nel centro storico mostra la linea di sismica a riflessione realizzata dall'Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica di Trieste nell'ambito del Progetto di Ricerca "CLARA".

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

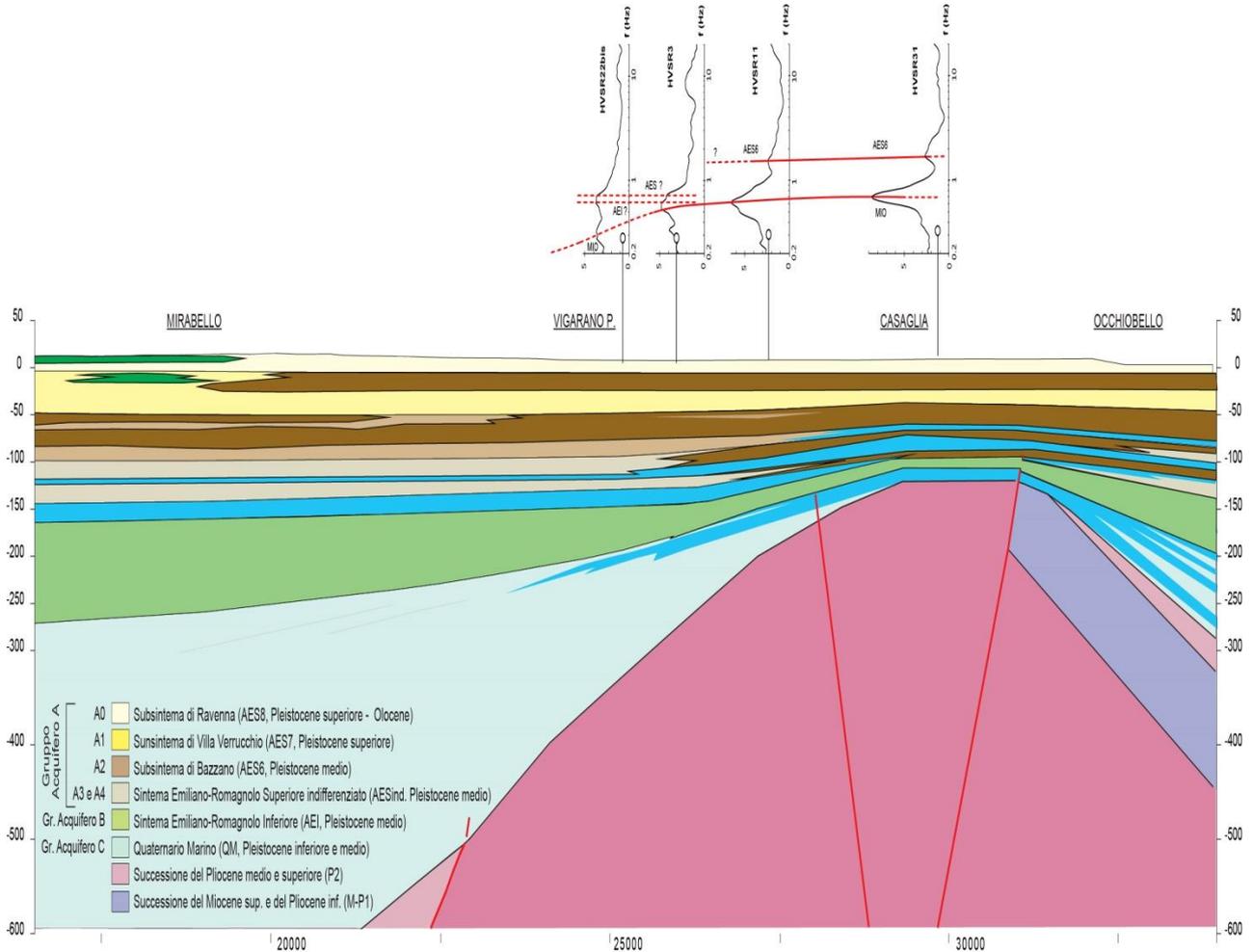


Figura 6-2 - Porzione settentrionale della sezione geologica "Cento-Occhiobello" della Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna (Martelli *et al.*, 2017 - Allegato 1, sezione J-J'). Sulla sezione sono riportate le curve di ellitticità ottenute dalle misure HVSR eseguite per la microzonazione di Vigarano Mainarda e Ferrara. I picchi di H/V sono stati correlati tra loro ed associati, utilizzando i valori di Vs ottenuti da down-hole profondo (185070P503), alle superfici stratigrafiche caratterizzate dai maggiori contrasti di impedenza.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

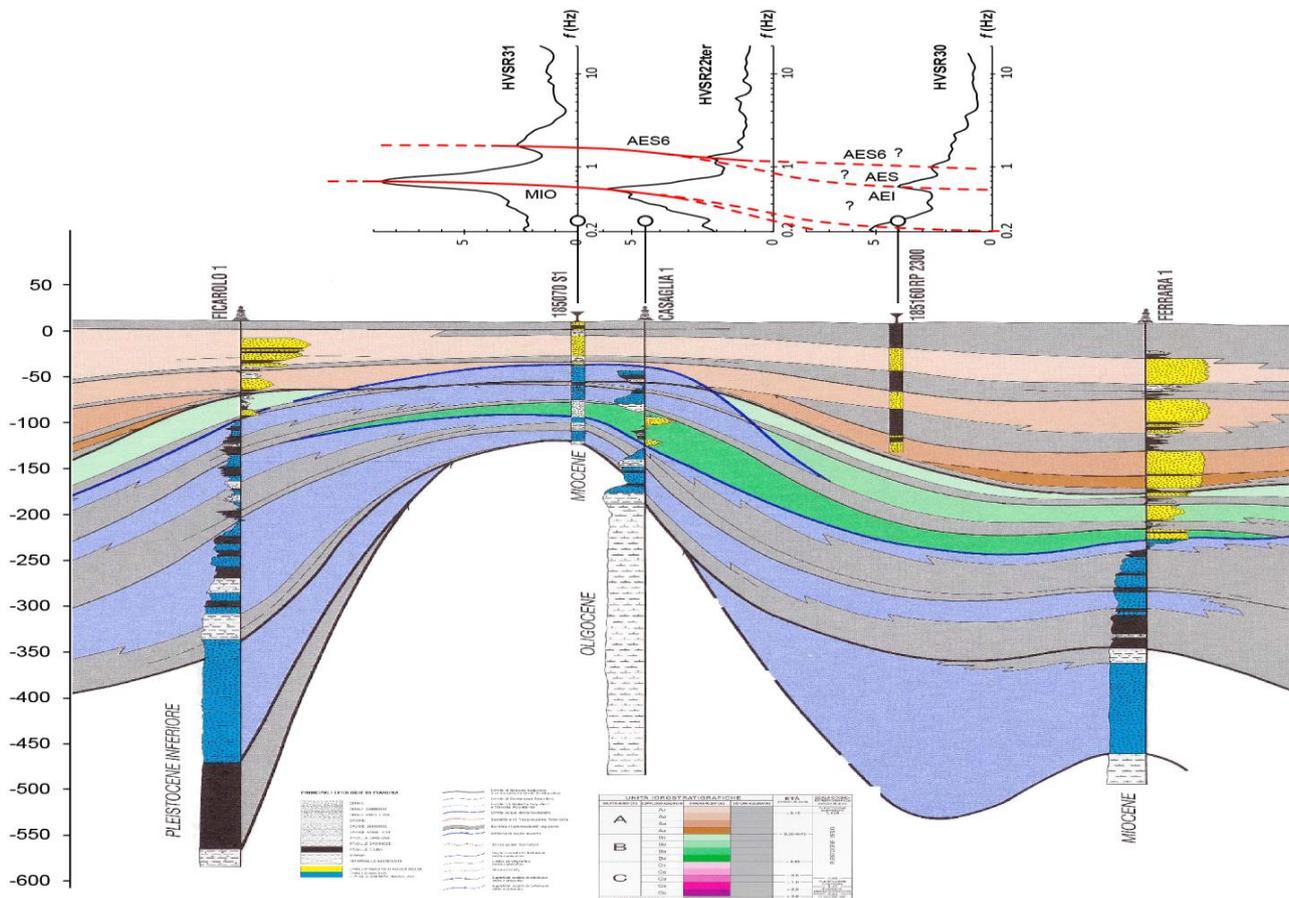


Figura 6-3 - Porzione centro-orientale della sezione geologica estratta dallo studio sulle “Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna” (1998) riportata in nell’Allegato 1 (sezione B-B’). Sulla sezione, passante per il centro storico di Ferrara, sono riportate le curve di ellitticità ottenute dalle misure HVSr realizzate per la microzonazione di Ferrara e Vigarano Mainarda. I picchi di H/V sono stati correlati tra loro e tentativamente associati a superfici stratigrafiche caratterizzate dai più marcati contrasti di impedenza.

I picchi a più alta frequenza, variabili a seconda dei settori geografici tra 1,5 - 0,85 Hz, possono essere messi in relazione con il tetto del complesso acquifero A2 (Figura 6-2 e Figura 6-3) che corrisponde al tetto del Subsistema di Bazzano (AES₆) (Figura 5-1), datato circa 125.000 anni (Regione Emilia-Romagna ed ENI-AGIP, 1998). Questa correlazione è già stata proposta in altri studi di microzonazione sismica della pianura emiliana (es. Comuni di Mirabello, Sala Bolognese, Poggio Renatico).

In gran parte del territorio comunale, frequenze tra 0,7 e 0,6 Hz possono invece essere messe in relazione ad un contrasto più profondo che corrisponde alla discontinuità che separa il Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES) da quello Inferiore (AEI). Quest’ultima correlazione non risulta però valida per le aree nord-occidentali (cfr. Casaglia) dove in questo intervallo di frequenze è presente un forte contrasto di impedenza, associato al tetto del substrato sismico, in corrispondenza delle unità marnose mioceniche.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

La correlazione con il substrato sismico è validata da dati diretti di pozzo acquisiti nell'area di Casaglia (185070P503), sia per quanto riguarda la stratigrafia che per le velocità delle onde di taglio Vs. L'andamento e la posizione stratigrafica delle principali superfici di discontinuità descritte si evince dalle sezioni realizzate dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna (v. Allegato 1 e Figura 6-2, Figura 6-3), mediante correlazioni su scala regionale di sondaggi stratigrafici profondi e profili sismici.

Secondo i sondaggi e le sezioni geologiche disponibili, la profondità del tetto del Subsistema di Bazzano (AES₆) varia tra i 45 ed i 70 m, con le profondità minori in corrispondenza dei settori nord-occidentali. Il Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI) risulta invece sepolto a profondità variabili tra 100 e 160 m con quote minori registrate sempre nei settori più occidentali. Il tetto delle unità marnose mioceniche è invece sepolto a profondità intorno ai 150 m nell'area compresa tra Casaglia, Ravalle e Porporana, mentre raggiunge profondità di molte centinaia di metri nelle altre porzioni del territorio comunale con valori massimi nelle aree meridionali.

Le profondità di dette superfici e le frequenze misurate risultano in sostanziale accordo con la relazione che lega le frequenze fondamentali desunte da analisi di sismica passiva, con i valori di velocità delle onde di taglio disponibili in bibliografia e le profondità dei suddetti contrasti di impedenza.

Come anticipato al capitolo 5, il tetto del Subsistema di Bazzano (AES₆) e quello del Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AES) non possono, però, essere considerati come *bedrock sismico*. Valori di velocità delle onde di taglio acquisiti in pozzo mediante tecniche cross-hole e down-hole (Di Capua e Tarabusi, 2013; Garofalo *et al.*, 2016; Minarelli *et al.*, 2016), dimostrano, infatti, come le unità stratigrafiche del Quaternario Superiore siano caratterizzate, in aree di bassa pianura alluvionale, da valori di Vs in media inferiori ai 400 m/s. Tali valori non sono chiaramente compatibili con quelli caratteristici di un "*bedrock sismico*" di riferimento per le analisi di risposta sismica locale. Tale livello di riferimento deve, quindi, essere ricercato a profondità più elevate, associato a frequenze di picco più basse.

Misure di microtremore di lunga durata hanno permesso di individuare, su larga parte del territorio comunale, picchi a frequenze inferiori a 0,5 Hz. Le basse frequenze, in genere comprese tra 0,2 e 0,35 Hz, sono state frequentemente rilevate in altre misure di microtremore, eseguite in comuni limitrofi per scopi di microzonazione sismica. La presenza di contrasti alle basse frequenze in area emiliana è inoltre avvalorata da lavori scientifici pubblicati su riviste internazionali (e.g. Mascandola *et al.*, 2019; Mascandola *et al.*, 2017; Milana *et al.*, 2014).

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

Riflettori sismici e contrasti di impedenza ad elevate profondità sono stati individuati anche nell'area urbana di Ferrara mediante recenti rilievi di sismica a riflessione. I rilievi mostrano un importante riflettore associato ad una marcata discordanza stratigrafica, posta alla profondità di circa 400 m nella parte meridionale della città. Questa superficie si abbassa rapidamente verso nord, sino a raggiungere profondità di circa 750 m (Affatato *et al.*, 2019). La discordanza, su cui poggiano le successioni quaternarie, si approfondisce anche verso meridione (Figura 6-2) ed è riconoscibile attraverso buona parte delle pieghe ferraresi sepolte.

Questa superficie di discordanza, che verosimilmente limita superiormente corpi di torbiditi arenacee plioceniche, è stata assunta come tetto del substrato sismico in larga parte del territorio esaminato, ad eccezione delle aree nord-occidentali in cui il substrato sismico corrisponde alle unità marnose mioceniche.

6.3 Terreni suscettibili di liquefazione

Una delle maggiori incertezze emersa durante gli approfondimenti geologico-sismici eseguiti per il Comune di Ferrara ha riguardato l'individuazione e la perimetrazione delle aree potenzialmente soggette a fenomeni di liquefazione cosismica. In un contesto di pianura alluvionale, caratterizzato da una elevata variabilità spaziale nella distribuzione dei depositi sedimentari, la ricostruzione delle geometrie dei corpi granulari assume un ruolo cruciale per la corretta mappatura delle aree liquefacibili.

Una prima distribuzione delle aree liquefacibili era stata fornita dagli studi di microzonazione sismica realizzati dall'Università di Ferrara (Fioravante e Giretti, 2013) dopo gli eventi sismici del 2012 (<https://geo.regione.emilia-romagna.it/schede/pnsrs/index.jsp?id=38008>). Dopo tali studi le conoscenze geologiche sull'area sono notevolmente aumentate grazie alla realizzazione della cartografia geologica di superficie e di modellazioni tridimensionali dei corpi sedimentari presenti nel sottosuolo. Tali attività, realizzate dallo stesso gruppo di lavoro che ha redatto il presente studio, hanno permesso di costituire un'ampia banca dati di indagini geognostiche su cui sono basati i nuovi approfondimenti.

Le informazioni derivanti dalla cartografia geologica di superficie, unite a quelle provenienti dalle indagini geognostiche e dalle modellazioni tridimensionali di sottosuolo, hanno permesso di discriminare spessore e geometrie dei corpi potenzialmente liquefacibili. Ciò ha condotto ad una profonda revisione nella distribuzione ed estensione delle zone verosimilmente soggette a tali fenomeni, rispetto a quanto indicato nei precedenti studi. Queste aree, che costituiscono circa il 45% del territorio analizzato, sono state indicate come "instabili" nella Carta delle aree suscettibili di effetti locali (paragrafo 7.3 - Tavole D₁₋₉) e

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

come “zone di attenzione per liquefazioni” nelle cartografie relative agli approfondimenti di secondo livello (Tavole dalla F₁₊₉ alla N₁₊₉).

Analisi numeriche eseguite su più di 400 indagini penetrometriche con piezocono (cfr. paragrafo 7.3.1) hanno permesso di verificare puntualmente la presenza di corpi liquefacibili ed ottenere per essi stime quantitative sul rischio di accadimento del fenomeno.

Gli approfondimenti eseguiti hanno ridotto notevolmente le incertezze relative alla distribuzione ed alle caratteristiche geotecniche dei corpi suscettibili a liquefazione.

Queste instabilità riguardano prevalentemente le aree situate in corrispondenza di paleoalvei, principali o secondari, di ventagli da rotta e depositi di tracimazione costituiti da sedimenti limoso-sabbiosi posti sottofalda. Questi depositi possono costituire lenti isolate e di limitata estensione o spessi corpi coalescenti in grado formare anche estese successioni sabbiose nelle prime decine di metri di sottosuolo.

L’elevata variabilità laterale nella distribuzione dei depositi sedimentari, non permette quindi di escludere in senso assoluto la presenza di locali livelli granulari saturi anche in porzioni di territorio non classificate come “zone di attenzione per liquefazioni”. Questa affermazione risulta ancor più veritiera nelle aree meno documentate da prove geognostiche, che nel caso specifico riguardano principalmente le zone rurali. Per tali ragioni la valutazione sito specifica del rischio di liquefazione è comunque sempre delegata ad ulteriori indagini geognostiche, da realizzarsi, ad esempio, in occasione di nuove fasi di pianificazione territoriale e/o nella progettazione esecutiva di eventuali interventi.

7 Metodologie di elaborazione e risultati

La finalità di uno studio di microzonazione sismica è giungere ad una suddivisione del territorio esaminato in zone a diversa pericolosità sismica, in base alla loro suscettibilità ad effetti locali cosismici. Le zone sono classificate come stabili, nel caso in cui non si ipotizzino effetti locali di alcuna natura, e come suscettibili di amplificazioni locali, qualora siano attese esclusivamente amplificazioni del moto sismico dovute all’assetto litostratigrafico e morfologico. Qualora siano invece possibili, oltre ai fenomeni di amplificazione, effetti di deformazione permanente del suolo, le zone sono identificate come suscettibili di instabilità.

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

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

In contesti di pianura, in cui la ricostruzione del sottosuolo è basata essenzialmente su informazioni derivanti da indagini puntuali, in numero anche molto rilevante e con distribuzione eterogenea, il compito del geologo può risultare particolarmente gravoso. Per agevolare tale compito la ricostruzione dei primi 30 m di sottosuolo è stata ottenuta integrando la tradizionale interpretazione delle facies sedimentarie e delle geometrie deposizionali, con i risultati di tecniche innovative di interpolazione numerica dei dati geognostici del sottosuolo urbano.

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

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

7.1 Modello numerico del sottosuolo

Il modello numerico interpolato del sottosuolo di Ferrara consente di valutare l'estensione dei corpi sabbiosi sepolti di un'ampia porzione del territorio comunale, corrispondente alla totalità dell'area urbana, in cui risiede la grande maggioranza degli abitanti. L'area oggetto dell'interpolazione e modellazione numerica corrisponde alle sezioni topografiche al 10.000 della Carta Tecnica Regionale 185120 "Pontelagoscuro" e 185160 "Ferrara", e si estende in latitudine dal Po a quella del casello autostradale "Ferrara Sud" ed in longitudine dall'area della Piccola e Media Industria a quella di Francolino. L'elaborazione di tale modello è stata realizzata partendo da un esteso archivio di dati geognostici, composto, in particolare, da prove penetrometriche e sondaggi. Sulla base delle elaborazioni è stato possibile estendere la caratterizzazione basata sui dati puntuali disponibili ad aree caratterizzate dalle medesime proprietà litologiche (Figura 7-1).

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

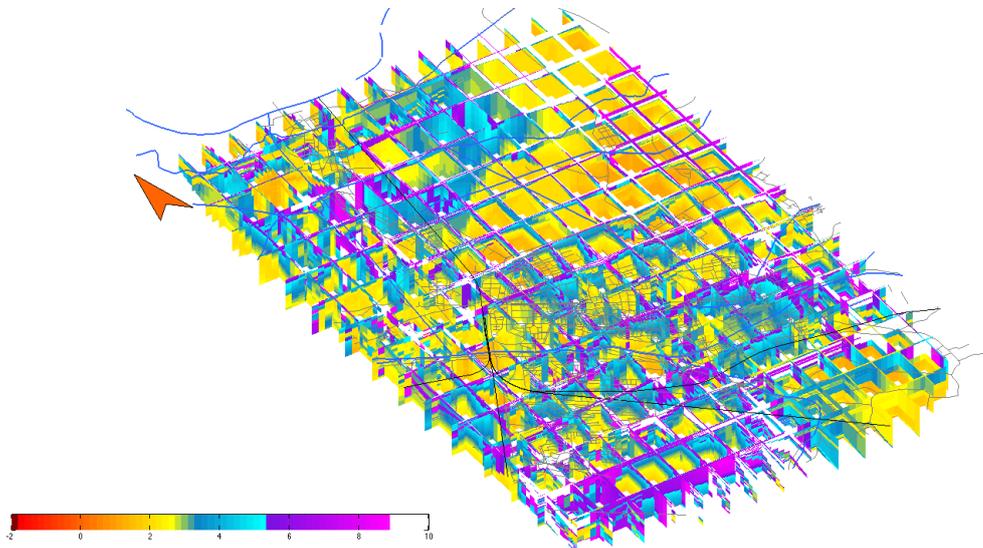


Figura 7-1 - Versione preliminare del modello numerico di sottosuolo, interpolato sulla base di un sottoinsieme limitato delle prove disponibili, circa 400. La scala cromatica rappresenta la granulometria dei sedimenti, espressa in classi di phi. Interpolazione lineare discretizzata a passo orizzontale pari a 250 m, passo verticale pari a 1 m. Profondità massima del modello 50 m sotto il livello del geoide. In questa versione è possibile riconoscere, in modo grossolano, il tetto delle sabbie singlaciali, che verso sud-ovest passano a depositi più fini di provenienza appenninica, e l'andamento dei principali corpi di paleoalveo.

7.1.1 Dati utilizzati

All'interno dell'area del modello sono state utilizzate 1.887 indagini, tipologicamente distinte come in Tabella 7-1.

TIPOLOGIA DI PROVA	SIGLA	NUMERO
Prove penetrometriche statiche con punta meccanica	CPT (C)	666
Prove penetrometriche statiche con piezocono	CPTu (U)	53
Prove penetrometriche statiche con cono sismico	SCPTu (B)	53
Prove penetrometriche dinamiche	DN (D)	61
Sondaggi a carotaggio continuo	S (P4, P5)	857
Pozzi per acqua	PA (P6, P7)	197
	TOTALE	1.887

Tabella 7-1 - Numero di indagini pregresse raccolte ed utilizzate per la modellazione, suddivise per tipologia.

L'analisi dell'elevato numero di prove raccolte nella banca dati già descritta ha richiesto l'implementazione di procedure elaborazione numerica che ne consentissero un rapido confronto e verifica. L'elevata mole di dati se da un lato costituisce un punto di forza per l'indagine, dall'altro ne ha resa l'elaborazione numerica più complessa e onerosa dal punto di vista informatico.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

Per questa analisi sono state concepite nuove metodologie geostatistiche e realizzati modelli numerici bidimensionali e tridimensionali che hanno consentito di rappresentare le proprietà litologico-granulometriche e geometriche dei corpi di sottosuolo. Tali tecniche hanno tenuto conto delle tre caratteristiche principali del database di partenza:

- l'elevato numero di prove disponibili, talvolta costituite da migliaia di informazioni per singolo sito di indagine, ad esempio le SCPTu;
- la distribuzione irregolare delle prove all'interno dello spazio tridimensionale (Figura 7-2). Le prove risultano, infatti, fortemente addensate nelle aree di recente urbanizzazione e molto sparse nelle aree a vocazione rurale;
- la disomogeneità dell'informazione, dato che nel caso di sondaggi a carotaggio continuo la registrazione costituisce una classificazione sedimentologica con occasionali annotazioni di carattere paleontologico, petrografico e pedogenetico, mentre nel caso di prove penetrometriche vengono acquisiti valori di resistenza alla punta e attrito laterale non direttamente associabili ad una litologia.

Per risolvere la criticità legata all'elevato numero di prove si è provveduto ad elaborare algoritmi efficienti di interpolazione che ricostruiscano la distribuzione dei sedimenti in ambienti di piana alluvionale, quali corpi sabbiosi nastriformi, corpi argillosi/limosi tabulari ecc.. La seconda criticità è stata affrontata raffittendo, per quanto possibile, il numero di prove disponibili, raccogliendo una banca dati completa ed aggiornata. Infine, per risolvere l'ultima criticità si è reso necessario adottare un sistema classificativo omogeneo, mediante l'applicazione di metodologie già testate in ambiti analoghi.

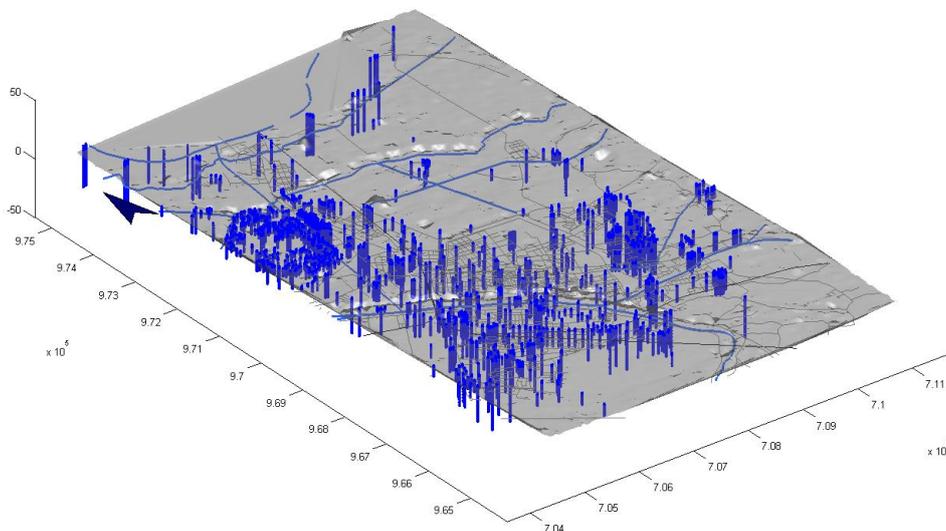


Figura 7-2 - Distribuzione geografica delle prove e loro profondità all'interno dell'area del modello.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

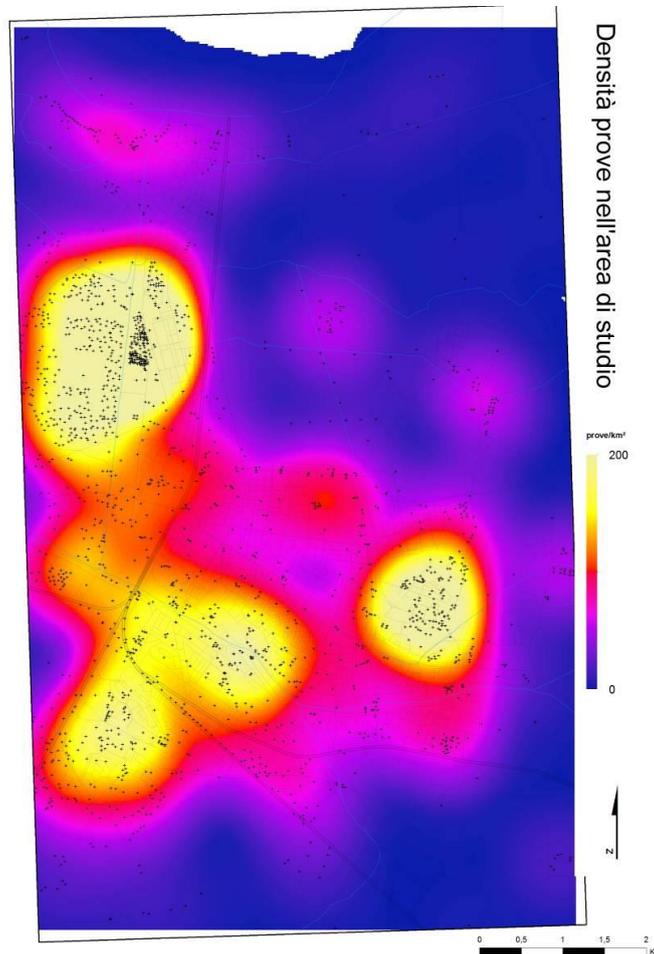


Figura 7-3 - Densità di prove per unità di superficie. Le prove sono abbondanti nei quartieri di recente espansione, nel sito inquinato delle discariche del settore di via Caretti e nel polo petrolchimico, si rarefanno invece nel centro storico e mostrano una densità insufficiente nelle aree agricole periurbane.

7.1.2 Algoritmi di conversione tra i vari formati di dato

Come precedentemente discusso, la ricostruzione tridimensionale del sottosuolo si è basata su di una banca dati ricca, ma assai disomogenea, per tipologia di prove, profondità raggiunte e distribuzione spaziale. Prima di poter eseguire l'elaborazione informatica dei dati di sottosuolo, si è dovuto ricondurre l'eterogenea molteplicità delle sorgenti di informazioni ad una classificazione comune ed omogenea, necessariamente di natura discreta e semplificata. Questa riclassificazione omogenea è stata operata sia sui dati da carotaggio che sulle prove penetrometriche.

Nel caso delle stratigrafie derivati da carotaggi continui, l'attribuzione alla classe litologica è avvenuta mediante una tavola sinottica, che fornisce una corrispondenza fra categorie litologiche e semplici codici numerici (Tabella 7-2). I valori assegnati corrispondono alle medesime classi litologiche derivate in via

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

indiretta dalla codifica delle prove penetrometriche. La classificazione non è biunivoca, dato che vari termini litologici possono corrispondere ad un singolo attributo numerico. Questa classificazione discreta delle descrizioni litologiche è stata realizzata sia sulle molte centinaia di descrizioni stratigrafiche pregresse, sia nei carotaggi stratigrafici che si sono potuti direttamente esaminare e descrivere dal punto di vista sedimentologico. Ovviamente, è stato possibile riversare in una descrizione numerica fortemente simbolica e semplificata solo una piccola parte delle informazioni contenute nelle descrizioni sedimentologiche, paleontologiche e petrografiche.

Tra le varie tipologie di dati, le prove penetrometriche sono risultate quelle di più complessa gestione informatica, nonostante la loro natura intrinsecamente numerica. Per poter rendere confrontabili gli attributi informatici che rappresentano le proprietà dei sedimenti, in sondaggi e penetrometrie, in queste ultime si sono identificate classi litologiche con comportamento geomeccanico omogeneo. Tra le molte classificazioni discusse in letteratura (es. Lo Presti *et al.*, 2009 e Robertson e Cabal, 2012), si è deciso di adottare una versione semplificata del *Soil Behaviour Type* (SBT) di Robertson *et al.*, (1986), illustrata in Figura 7-4. Il diagramma è stato sviluppato per determinare in maniera quanto più possibile accurata le caratteristiche di un ampio spettro di terreni. Esso comprende quindi anche litotipi non presenti nell'area esaminata. La classificazione considera solo lo sforzo meccanico necessario per fare avanzare la penetrazione della punta (q_c) e l'attrito laterale sviluppato sul manicotto, posto sopra la punta stessa (f_s). Questi due parametri sono ricavabili da tutti i tipi di prove penetrometriche, anche dalle sole indagini CPT. Questa classificazione si basa, infatti, su un'analisi multivariata spuria di due rapporti adimensionali: la resistenza alla punta, normalizzata sulla pressione atmosferica, e il rapporto fra attrito laterale e resistenza all'avanzamento, moltiplicato per una costante, anche essa adimensionale. L'utilizzo dello schema classificatorio SBT comporta quindi il calcolo di due parametri: da un lato q_c/p_a , ove p_a è la pressione atmosferica standard (1 Atm = 101.325 Pa), dall'altro R_f , dato dal rapporto $f_s/q_c \times 100$. I due parametri dell'analisi multivariata vengono restituiti su un diagramma bilogarithmico, nel quale sono tracciati domini corrispondenti a specifiche tipologie di terreni.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

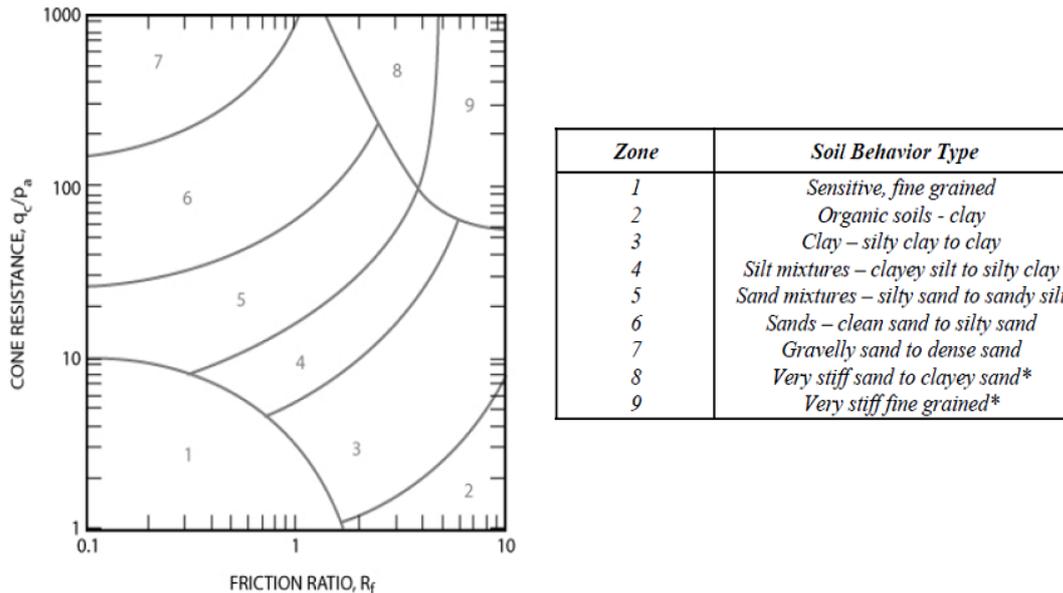


Figura 7-4 - Classificazione litologica basata sul comportamento dei terreni in risposta alla penetrazione meccanica, e sua rappresentazione in zone ad attributo numerico, da Robertson (1990).

In presenza di dati da piezocono digitale, oltre ai parametri appena descritti di resistenza alla punta e di attrito laterale, viene fornito anche il valore di pressione neutra dei fluidi presenti negli interstizi del sedimento (u). Avendo a disposizione dati da piezocono, è possibile utilizzare una classificazione più accurata che considera il contributo della pressione dei fluidi ai valori di resistenza totale alla punta q_t , maggiore della q_c misurata, e la resistenza di attrito laterale totale f_t , minore della f_s misurata. La presenza di un fluido in pressione, infatti, modifica le proprietà geomeccaniche del sedimento. Queste proprietà sono quindi influenzate anche dalla profondità di seppellimento e dai caratteri idrogeologici del corpo analizzato.

Come si è visto in precedenza, la banca dati disponibile è quantitativamente dominata da penetrometrie statiche, ma contiene anche un significativo numero di recenti prove a piezocono digitale. Questo ha fornito la preziosa opportunità di calibrare l'analisi delle prove CPT con i dati derivati dalla sottopopolazione di penetrometrie a piezocono digitale. Si sono, quindi, analizzati separatamente i dati da piezocono, per valutare in modo accurato, da un lato, i rapporti tra proprietà meccaniche e pressione neutra e dall'altro ricostruire la distribuzione statistica delle classi granulometrico-sedimentologiche determinate in modo più accurato. Questa analisi di dettaglio ha permesso di tarare e validare l'affidabilità della classificazione basata sui soli dati di penetrometrie statiche. La validità della metodologia è legata anche alle intrinseche proprietà sedimentologiche di questo sistema deposizionale, caratterizzato da una

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

distribuzione bimodale delle classi granulometriche: da una parte, sabbie di riempimento di alveo, dall'altra, fanghi di depressione interalvea. Nell'area di indagine, la tipologia dei sedimenti presenti è quindi meno ampia di quella riportabile nello schema di Robertson. Questa ridotta variabilità ha permesso una semplificazione operativa nell'utilizzo classificatorio del suddetto diagramma di Robertson.

Nella distribuzione dei dati da piezocono digitale dell'area indagata, si nota come le diverse classi di terreni possano essere, in prima approssimazione, discriminate anche in base al solo rapporto q_c/Pa tra resistenza alla punta e pressione atmosferica standard. Ad esempio, le sabbie grossolane presentano valori superiori a 100, le sabbie fini limose valori compresi fra 40 e 20, mentre le argille e le argille organiche valori inferiori a 3. Questa osservazione ha fatto sì che, per l'analisi automatico-speditiva del dato, si è potuto considerare il solo parametro di resistenza alla punta q_c . Al termine dell'operazione di classificazione semplificata delle prove penetrometriche, per ciascun livello descritto da una prova di penetrazione meccanica è stato restituito un singolo valore di classe, compreso tra 2 (argille) e 7 (ghiaie). Ad un dato non recuperato è assegnato valore 0. Queste considerazioni metodologiche hanno permesso un dimezzamento del numero di operazioni di classificazione. La semplificazione è stata di grande importanza operativa, dato che gran parte delle indagini penetrometriche era disponibile nel solo formato cartaceo, grafico o tabellare. La possibilità di analizzare il solo parametro q_c ha permesso quindi di dimezzare il lavoro di digitalizzazione manuale dei dati penetrometrici, assai oneroso in termini di tempo ed energie lavorative.

Le classi identificate risultano dalla valutazione statistica di oltre 12.000 registrazioni singole da piezocono. I limiti delle classi litologiche create per questa ricerca sono stati posti, generalmente, sulla base dell'intersezione della curva di regressione statistica a funzione esponenziale con i limiti di classe del diagramma SBT. Gli attributi numerici della classificazione semplificata qui proposta sono stati fatti coincidere con quelli utilizzati nel diagramma di Robertson. Va tenuto però presente che le due classificazioni non sono del tutto sovrapponibili, per cui in alcuni casi un intervallo può ricevere classificazioni diverse nello schema di Robertson e in quello qui semplificato. Le classificazioni ottenute nel diagramma semplificato sono state confrontate e validate dalle descrizioni di carotaggi continui geograficamente coincidenti, o il più possibile vicini, alle prove stesse.

La collocazione dei limiti nello schema semplificato tende a enfatizzare la presenza di sedimenti grossolani all'interno delle composizioni medie dei terreni e trascura l'effetto coesivo delle argille. Le argille pure risultano, quindi, accorpate ad argille organiche e torbe, il cui discrimine richiederebbe l'analisi dei valori di attrito laterale. Il confronto fra dati da sondaggio stratigrafico, dati da piezocono acustico, piezocono e penetrometrie statiche ha dimostrato che i limiti intrinseci alla classificazione semplificata e schematica

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

non inficiano la sua validità di fondo e la sua utilità per l'interpolazione spaziale geostatistica dei dati. Il processo di conversione e omogeneizzazione dei dati ha permesso di realizzare una banca di oltre 301.000 punti, basati sulla totalità dei carotaggi e penetrometrie disponibili. Ciascun punto è associato ad un vettore matematico a cinque valori, rappresentato da una matrice 1x5 contenente, oltre alle coordinate geografiche tridimensionali, un valore reale, rappresentante la classe litologica e, dove disponibile, il valore di resistenza penetrometrica alla punta.

CLASSE LITOLOGICA	VALORE	CLASSE LITOLOGICA	VALORE
altro	0	marna	4
discarica di rifiuti	0	limo	4
materiale argilloso di riporto	0	materiale sabbioso s.l. (tufo, sabbione, sabbietta, etc.)	5
informazione non raccolta (campionatura, recupero mancato, informazione in traducibile, etc.)	0	sabbia finissima	5
materiale grossolano s.l.	0	sabbia fine	5
materiale limoso di riporto	0	sabbia	6
materiale sabbioso di riporto	0	sabbia media	6
mattoni / laterizi	0	sabbia grossolana	6
pietre / sassi	0	sabbia molto grossolana	6
terra	0	ghiaietto	7
terreno di riporto / massicciata stradale	0	ghiaia fine	7
terreno vegetale / suolo	0	ghiaia	7
lignite	2	ghiaia media	7
argilla	2	ghiaia grossolana	7
materiale organico	2	ghiaia molto grossolana	7
torba	2	ciottoli	7
materiale fine s.l.	3		

Tabella 7-2 - Tabella sinottica contenente i valori di classe attribuiti a ciascuna descrizione individuata all'interno delle stratigrafie di pozzo ottenute mediante carotaggio continuo.

7.1.3 Algoritmi di interpolazione

Per la realizzazione dei modelli di sottosuolo sono stati utilizzati due distinti algoritmi di interpolazione:

- l'interpolazione lineare, utilizzata per meglio risolvere rapide variazioni spaziali locali delle proprietà dei corpi sedimentari. L'interpolazione lineare semplice è monodimensionale. Per interpolare i dati in uno spazio tridimensionale occorre utilizzare una interpolazione trilineare.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

- l'interpolazione cubica naturale, impiegata per enfatizzare su lunghe distanze i trend deposizionali e le geometrie dei corpi più omogenei, a scapito dei dettagli locali. Per interpolare i dati in uno spazio tridimensionale occorre utilizzare una interpolazione tricubica.

L'interpolazione trilineare è un'estensione dell'interpolazione lineare (che opera in uno spazio monodimensionale, $D=1$) e dell'interpolazione bilineare, che opera con $D=2$. Per determinare il valore in un punto l'algoritmo richiede l'informazione di altri 8 punti adiacenti che è possibile immaginare, per semplicità, collocati ai vertici di un cubo contenente il punto da interpolare (Figura 7-5).

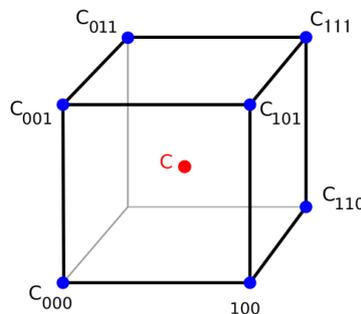


Figura 7-5 - Distribuzione spaziale tridimensionale dei punti necessari per eseguire un'interpolazione nel punto C.

Quando la distribuzione dei punti noti è omogenea e definita da un passo regolare è possibile calcolare il valore di c secondo il seguente sistema:

$$c_{00} = V[x_0, y_0, z_0](1-x_d) + V[x_1, y_0, z_0]x_d$$

$$c_{10} = V[x_0, y_1, z_0](1-x_d) + V[x_1, y_1, z_0]x_d$$

$$c_{01} = V[x_0, y_0, z_1](1-x_d) + V[x_1, y_0, z_1]x_d$$

$$c_{11} = V[x_0, y_1, z_1](1-x_d) + V[x_1, y_1, z_1]x_d$$

$$c_0 = c_{00}(1-y_d) + c_{10}y_d$$

$$c_1 = c_{01}(1-y_d) + c_{11}y_d$$

$$c = c_0(1-z_d) + c_1z_d$$

dove $V[x_0, y_0, z_0]$ è il valore rilevato nel punto (x_0, y_0, z_0) , mentre x_d è il passo, la distanza tra due vertici consecutivi lungo l'asse x (analogamente sono definiti y_d e z_d).

Da una rapida analisi è possibile comprendere come l'algoritmo d'interpolazione altro non sia che la composizione di 7 interpolazioni lineari annidate e di come il tempo di elaborazione dipenda, quindi, linearmente dalla risoluzione d'indagine, dall'estensione del dominio analizzato e dal numero di dimensioni spaziali considerate. Considerando la sola complessità di calcolo l'algoritmo non è quindi oneroso, ma è sensibilmente influenzato dall'elevato numero di punti presenti nella griglia di interpolazione.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

Questo genera una notevole richiesta di memoria informatica. Altro aspetto da considerare in questo metodo è l'errore introdotto, che è proporzionale al quadrato della distanza del punto C dai punti misurati, come visibile nella seguente equazione:

$$|c_{xyz} - f(x, y, z)| \leq \frac{1}{8} (\Delta l)^2 \cdot \max_{x \in [x_a, x_b], y \in [y_a, y_b], z \in [z_a, z_b]} (f''(x, y, z))$$

dove $f(x,y,z)$ è il valore reale della proprietà investigata nel punto $[x,y,z]$ e Δl la distanza tridimensionale dai due vertici prossimi del cubo definito dall'intervallo $[x_a, x_b; y_a, y_b; z_a, z_b]$, supposta la funzione f derivabile due volte nel dominio indicato.

Questo errore può generare vistosi artefatti in aree scarsamente coperte da indagini.

Per ovviare a questo problema è possibile utilizzare algoritmi di interpolazione più complessi ma che generano superfici più lisce riducendo l'errore massimo atteso, ma nel contempo diminuendo il potere di risoluzione spaziale locale. Tra questi uno dei pochi applicabili alla tipologia di dati osservati è l'algoritmo di interpolazione tricubica naturale. L'algoritmo di interpolazione tricubica è definito dalla seguente funzione:

$$f(x, y, z) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 \sum_{k=0}^3 a_{ijk} x^i y^j z^k$$

Questa formula richiede la risoluzione di 64 coefficienti, che possono essere ridotti a 32 se non viene posto il vincolo di derivabilità di ordine 2 per la funzione interpolante, a discapito della "morbidezza" della curva. In alcune implementazioni il numero di coefficienti è ridotto a 21, ma tale approccio non risulta ottimale laddove sia necessario determinare più di un punto all'interno del cubo di interpolazione (Figura 7-5). Il calcolo di più di un punto all'interno di una medesima cella cubica di interpolazione consente infatti di evitare il ricalcolo dei coefficienti, riducendo sensibilmente la complessità di elaborazione. Tale interpolazione converge linearmente alla funzione che essa interpola al diminuire del passo di interpolazione Δl .

Chiaramente l'interpolazione tricubica naturale risulta preferibile, ma computazionalmente più complessa, al punto da divenire rapidamente molto gravosa per computer di fascia media.

Per ovviare a questo problema, si è deciso di utilizzare un dominio di interpolazione locale (invece che globale) e una funzione interpolante applicata a domini tridimensionali tetraedrici (ricostruiti mediante triangolazione di Delaunay) invece che cubici. Se, da un reticolo tridimensionale a maglie cubiche si passa, infatti, ad uno a maglie tetraedriche e si operano alcune semplificazioni, si può ridurre il numero coefficienti fino a 21, passando da potenze di 2 a potenze di 3.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

L'algoritmo di Delaunay per un insieme di punti è una triangolazione che gode della seguente proprietà: il cerchio circoscritto in ciascun faccia triangolare non contiene altri punti del set.

Il numero di vertici considerati è quindi lo stesso del numero di vettori matematici disponibili nel database, ma il numero di elaborazioni per determinare la funzione interpolante è ridotto ad un ottavo. Questa ottimizzazione consente inoltre di ridurre la griglia di interpolazione a una "nuvola" di punti irregolarmente distribuiti, per i quali è possibile calcolare il valore in un punto solo sulla base dei 4 punti più prossimi (interpolazione lineare) o dei 12 punti più prossimi nel caso dell'interpolazione cubica (in precedenza il numero di vertici da considerare era superiore al migliaio).

L'algoritmo *tri-scattered* è stato applicato sia al modello di tipo A (interpolazione trilineare) che al modello di tipo B (interpolazione tricubica naturale). L'algoritmo preserva la distribuzione reale delle prove e pertanto consente di restituire sia oggetti discretizzati in griglie regolari sotto forma di immagini raster, sia elementi vettoriali (*meshes*). Per comprendere il vantaggio di questo approccio è possibile ricondursi ad un analogo bidimensionale (Figura 7-6): il modello numerico rimane definito dal database di punti e dalla funzione interpolante fino al momento della sua restituzione grafica. Al momento della restituzione l'utente può scegliere una visualizzazione continua, vettoriale oppure delle sezioni di un volume discretizzato in celle di ugual dimensione. A quel punto, solo per i valori richiesti, verrà effettuato il calcolo. Questa metodologia snellisce notevolmente la procedura di calcolo, in quanto quest'ultimo viene effettuato solamente in corrispondenza dei volumi o delle superfici interessante, e non sull'intero modello.

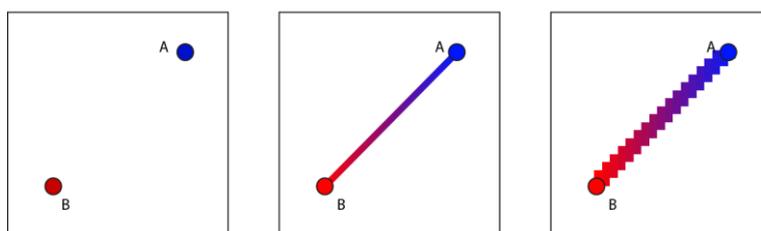


Figura 7-6 - Struttura semplificata delle diverse tipologie di restituzione grafica, a partire da due punti qualunque del database, caratterizzati da proprietà geomeccaniche diverse, qui rappresentate da colori distinti, figura di sinistra. Al centro è visibile una restituzione vettoriale, per la quale il valore della variabile viene distribuito in modo continuo, senza soluzione di continuità, lungo la direttrice che congiunge i due punti attraverso la funzione interpolante. Nel caso di destra, invece, il valore viene discretizzato per celle di ugual dimensione, ciascuna delle quali è caratterizzata da valori costanti.

Nelle rappresentazioni del modello presenti in questa relazione la restituzione delle proprietà del sottosuolo mediante una griglia ordinata di celle uguali (*voxel*) è stata richiesta quando si voleva osservare il trend di variazione locale; un esempio di tale rappresentazione è visibile nei modelli a recinto come in Figura 7-7. Tali modelli consentono di apprezzare la distribuzione spaziale di tutte le classi granulometriche.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

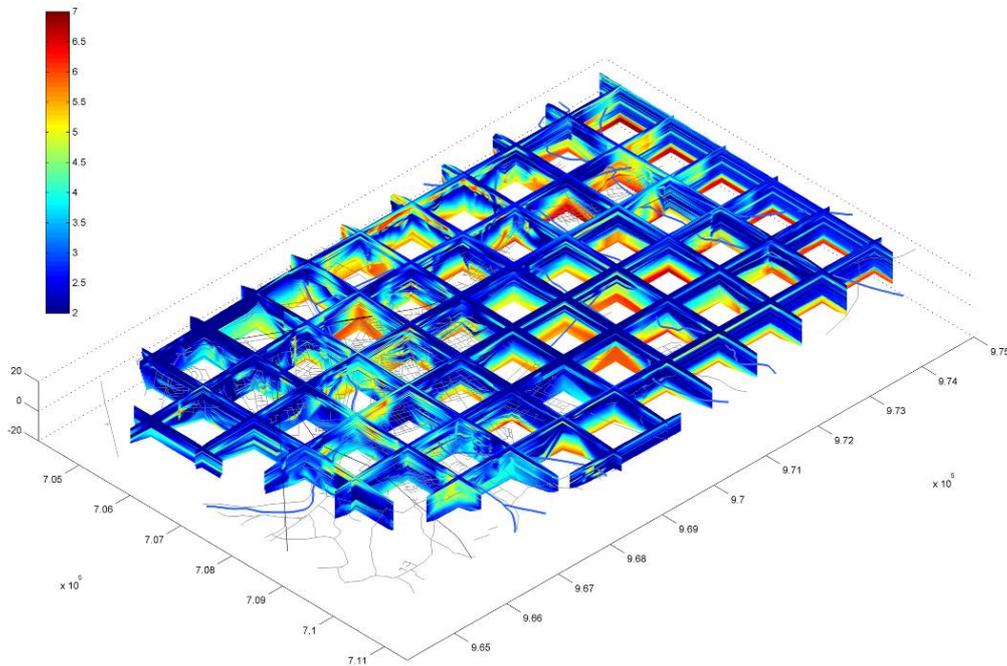


Figura 7-7 - Esempio di restituzione grafica basata su modello a griglia interrogato per slice distanziate un km l'una dall'altra. Visuale da SE, colorazione sulla base di classi granulometriche, elaborazione preliminare su un insieme di circa 1.000 prove. I colori arancioni nella parte inferiore nord-occidentale evidenziano le sabbie grossolane del Pleistocene superiore.

7.1.4 Analisi del modello

Seguendo le procedure di interpolazione e calcolo sopra descritte è stato ottenuto un modello continuo del sottosuolo dell'area urbana e periurbana, esteso in latitudine da Pontelagoscuro a Torre Fossa ed in longitudine da Mizzana a Pontegradella (Figura 7-7). L'accuratezza del modello dipende ovviamente dalla densità dei dati (Figura 7-3) e dalla loro qualità, più elevata nei quartieri di recente espansione e nel polo petrolchimico, più bassa all'interno del centro storico e scarsa nelle aree agricole periurbane. La distribuzione spaziale dei dati numerici di sottosuolo e le tecniche di interpolazione adottate favoriscono il riconoscimento di corpi lateralmente estesi, come quelli delle sabbie fluviali singlaciali padane del Pleistocene superiore, rispetto a corpi con una ridotta estensione laterale, come alvei isolati di età olocenica. La metodologia di interpolazione tende inoltre ad attenuare i contatti stratigrafici netti e le superfici di discordanza, generando passaggi relativamente graduali fra classi granulometriche. Le procedure informatiche sviluppate sono state in grado di analizzare e interpolare automaticamente un gran numero di dati di sottosuolo, producendo un modello tridimensionale coerente sia con il contesto stratigrafico generale, sia con quanto indipendentemente ricostruito tramite le tradizionali tecniche di correlazione manuale dei dati di sottosuolo.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL
COMUNE DI FERRARA



Figura 7-8 - Reticolo ortogonale di piani verticali utilizzato per la rappresentazione grafica del modello tridimensionale di sottosuolo. In rosso sono indicate le tracce dei profili illustrati in Figura 7-10.

La rappresentazione grafica dell'interpolazione numerica del sottosuolo è stata ottenuta sezionando il modello tridimensionale secondo una reticolo ortogonale di piani verticali sia a maglie fitte (Figura 7-8), più complesso e ricco di informazioni, sia a maglie più rade di più immediata lettura (Figura 7-7).

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

Per facilitare ulteriormente la comprensione del modello, dal fitto graticcio di profili ne sono stati estratti alcuni allungati in direzione est-ovest (Figura 7-10). Due ulteriori profili sviluppati in direzione nord-sud e perpendicolari ai precedenti sono mostrati in Figura 7-9. Infine sono state estratte sezioni orizzontali del modello di sottosuolo a diverse quote, riferite al livello medio del mare (Figura 7-12, Figura 7-13, Figura 7-14 e Figura 7-15).

In queste rappresentazioni bidimensionali del modello tridimensionale la gamma cromatica esprime le classi granulometriche dei terreni. Le tinte rosse indicano sabbie medio-grossolane fino a localmente ghiaiose, mentre in blu sono rappresentate le argille coesive, più o meno organiche. I rimanenti colori indicano le granulometrie intermedie; con il giallo ed il verde ad evidenziare sabbie fini e sabbie fini limose, e con le sfumature di azzurro riservate ai limi e limi argillosi. Nell'interpretare geologicamente l'indicazione cromatica delle tinte sfumate è necessario ricordare che le tecniche di interpolazione tendono a mostrare passaggi litologici gradualmente, anche in presenza di contatti stratigrafici netti, come al tetto dei corpi singlaciali pleistocenici o alla base erosiva dei canali di Po.

Il profilo nord-sud tracciato ad occidente del centro urbano (Profilo 1 - Figura 7-9), mostra chiaramente alla base le sabbie grossolane del Po, deposte durante il Pleistocene finale in condizioni di media pianura alluvionale singliale. Le sabbie sono limitate superiormente dai sedimenti olocenici prevalentemente argillosi, di bassa pianura alluvionale. Questi sedimenti fangosi bordano due corpi di sabbie di alveo; il più settentrionale corrispondente all'antico Po di Ferrara e quello centrale corrispondente al paleolvaeo del Traversagno, che attraversa diagonalmente l'area del Polo Chimico. I corpi di alveo olocenici sono a diretto contatto stratigrafico ed idrogeologico con le sabbie pleistoceniche qui prossime alla superficie. Nell'altro profilo parallelo (Profilo 2 - Figura 7-9), posto più ad oriente, si osserva un progressivo approfondimento delle sabbie pleistoceniche del Po ed il loro passaggio laterale a corpi prevalentemente limosi di provenienza appenninica, in cui si individua l'importante alveo sepolto, probabilmente di Po, nell'area di via Caretti. Più a sud si osserva il riempimento sabbioso del Po di Volano di età romana e medievale ed, ancora più a sud, alvei sepolti di dimensioni più ridotte, prodotti dal Reno e forse altri fiumi appenninici.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

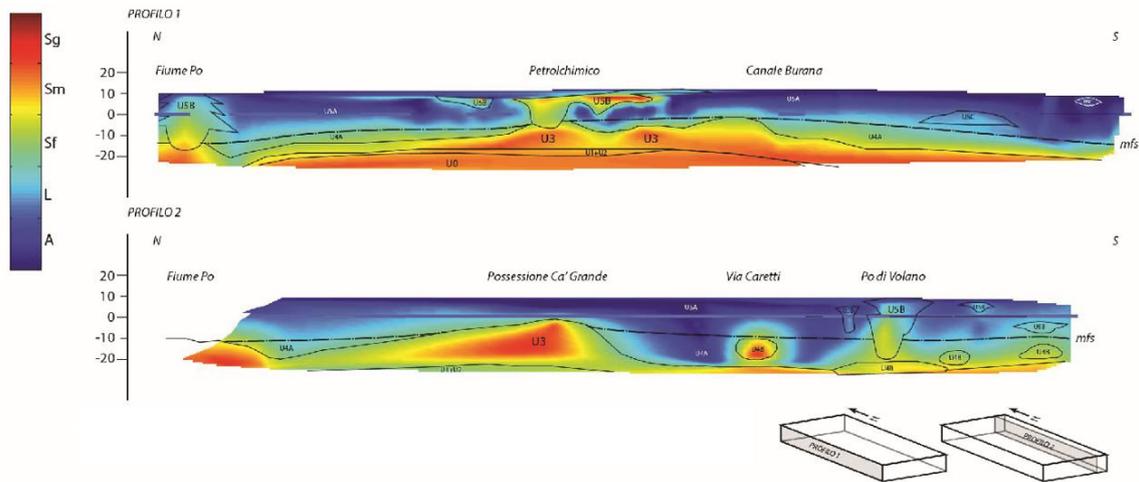


Figura 7-9 - Profili nord-sud che mostrano due sezioni verticali del modello. Nella parte inferiore si osservano le sabbie singlaciali, superiormente i fanghi olocenici.

L'intero quadro litologico-stratigrafico è visibile negli undici profili orientati est-ovest ed equispaziati di 1.000 m (Figura 7-10). Nella parte meridionale, sia i livelli profondi che quelli superficiali sono dominati dai sedimenti relativamente fini, limoso-argillosi, di provenienza appenninica, mentre, verso nord, la parte pleistocenica è costituita da sabbie, il cui tetto tende ad approfondirsi all'altezza dell'attuale Po a Pontelagoscuro e verso oriente.

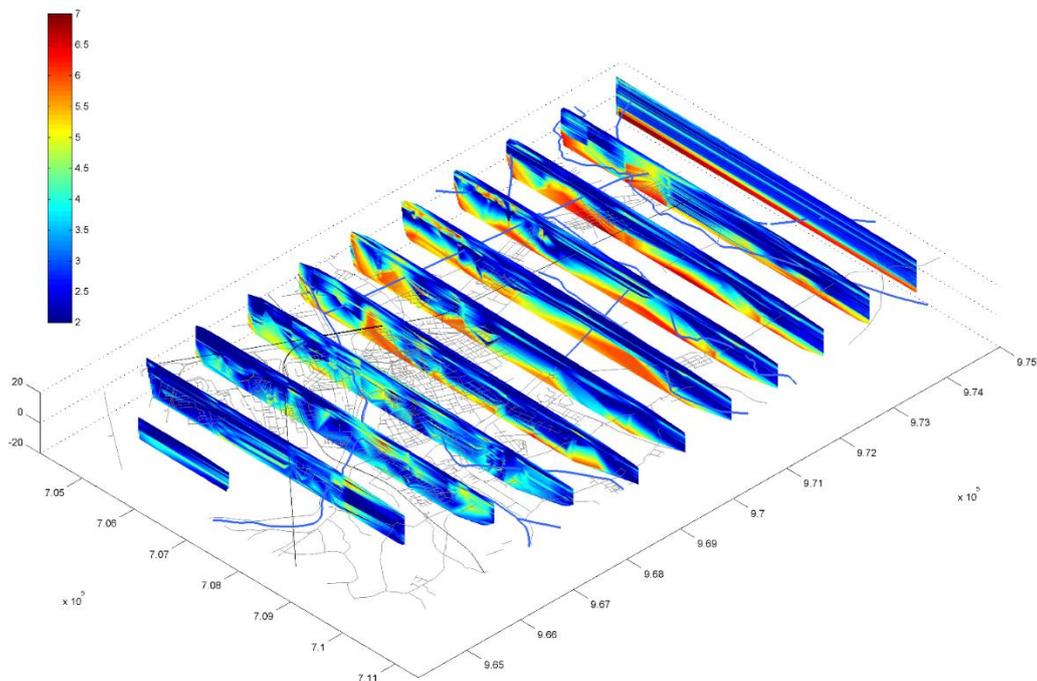


Figura 7-10 - Profili est-ovest che sezionano il modello continuo di interpolazione. Per la localizzazione dei profili, vedi carta di Figura 7-8. Le sabbie singlaciali passano lateralmente e verticalmente a fanghi di pianura alluvionale.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

I diagrammi a graticcio illustrano tutti lo stesso modello, ma in Figura 7-11 sono stati indicati gli sviluppi planimetrici dei corpi superficiali di riempimento del Po romano a nord di Mizzana, dell'alveo medievale del Po di Ferrara e di canale sepolto di Reno, proveniente dalla zona della Fiera, in direzione di Piazza Travaglio.

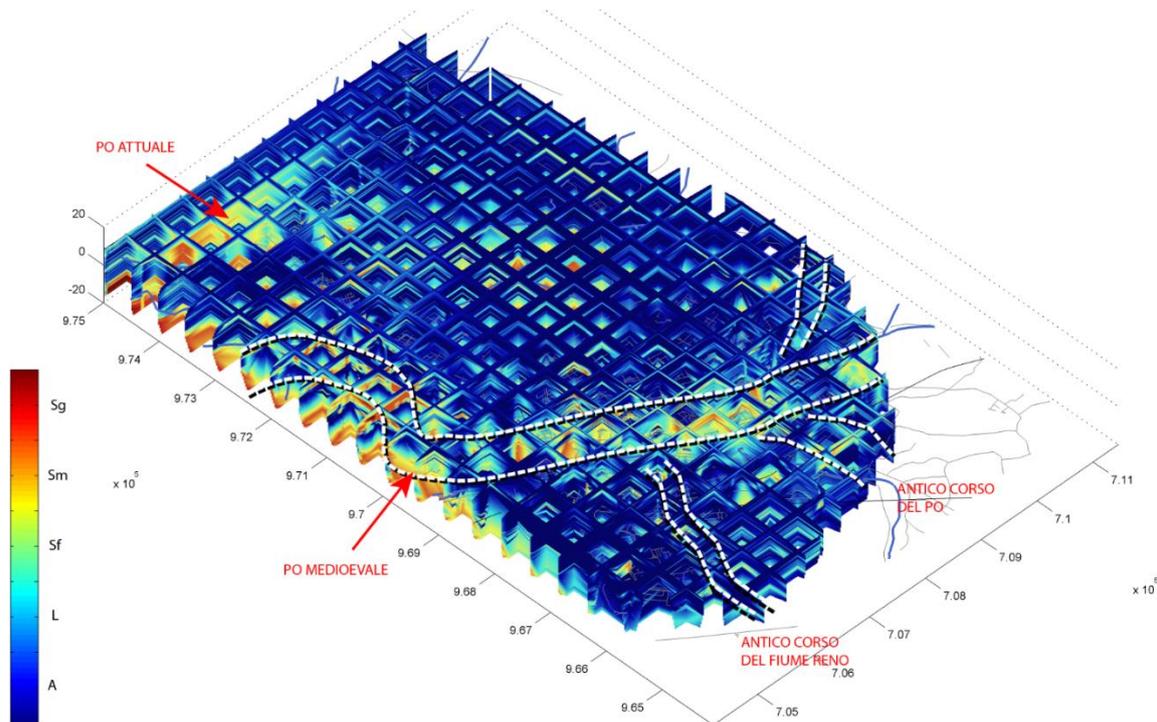


Figura 7-11 - Trama ortogonale di profili che illustrano i risultati dell'interpolazione numerica del modello, con indicazione planimetrica dei principali corpi fluviali olocenici.

Le sezioni orizzontali di Figura 7-12, Figura 7-13, Figura 7-14 e Figura 7-15 forniscono altre immagini bidimensionali del modello ed ulteriori elementi interpretativi.

La sezione piana che descrive la distribuzione dei corpi sedimentari alla quota del livello del mare è largamente dominata dai fanghi argillosi olocenici (Figura 7-12). La sezione relativa a quota -12 m s.l.m. mostra invece come le porzioni occidentali e settentrionali siano già dominate dalle sabbie grossolane pleistoceniche, mentre sotto l'area del Barco si osservano sedimenti limosi più fini che riempiono una precedente valle, probabilmente incisa dopo la fine dell'ultima fase glaciale (Figura 7-14). A -16 m sotto il livello del geoide, infine, le sabbie grossolane deposte dal Po dominano l'area indagata, tranne la parte meridionale che continua ad essere interessata dalla deposizione di sedimenti fini di provenienza appenninica (Figura 7-15).

In conclusione, i risultati ottenuti dall'interpolazione numerica tridimensionale dei dati di sottosuolo sono apparsi del tutto coerenti con il modello concettuale ottenuto con le tradizionali tecniche di correlazione e

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

presentato nella carta delle aree suscettibili di effetti locali o delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS).

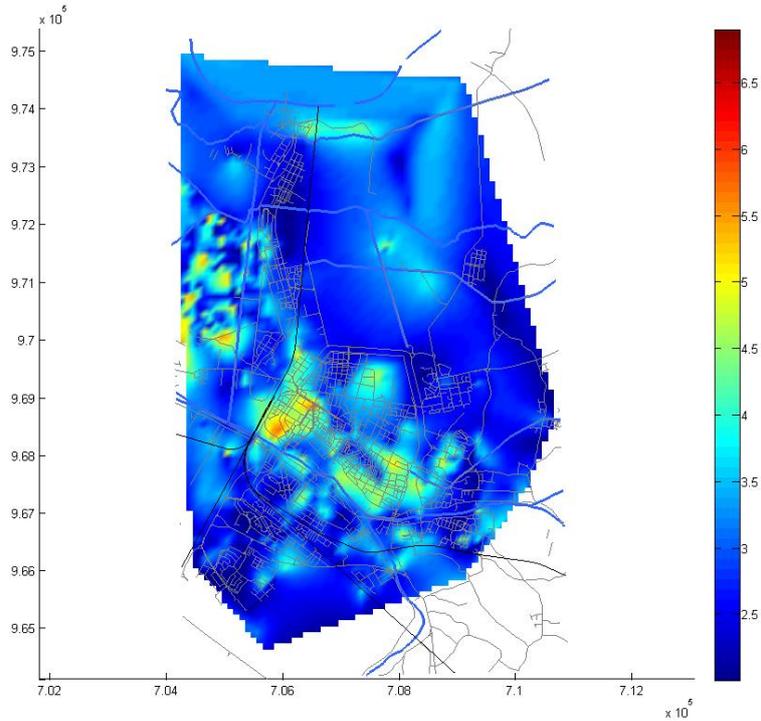


Figura 7-12 - Sezione orizzontale del modello di interpolazione numerica, tagliato a 0 m s.l.m.

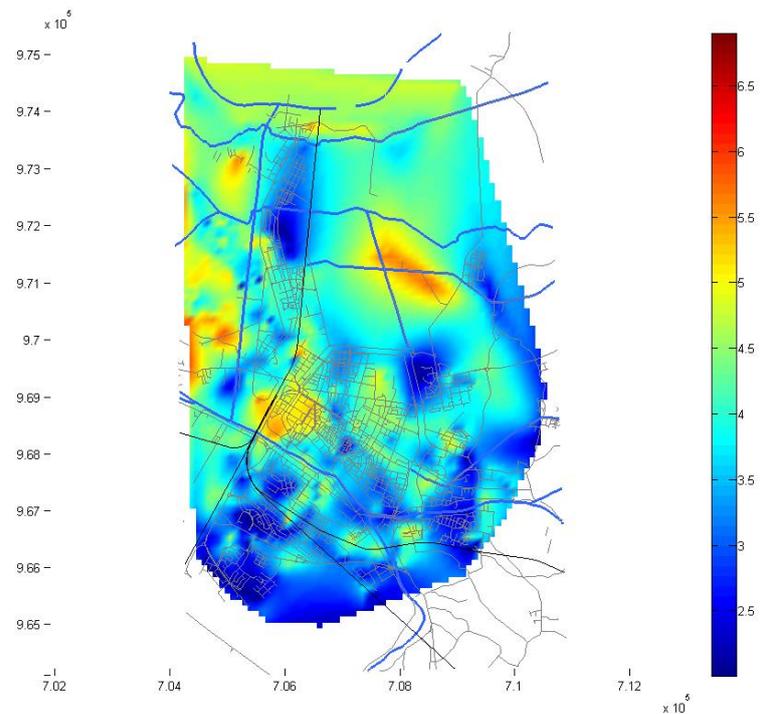


Figura 7-13 - Sezione orizzontale del modello di interpolazione numerica, tagliato a -8 m s.l.m..

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

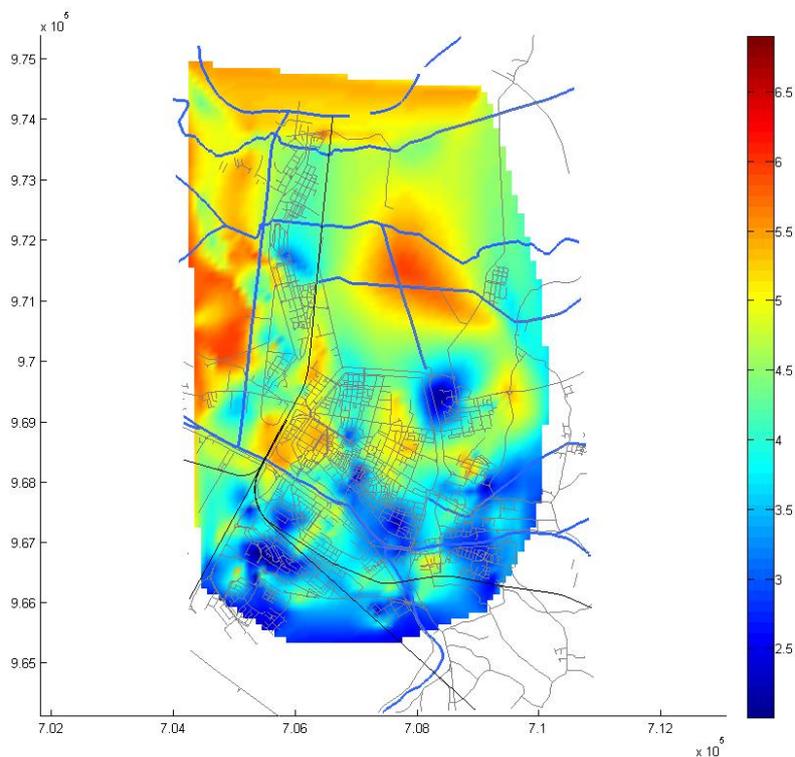


Figura 7-14 - Sezione orizzontale del modello di interpolazione numerica, tagliato a -12 m s.l.m..

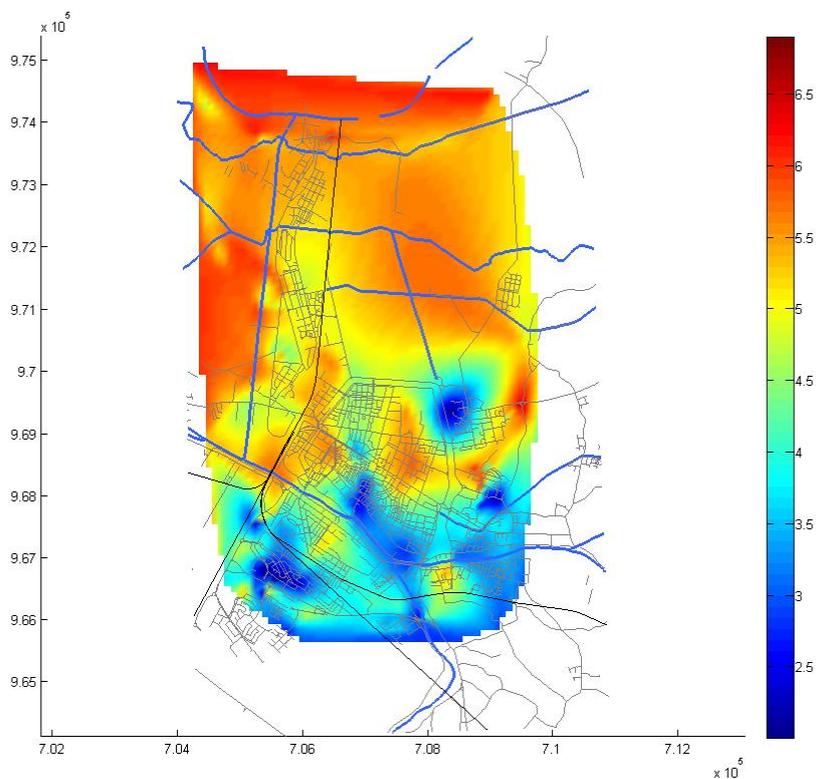


Figura 7-15 - Sezione orizzontale del modello di interpolazione numerica, tagliato a -16 m s.l.m..

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

7.2 Zone suscettibili di amplificazioni locali

La sequenza sismica del 2012 ha permesso di verificare come l'area di pianura emiliana colpita sia stata interessata da fenomeni di amplificazione stratigrafica (e.g. Bordoni *ed al.*, 2012; Govoni *ed al.*, 2014). La determinazione dell'amplificazione attesa può essere ottenuta sia attraverso l'utilizzo degli abachi di riferimento (e.g. D.G.R. n. 630/2019 Regione Emilia-Romagna), sia mediante analisi di risposta sismica locale.

Nell'ambito di questo studio è stato adottato l'approccio semplificato per la stima dei principali fattori di amplificazione del moto sismico, basato sull'utilizzo degli abachi proposti dalla normativa regionale in materia di microzonazione sismica (Allegato A2 - D.G.R. n. 630/2019). Questa modalità è stata condivisa con gli Enti regionali preposti alla valutazione degli approfondimenti geologico-sismici prodotti a supporto degli strumenti di pianificazione urbanistica.

I diversi abachi proposti dalla normativa regionale sono stati ottenuti mediante analisi di risposta sismica locale effettuate in differenti contesti geologico-stratigrafici regionali, tenendo conto delle locali variazioni di profondità del bedrock sismico e delle velocità delle onde volumetriche di taglio (onde S) a varie profondità nel sottosuolo. L'utilizzo degli abachi per la valutazione semplificata dei fattori di amplificazione richiede perciò la conoscenza della tipologia e dello spessore dei depositi di copertura, della profondità del substrato sismico e delle variazioni di velocità delle onde di taglio (V_s) nei primi 30 m di sottosuolo. Le indicazioni relative alla profondità del substrato sismico (paragrafo 6.2) sono state ottenute incrociando i dati delle misure di microtremore con quelli delle sezioni geologico-sismiche e delle stratigrafie profonde di pozzi per idrocarburi.

Le variazioni nei valori di V_{s30} sono state invece valutate sulla base dei molti dati disponibili ottenuti da prove in situ di tipo down-hole (SCPTu, SDMT), che indicano valori medi quasi ovunque superiori a 180 m/s. Sulla base di queste considerazioni sono stati ritenuti rappresentativi del territorio comunale gli abachi proposti per la Pianura Padana e la Costa Adriatica denominati:

- “Pianura 2” che descrive i “settori di pianura con sedimenti alluvionali prevalentemente fini, alternanze di limi, argille e sabbie, caratterizzato dalla presenza di una importante discontinuità stratigrafica responsabile di un significativo contrasto di impedenza a circa 100 m da p.c. e dal tetto del substrato rigido a circa 150 m da p.c.”. Questo abaco è stato utilizzato per le zone di “alto strutturale-anticlinale” che costituiscono la porzione nord-occidentale del territorio comunale, sviluppata tra Porporana ed il Petrolchimico.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

V_{S30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400
PGA	1,7	1,7	1,7	1,6	1,5	1,5

Fattori di Amplificazione PGA

V_{S30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400
SA1	1,8	1,8	1,8	1,7	1,6	1,5
SA2	2,7	2,7	2,4	2,1	1,9	1,8
SA3	3,3	3,2	2,8	2,5	2,3	2,1
SA4	3,3	3,1	2,7	2,4	2,1	1,9

Fattori di Amplificazione SA1 (0,1s≤T≤0,5s), SA2 (0,4s≤T≤0,8s), SA3 (0,7s≤T≤1,1s), SA4 (0,5s≤T≤1,5s)

V_{S30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400
SI1	2,0	2,0	1,9	1,8	1,7	1,6
SI2	3,1	3,0	2,7	2,4	2,1	2,0
SI3	3,6	3,3	2,9	2,5	2,2	2,0

Fattori di Amplificazione SI1 (0,1s≤T≤0,5s), SI2 (0,5s≤T≤1,0s), SI3 (0,5s≤T≤1,5s)

- “Pianura 3”, che descrive i “settori di pianura caratterizzati da elevati spessori di sedimenti prevalentemente fini e poco consolidati, alternanze di limi, argille e sabbie di ambiente alluvionale e transizionale, con substrato rigido a profondità non inferiori a 300 m da p.c.”. Questo abaco è stato utilizzato per le zone di “basso strutturale-sinclinale” che caratterizzando i settori nord-orientale e meridionale del territorio comunale e quindi gran parte dell’area in esame.

V_{S30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400
PGA	1,3	1,3	1,3	-	-	-

Fattori di Amplificazione PGA

V_{S30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400
SA1	1,3	1,3	1,3	-	-	-
SA2	2,1	2,1	2,0	-	-	-
SA3	2,5	2,5	2,4	-	-	-
SA4	2,4	2,4	2,3	-	-	-

Fattori di Amplificazione SA1 (0,1s≤T≤0,5s), SA2 (0,4s≤T≤0,8s), SA3 (0,7s≤T≤1,1s), SA4 (0,5s≤T≤1,5s)

V_{S30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400
SI1	1,5	1,5	1,5	-	-	-
SI2	2,3	2,3	2,2	-	-	-
SI3	2,6	2,6	2,4	-	-	-

Fattori di Amplificazione SI1 (0,1s≤T≤0,5s), SI2 (0,5s≤T≤1,0s), SI3 (0,5s≤T≤1,5s)

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

L'utilizzo degli abachi ha permesso di attribuire ad ogni porzione di territorio fattori di amplificazione per prefissati periodi di vibrazione, sia in termini di accelerazione (FA_{PGA} - Tavole $F_{1\div 9}$, $FA_{0.1-0.5s}$ - Tavole $G_{1\div 9}$, $FA_{0.4-0.8s}$ - Tavole $H_{1\div 9}$, $FA_{0.7-1.1s}$ - Tavole $I_{1\div 9}$, $FA_{0.5-1.5s}$ - Tavole $J_{1\div 9}$), sia di pseudovelocità o intensità di Housner ($FH_{0.1-0.5s}$ - Tavole $K_{1\div 9}$, $FH_{0.5-1s}$ - Tavole $L_{1\div 9}$, $FH_{0.5-1.5s}$ - Tavole $M_{1\div 9}$).

Essendo l'area in esame in contesto di pianura, il valore del coefficiente di amplificazione topografica ST è stato assunto ovunque pari a 1.

Gli abachi sopra indicati sono stati utilizzati anche per determinare la distribuzione dei valori del parametro H_{SM} (Naso *et al.*, 2019) per il territorio in esame (Tavole $N_{1\div 9}$). Questo nuovo parametro esprime lo scuotimento atteso al sito in valore assoluto (accelerazione in cm/s^2), dato dal prodotto del parametro *Acceleration Spectrum Intensity* (ASI_{UHS}), valore integrale dello spettro di riferimento in accelerazione calcolato per l'intervallo di periodi $0,1s \leq T \leq 0,5s$, diviso per ΔT (in questo caso pari a 0,4s) e moltiplicato per il fattore di amplificazione in accelerazione (FA) calcolato per lo stesso intervallo di periodi:

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

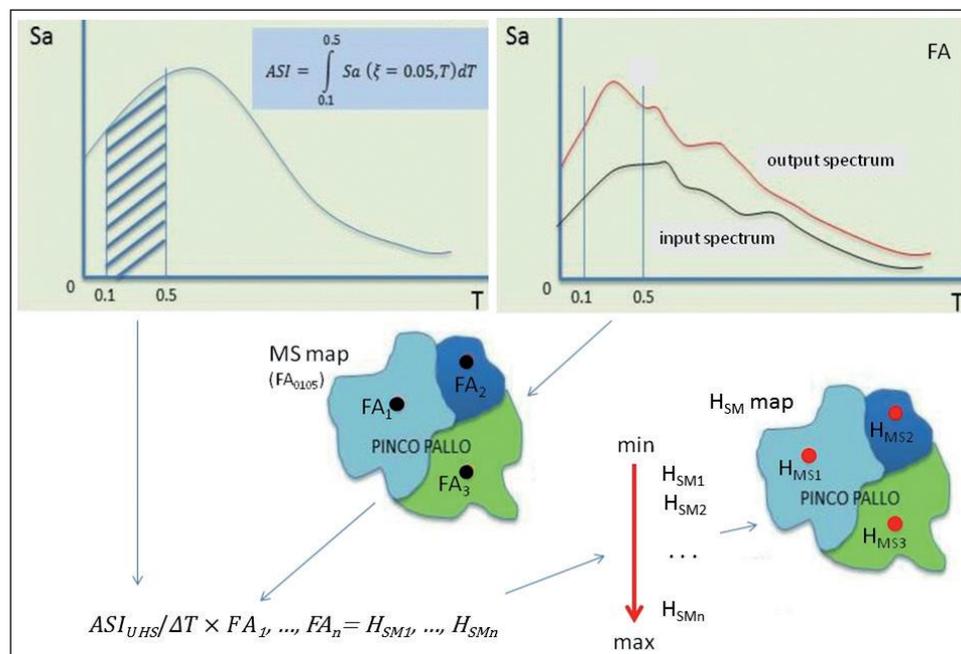


Figura 7-16 - Schema per il calcolo del parametro HSM ed esempio di mappatura (Naso *et al.*, 2019).

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

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

L'intervallo di periodi di vibrazione compreso tra 0,1 e 0,5 s è stato scelto in considerazione delle tipologie edilizie più diffuse sul territorio regionale.

Considerando sia il rischio sismico di riferimento sia gli effetti locali, il parametro H_{SM} consente una valutazione più realistica del pericolo sismico permettendo di effettuare stime omogenee a scala nazionale. Il parametro H_{SM} può essere discretizzato in classi semi-quantitative relative al livello di scuotimento, al potenziale danno agli edifici e all'intensità strumentale. Le possibili soglie delle classi di HSM, proposte in Naso *et al.*, 2019 sono illustrate in Tabella 7-3.

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

Tabella 7-3 - Soglie per H_{SM} e altri parametri fisici correlati (Naso *et al.*, 2019)

La distribuzione dei valori di $ASl_{UHS}/\Delta T$, calcolati per ogni punto della griglia di riferimento della mappa di pericolosità sismica nazionale INGV (T_R 475 anni, 50^{esimo} percentile), è disponibile alla pagina web dedicata agli indirizzi per gli studi di microzonazione sismica del Servizio Geologico della Regione Emilia-Romagna (<http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/geologia/sismica/indirizzi-per-studi-microzonazione-sismica>). Per ottenere un maggior dettaglio nella distribuzione dei valori di H_{SM} , i nodi della griglia di calcolo (5x5 km) del parametro $ASl_{UHS}/\Delta T$ sono stati infittiti, aggiungendo un nodo centrale ad ogni singola cella e calcolando per esso il valore di $ASl_{UHS}/\Delta T$ tramite media ponderata dei valori dei quattro vertici della cella considerata. Utilizzando la formula in Figura 7-16 sono stati poi calcolati i valori di H_{SM} per ogni vertice della griglia, utilizzando come fattori di amplificazione (FA) i coefficienti in accelerazione proposti dagli abachi di "Pianura 2" e "Pianura 3" per periodi di vibrazione compresi tra 0,1 e 0,5 s.

I valori puntuali di H_{SM} sono stati interpolati mediante analisi geostatistica basata su algoritmi di "kriging", in modo da ottenere una superficie continua (*raster*) che illustra la variazione del parametro H_{SM} nel territorio comunale. I valori ottenuti sono stati infine suddivisi in classi con passo di 100 cm/s², individuando tre distinte fasce illustrate in Figura 7-17. Rispetto alla classificazione proposta da Naso *et al.*, 2019, gran parte del territorio comunale ricade in una fascia a rischio sismico moderato potenzialmente soggetta a danni all'edificato da moderati a gravi (Tabella 7-3).

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

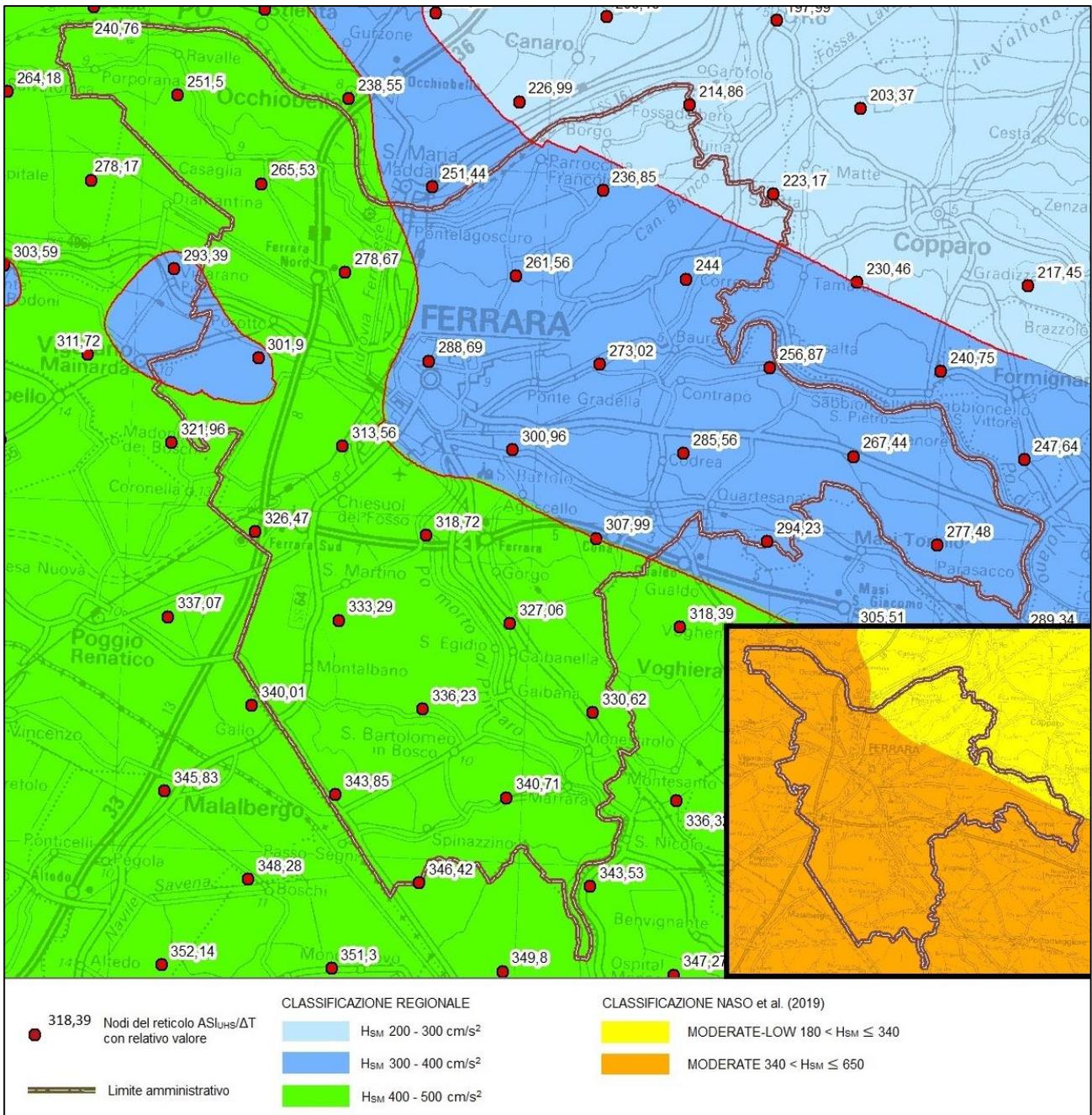


Figura 7-17 - La mappa mostra la variazione del parametro H_{SM} per il territorio del Comune di Ferrara. I punti rossi rappresentano i nodi della griglia di calcolo di $ASL_{UHS}/\Delta T$, da cui è stata derivata quella utilizzata per l'interpolazione del parametro H_{SM} .

7.2.1 Risposta sismica locale con modellazioni numeriche

Per verificare la coerenza dei fattori di amplificazione adottati mediante l'uso degli abachi di Pianura 2 e Pianura 3 (Allegato A2 - D.G.R. n. 630/2019) sono state eseguite 3 analisi di risposta sismica locale. Le modellazioni numeriche sono state effettuate per il centro storico cittadino e per la frazione di Casaglia.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

Oltre a presentare notevoli variazioni di profondità del substrato sismico e importanti differenze granulometriche e meccaniche dei terreni che formano i primi 30 m di sottosuolo, le due aree sono caratterizzate da differenti vulnerabilità ed esposizione agli eventi sismici.

Le aree sono state scelte anche per la disponibilità di dettagliate informazioni stratigrafiche, geofisiche e geotecniche che hanno permesso la definizione di accurati modelli di sottosuolo per le analisi numeriche. Considerando l'andamento del bedrock sismico (paragrafo 6.2, Allegato 1 - Sezioni A-A', B-B' e L-L'), e le principali variazioni all'interno dei terreni di copertura sono state proposte le seguenti modellazioni denominate:

- **RSL1** (Tabella 7-5), rappresentativa delle condizioni stratigrafiche descritte dall'abaco di Pianura 2, tipiche della porzione nord-occidentale del territorio comunale compresa tra Porporana ed il Petrolchimico, in cui si sviluppa l'alto strutturale di Casaglia (e.g. MOPS 30502012);
- **RSL2**, rappresentativa delle condizioni stratigrafiche descritte dall'abaco di Pianura 3 che interessano gran parte del territorio comunale. Considerata la vastità dell'area descritta dall'abaco sono stati proposti due distinti modelli sismo-stratigrafici in modo da valutare gli effetti delle variazioni stratigrafico-deposizionali delle prime decine di metri di sottosuolo, sull'amplificazione del moto sismico:
 - **RSL2A** (Tabella 7-6), rappresentativa delle aree con substrato sismico profondo caratterizzate da importanti spessori di sabbie di riempimento di paleoalveo affioranti (e.g. centro storico - MOPS 30502006);
 - **RSL2B** (Tabella 7-7), rappresentativa delle aree con substrato sismico profondo e prevalenti argille e limi di piana interalvea nelle prime decine di metri di sottosuolo (e.g. centro storico - MOPS 2003).

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL
COMUNE DI FERRARA

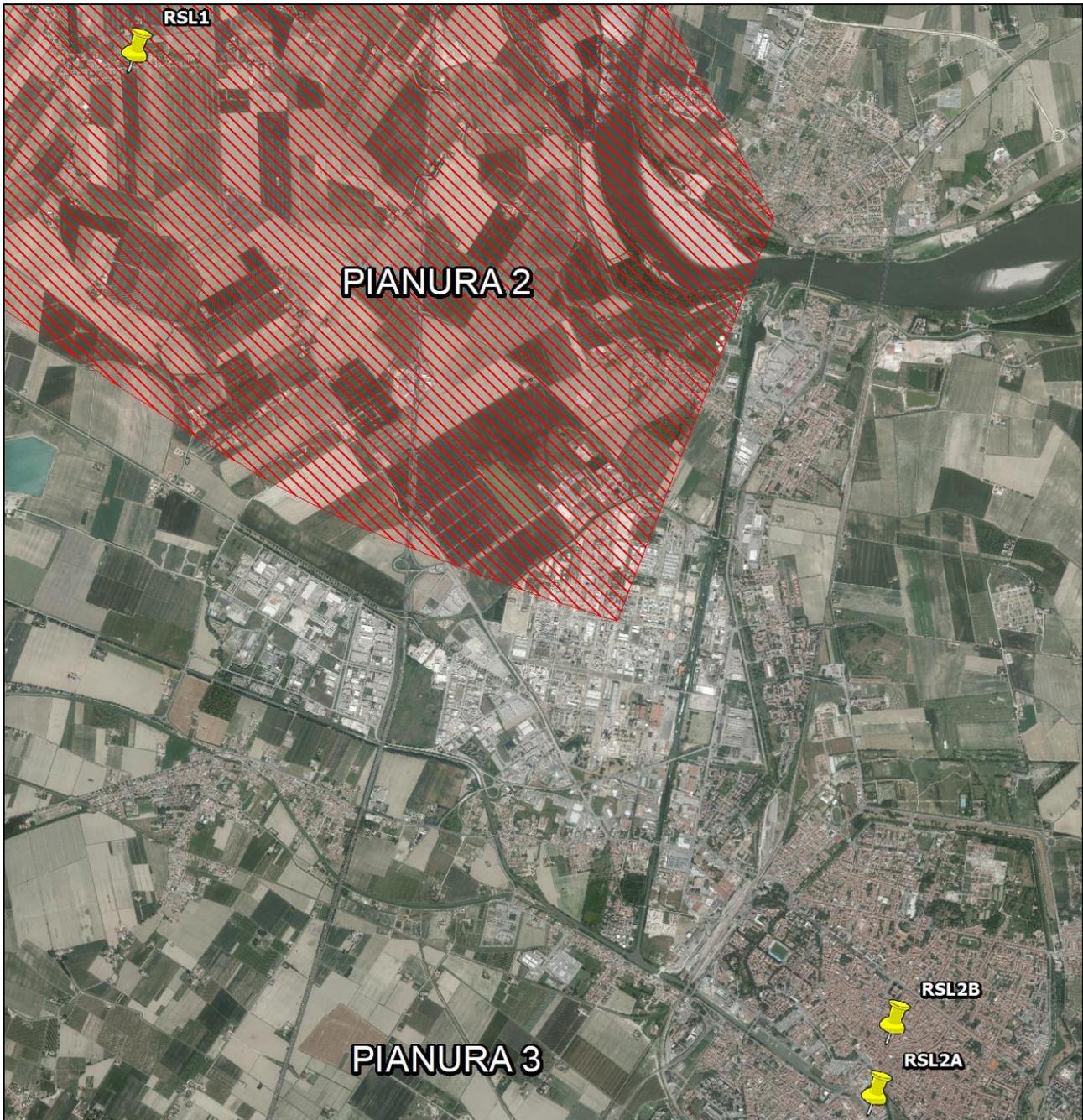


Figura 7-18 - Distribuzione degli abachi utilizzati per la stima semplificata dell'amplificazione del moto sismico e ubicazione dei siti in cui sono state eseguite analisi di risposta sismica locale.

Le analisi di risposta sismica locale sono procedure di calcolo numerico che permettono di ricavare le funzioni di trasferimento del moto sismico dal bedrock alla superficie. Tali procedure necessitano pertanto della definizione di un modello sismo-stratigrafico profondo che descriva le caratteristiche geotecniche e geofisiche delle successioni sedimentarie che ricoprono il bedrock sismico.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

I modelli sismo-stratigrafici proposti nello studio si basano sui risultati delle indagini geognostiche e geofisiche in situ ed in laboratorio archiviate in banca dati. Queste indagini hanno consentito la caratterizzazione dei terreni di copertura costituenti le prime decine di metri di sottosuolo. Le unità stratigrafiche più profonde sono invece state descritte utilizzando dati di letteratura e correlazioni a scala regionale realizzate mediante confronto tra sezioni geologiche (Martelli *et al.*, 2017; Molinari *et al.*, 2007, Regione Emilia-Romagna 1998), profili sismici (Affatato *et al.*, 2019) e dati di pozzo (progetto ViDEPI - www.videpi.com).

I modelli sismo-stratigrafici e geotecnici sono stati definiti associando alle varie unità individuate: (i) i valori di velocità delle onde di taglio V_s ottenuti dalle misure dirette disponibili (es. down-hole, cross-hole) o da letteratura scientifica (Minarelli *et al.*, 2016; Laurenzano *et al.*, 2013); (ii) le curve di decadimento del modulo di taglio ($G/G_0 - \gamma$) e di incremento del fattore di smorzamento ($D - \gamma$) ottenute dalle prove dinamiche di laboratorio disponibili o da indagini in situ con dilatometro sismico (Amoroso *et al.*, 2014) realizzate per lo studio in oggetto (Allegato 2); (iii) i valori del peso per unità di volume stimati dalle prove in situ e di laboratorio disponibili.

In Tabella 7-4 sono indicate, per ciascuna delle modellazioni di risposta sismica locale (RSL1, RSL2A, RSL2B), le indagini utilizzate per la ricostruzione del modello sismo-stratigrafico di riferimento.

	RSL1	RSL2A	RSL2B
DESCRIZIONE	CASAGLIA SUBSTRATO entro 150 m	CENTRO STORICO "Sabbie di paleoalveo affioranti" SUBSTRATO oltre 300 m	CENTRO STORICO "Prevalenti limi e argille di piana" SUBSTRATO oltre 300 m
STRATIGRAFIA SUPERFICIALE	185070P503	185160L001 e 185160U043 (fino a 20 metri)	185160L002 e 185160U044 (fino a 30 metri)
STRATIGRAFIA PROFONDA	185070P503 (fino a 135 m)	185160P713 (fino a 125 m)	185160P713 (fino a 125 m)
SUBSTRATO SISMICO	185070P503 (a 130 m) 185070R041 Sezioni A-A' e L-L' (Allegato 1)	Affatato <i>et al.</i> , 2019 185160R025 Sezione B-B' (Allegato 1)	Affatato <i>et al.</i> , 2019 185160R025 Sezione B-B' (Allegato 1)
V_s SUPERFICIALE	185070P503 (fino a 135 m)	185160L001 e 185160B103 (fino a 30 metri)	185160L002 (fino a 30 metri)
V_s PROFONDA	185070P503 (fino a 135 m)	Minarelli <i>et al.</i> , 2016 (fino a 265 m)	Minarelli <i>et al.</i> , 2016 (fino a 265 m)

Tabella 7-4 - Indicazione delle indagini e delle correlazioni da cui sono stati tratti i dati per la ricostruzione dei tre modelli sismo-stratigrafici di riferimento per le simulazioni di risposta sismica locale.

Le correlazioni tra dati stratigrafici, sezioni geologiche (si veda Allegato 1), profili sismici (Affatato *et al.*, 2019 e Figura 5-2) e le curve di ellitticità (H/V) ottenute dalle nuove misure di microtremore (paragrafo

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

6.1), hanno permesso di identificare i principali contrasti di impedenza nel sottosuolo e stimare natura e profondità del bedrock sismico (paragrafi 5.1 e 6.2).

Nell'area nord-occidentale del territorio comunale in cui è stata eseguita la modellazione di Casaglia, si sviluppa l'omonima anticlinale facente parte delle strutture frontali della catena appenninica sepolta. In quest'area il substrato sismico è stato posto in corrispondenza del tetto dei depositi marnosi messiniani presenti alla profondità di 130 m. Il modello sismo-stratigrafico (RSL1 - Tabella 7-5) è stato ricostruito con accuratezza sino al substrato sismico (*bedrock*), grazie alla disponibilità della stratigrafia del sondaggio a carotaggio continuo e delle misure di cross-hole in pozzo effettuate per la caratterizzazione della stazione accelerometrica (FERS) appartenente alla rete sismica nazionale.

Per quanto riguarda le modellazioni eseguite nel centro storico di Ferrara (RSL2A e RSL2B) il substrato sismico è stato, invece, posto tra i 400 ed i 450 m di profondità, in corrispondenza del principale riflettore identificato mediante indagini di sismica a riflessione eseguite dai ricercatori dell'OGS di Trieste. Secondo recenti interpretazioni di questi rilievi (Affatato *et al.*, 2019), il riflettore sismico principale potrebbe corrispondere all'interfaccia che separa alla base i depositi del Quaternario Marino (QM) dalle arenite torbiditiche litificate di età pliocenica.

La stima delle velocità delle onde di taglio (V_s) nei terreni di copertura compresi tra il bedrock e le prime decine di metri di sottosuolo (Tabella 7-6, Tabella 7-7) è stata ricavata considerando una legge di potenza basata sulle V_s acquisite mediante down-hole nell'area di Mirabello (Minarelli *et al.*, 2016).

L'estrapolazione dei dati di Mirabello all'area di Ferrara è stata possibile considerando che, oltre ad essere confinanti, i due territori appartengono al medesimo contesto geologico-strutturale che determina la presenza delle medesime unità stratigrafiche inquadrato nel Supersistema Emiliano-Romagnolo. Nell'estrapolare ed associare le velocità alle unità stratigrafiche, sono state considerate opportune correzioni nei valori di V_s legate al diverso spessore, seppellimento e conseguente carico litostatico a cui sono sottoposte le stesse unità stratigrafiche nelle diverse aree. Queste stime sono state effettuate verificando anche l'accordo con i principali contrasti di impedenza identificati dai picchi delle misure di H/V. Come velocità delle onde di taglio per il bedrock sismico è stato assunto un valore in linea con quelli di unità stratigrafiche analoghe misurati mediante tecnica down-hole in aree limitrofe (Di Capua e Tarabusi, 2013; Laurenzano *et al.*, 2013; Garofalo *et al.*, 2016).

In Tabella 7-5, Tabella 7-6 e Tabella 7-7 sono riportate le sintesi dei modelli sismo-stratigrafici proposti.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

PROFONDITA'	SPESSORE	CAMPIONE/CURVE DI DECADIMENTO - UNITÀ GEOLOGICA	Vs (m/s)
0	10	Bondeno (da 2 a 3 m) - A+L	140
10	5	Ferrara (15 m) - A Po	160
15	17	Ferrara (da 9 a 16 m) - SL Po	250
32	33	Ferrara (da 9 a 16 m) - SL Po	300
65	30	Ferrara (da 9 a 16 m) - SL Po	400
95	35	Ferrara (da 9 a 16 m) - SL Po	600
130	Half-Space	Bedrock	1.000

Tabella 7-5 - Modello sismo-stratigrafico e geotecnico utilizzato in input per il calcolo della RSL1 Casaglia - Zona di anticlinale.

PROFONDITA'	SPESSORE	CAMPIONE/CURVE DI DECADIMENTO - UNITÀ GEOLOGICA	Vs (m/s)
0	3,5	Bondeno (da 2 a 3 m) - A+L	175
3,5	6,5	Ferrara (da 3 a 9 m) - SL Po	204
10	6	Ferrara (da 9 a 16 m) - SL Po	232
16	5	Buonacompra SDMT2 (13.5-15) - LA	264
21	3	Buonacompra SDMT2 (15.2-19.6) -S	262
24	2	Buonacompra SDMT2 (19.8-23.4) - L e A	254
26	2	Buonacompra SDMT2 (15.2-19.6) -S	295
28	2	Buonacompra SDMT2 (19.8-23.4) - L e A	274
30	25	Ferrara (15 m) - A Po	284
55	25	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	322
80	23	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	366
103	22	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	402
125	25	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	435
150	25	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	466
175	25	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	495
200	25	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	522
225	25	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	547
250	25	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	571
275	25	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	593
300	25	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	615
325	25	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	635
350	25	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	654
375	25	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	673
400	Half-Space	Bedrock	1.200

Tabella 7-6 - Modello sismo-stratigrafico e geotecnico utilizzato in input per il calcolo della RSL2A - Zona di sinclinale - Alveo.

PROFONDITA'	SPESSORE	CAMPIONE/CURVE DI DECADIMENTO - UNITÀ GEOLOGICA	Vs (m/s)
0	3	Bondeno (da 2 a 3 m) - A+L	149
3	1	Mirabello - M1 C2 - AL org. - UNIFI	119

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

4	1	Ferrara (da 3 a 9 m) - SL Po	157
5	3	Ferrara (15 m) - A Po	165
8	3	Bondeno (da 2 a 3 m) - A+L	126
11	3	Ferrara (15 m) - A Po	175
14	5	Buonacompra SDMT2 (13.5-15) - LA	264
19	3	Buonacompra SDMT2 (15.2-19.6) -S	262
22	2	Buonacompra SDMT2 (19.8-23.4) - L e A	254
24	2	Buonacompra SDMT2 (15.2-19.6) -S	295
26	4	Buonacompra SDMT2 (19.8-23.4) - L e A	274
30	25	Ferrara (15 m) - A Po	284
55	25	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	322
80	23	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	366
103	22	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	402
125	25	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	435
150	25	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	466
175	25	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	495
200	25	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	522
225	25	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	547
250	25	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	571
275	25	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	593
300	25	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	615
325	25	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	635
350	25	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	654
375	25	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	673
400	25	Mirabello blast Po glaciale (18-20 m) -SL	691
425	25	Mirandola - S1 C4 (69.7-70.1) - L + A - RER	709
450	Half-Space	Bedrock	1.200

Tabella 7-7 - Modello sismo-stratigrafico e geotecnico utilizzato in input per il calcolo della RSL2B - Zona di sinclinale - Piana.

Definiti i modelli sismo-stratigrafici (Tabella 7-5, Tabella 7-6 e Tabella 7-7), le analisi numeriche monodimensionali sono state eseguite mediante il software STRATA (Rathje e Kottke, 2013).

Come accelerogrammi di input per il calcolo della risposta sismica locale, sono stati utilizzati i tre segnali di riferimento forniti dalla Regione Emilia-Romagna in allegato alla D.G.R. n. 630/2019 (Figura 7-19). Tali segnali sono stati scalati in modo da far corrispondere la loro accelerazione massima con il valore di $a_{g,ref}$ atteso al suolo di riferimento nei siti indagati. Eseguendo la media ponderata dei valori di accelerazione ai nodi del reticolo su cui si basa la mappa di pericolosità sismica nazionale INGV (T_R 475 anni, 50^{esimo} percentile), sono stati ottenuti i valori di $a_{g,ref}$ per i siti indagati, rispettivamente pari a 0,12 g per Casaglia e 0,13 g per il centro storico di Ferrara.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

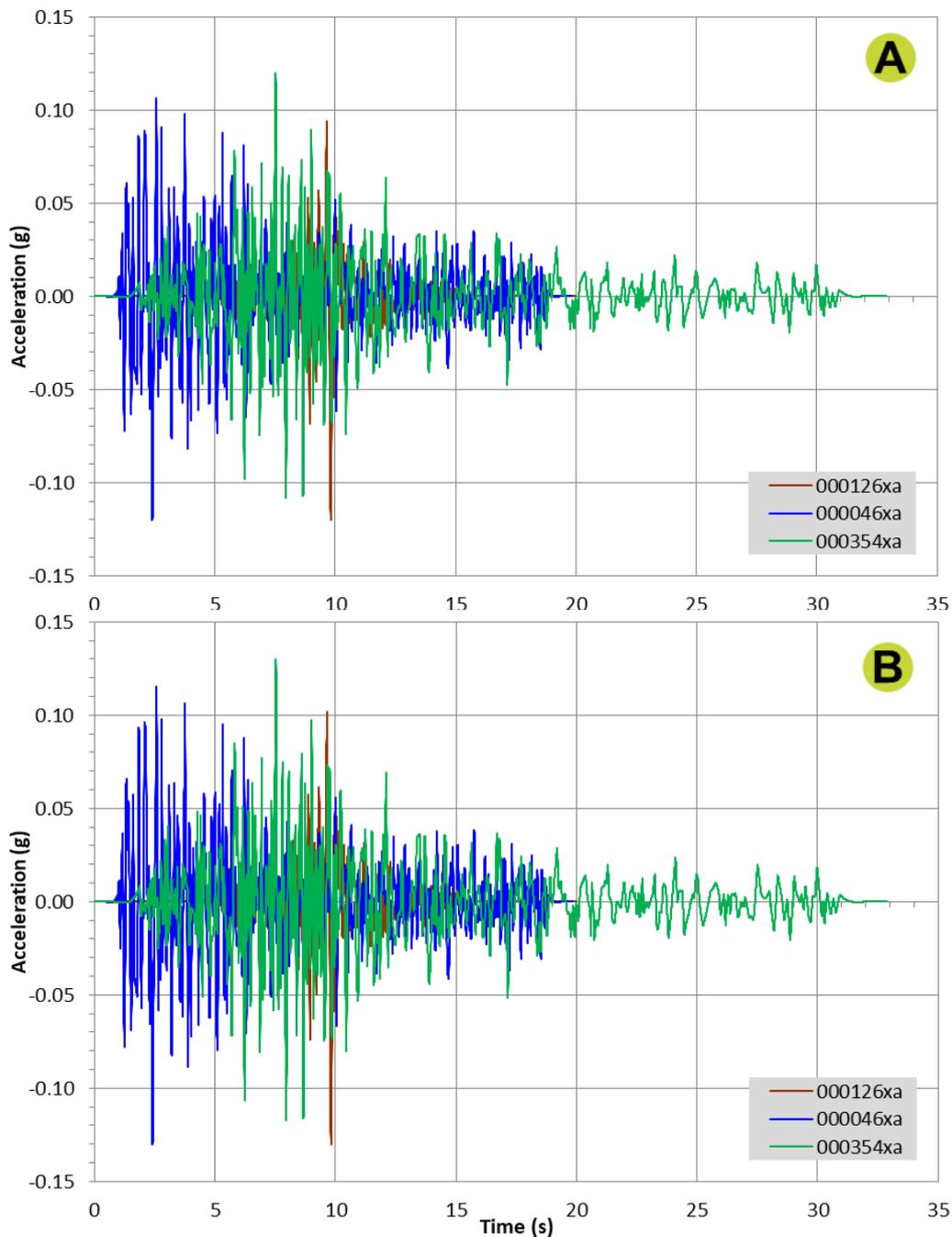


Figura 7-19 - Accelerogrammi di input per le risposte sismiche locali. I segnali, forniti dalla Regione Emilia-Romagna (D.G.R. 630/2019), sono stati scalati rispetto alla pericolosità sismica di base dell'aree ad un valore di a_{gref} pari a 0,12 per Casaglia (A) e 0,13 per il centro storico cittadino (B).

Per entrambe le aree sono stati quindi calcolati e confrontati gli spettri di risposta al bedrock (Figura 7-20, Figura 7-21) ed in superficie per un periodo di ritorno di 475 anni con uno smorzamento assunto pari al 5%. Gli spettri elastici in accelerazione, in input e di output – ottenuti dalle simulazioni di risposta sismica

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

locale –, sono stati archiviati in formato .txt secondo procedure analoghe a quelle seguite per gli studi di microzonazione sismica a livello nazionale (Standard MS 4.1 - Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica, 2018).

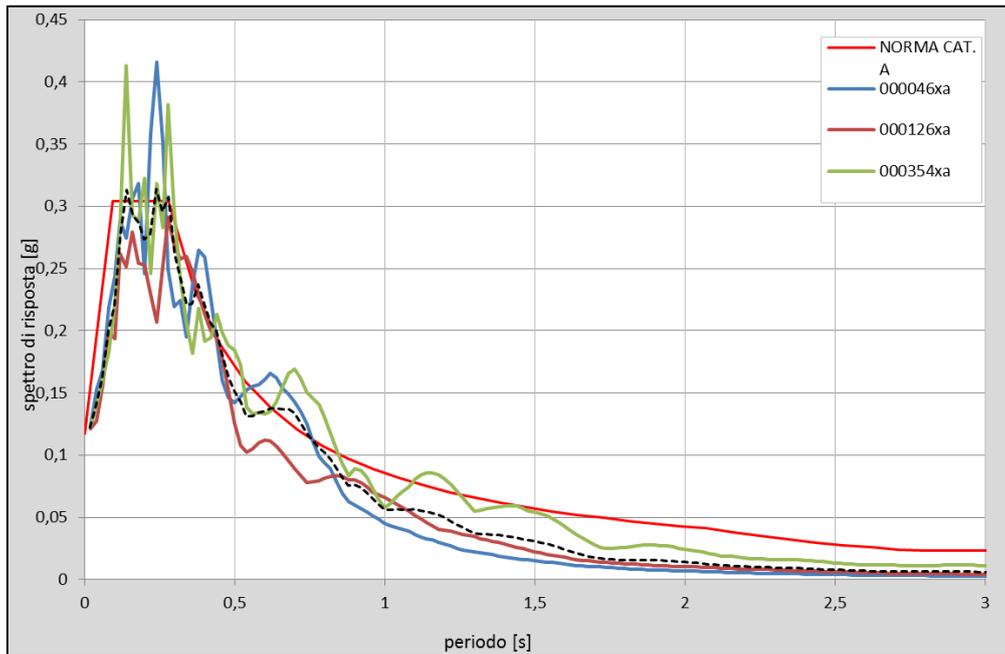


Figura 7-20 - Area di Casaglia. Spettri di risposta al bedrock per i tre accelerogrammi, e loro spettro mediano, messi a confronto con lo spettro per la categoria di sottosuolo “A” secondo le NTC2018.

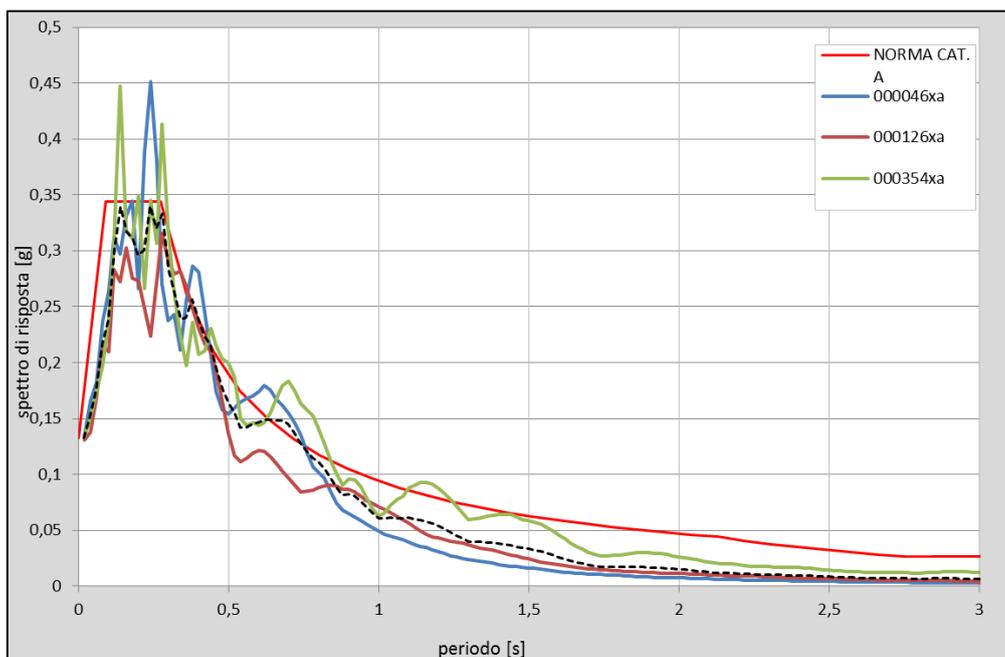


Figura 7-21 - Area del centro storico. Spettri di risposta al bedrock per i tre accelerogrammi, e loro spettro mediano, messi a confronto con lo spettro per la categoria di sottosuolo “A” secondo le NTC2018.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

RSL1 - Casaglia - MOPS 30502012

In Figura 7-22 si riporta la funzione di trasferimento, definita come il rapporto tra lo spettro di Fourier del segnale in superficie in funzione della frequenza per i tre accelerogrammi di input e per la loro media. Si osserva una prima amplificazione a frequenza di circa 0,7 Hz ed una seconda a circa 1,7 Hz, coerentemente con quanto riscontrato dalle misure di rumore ambientale eseguite a supporto dello studio (185070R041).

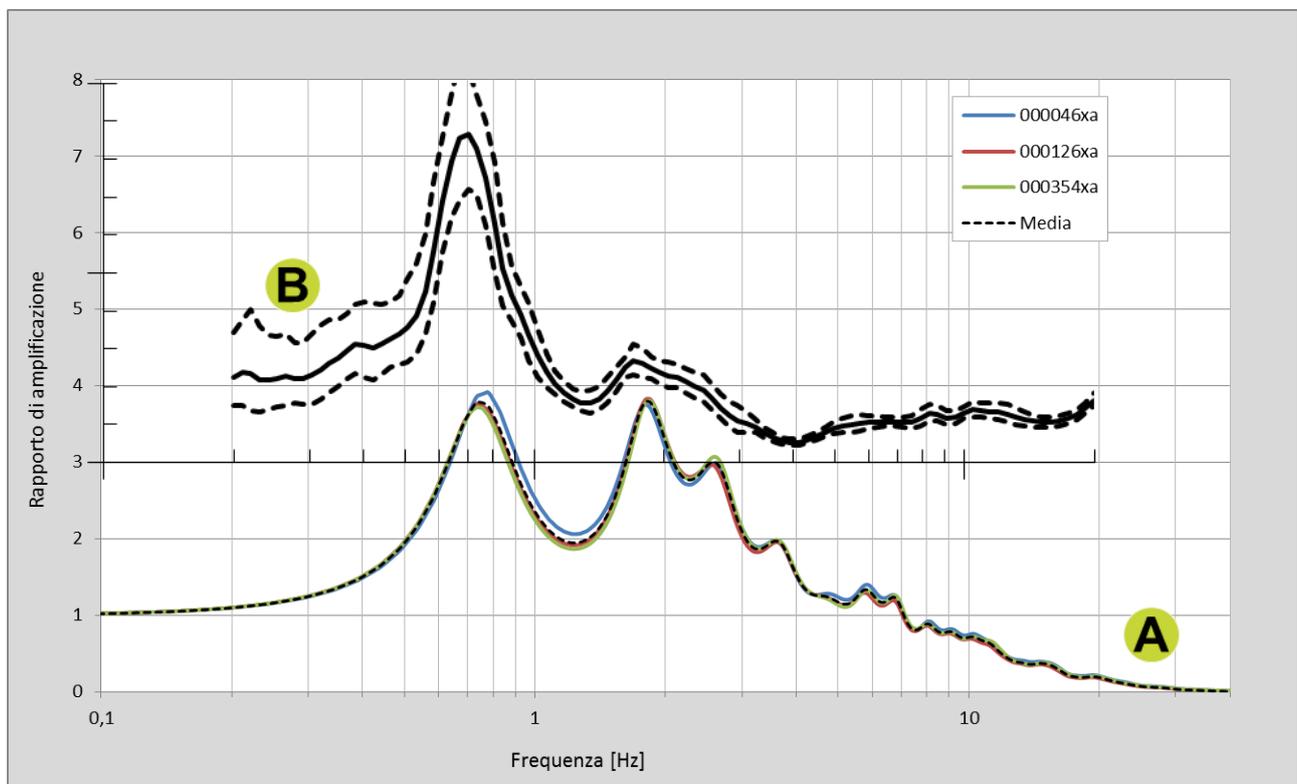


Figura 7-22 - RSL1 Casaglia. Funzione di trasferimento (rapporto di amplificazione tra lo spettro del moto in superficie ed al bedrock) per i 3 terremoti di Figura 7-19 e per la loro media. Dalla figura è possibile verificare il perfetto accordo tra le frequenze ottenute dalla modellazione di risposta sismica locale (A) ed il dato sperimentale (B) acquisito mediante misure di rumore sismico ambientale (185070R041).

In Figura 7-23 si riportano gli spettri di risposta dell'oscillatore armonico tipo ad un grado di libertà, in funzione del periodo proprio della struttura e per uno smorzamento tipico del 5%, e del loro spettro medio, ottenuti a partire dagli accelerogrammi di Figura 7-19. Appare evidente come gli spettri di risposta ottenuti risentano significativamente dei singoli moti di input (segnali ricavati da D.G.R. n. 630/2019). Lo spettro medio risulta, infatti, affetto da una elevata deviazione standard, sostanzialmente dovuta alla diversità dei tre terremoti utilizzati come segnali di input nella modellazione numerica.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

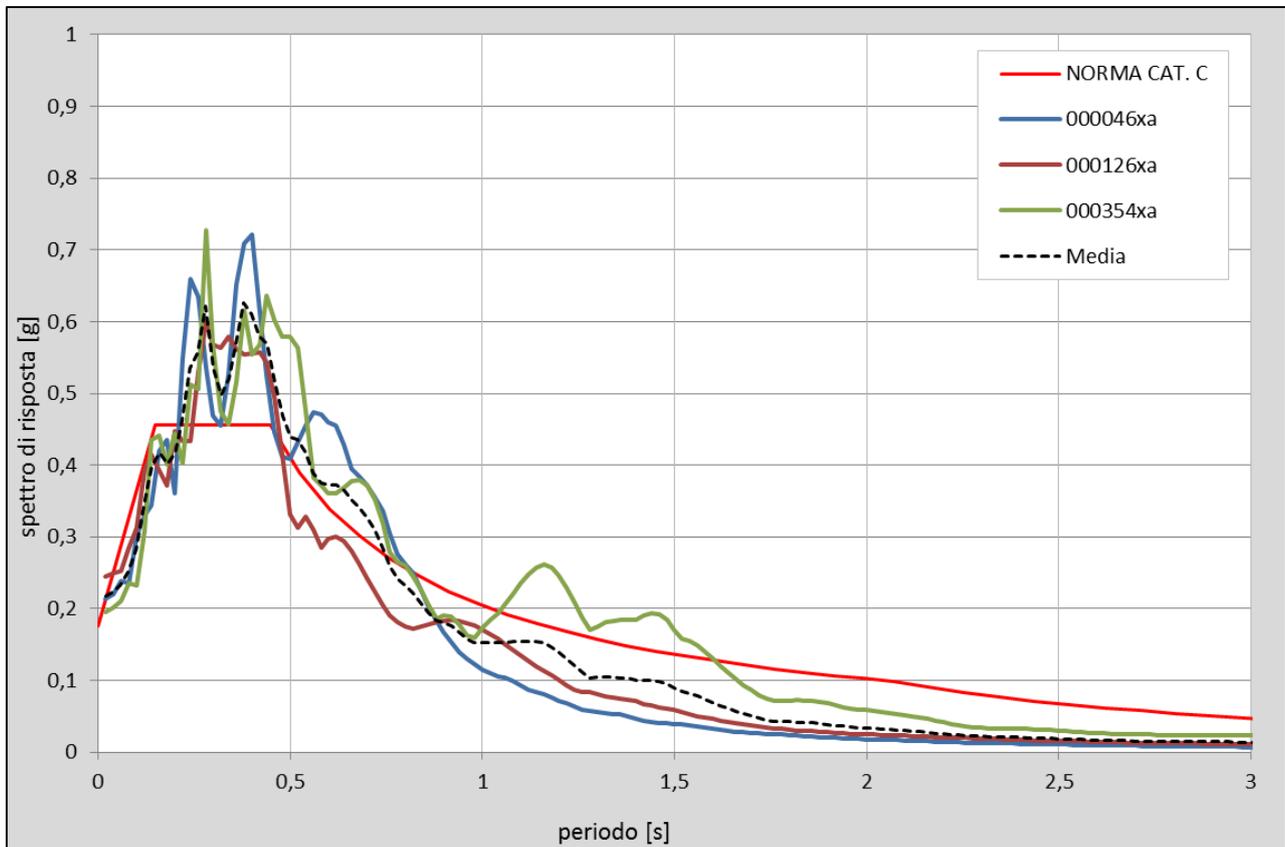


Figura 7-23 - RSL1 Casaglia. Spettri di risposta in superficie per i tre accelerogrammi ed il loro spettro medio, messi a confronto con lo spettro per la categoria C secondo le NTC2018.

In Figura 7-24 è infine riportato l'andamento dell'accelerazione massima attesa (PGA) nei primi 20 m di sottosuolo per i tre terremoti di input e per la loro media. Dal grafico si nota un generale e progressivo aumento dell'accelerazione al diminuire della profondità, che diventa più accentuato tra i 6 metri e la superficie.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

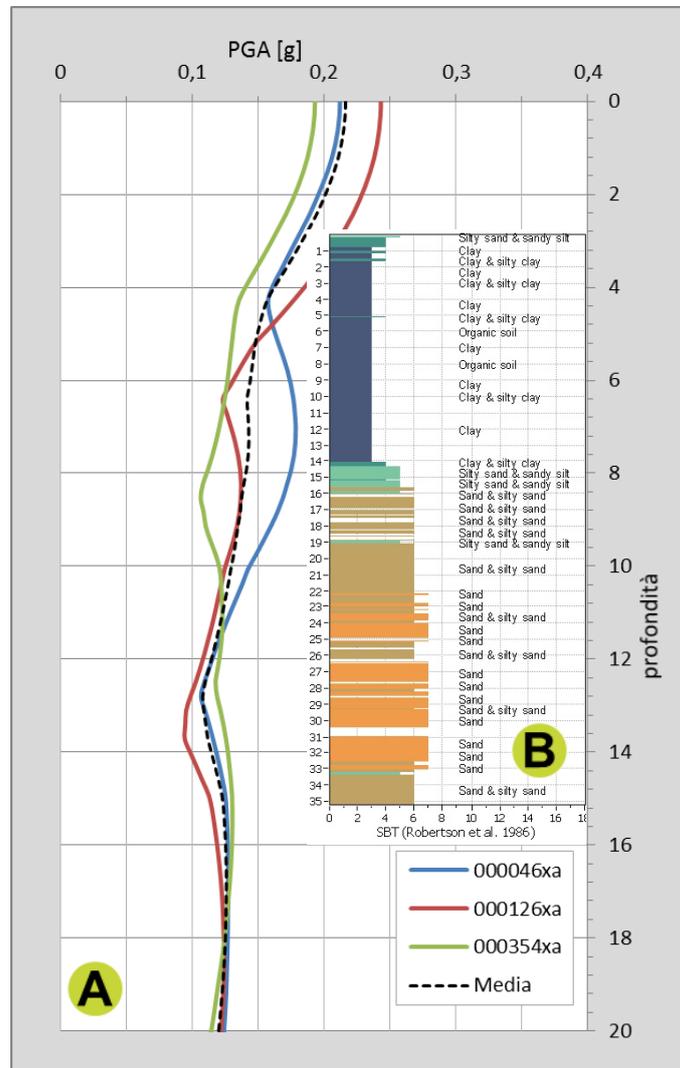


Figura 7-24 - RSL1 Casaglia. Andamento dell'accelerazione di picco con la profondità nei primi 20 m di sottosuolo (A) e relativa stratigrafia semplificata (B).

Con una accelerazione massima attesa in superficie pari a 0,23 g (Figura 7-24) si ottiene un fattore di amplificazione $FA(PGA) = 1,8$. I fattori di amplificazione ottenuti mediante integrazione degli spettri di output in accelerazione e in pseudovelocità per prefissati periodi di vibrazione sono riassunti in Tabella 7-8.

PGA	SA1	SA2	SA3	SA4	SI1	SI2	SI3
1,8	2,0	2,7	2,5	2,6	2,3	2,5	2,6

Tabella 7-8 - Fattori di Amplificazione ottenuti dalla risposta sismica locale per PGA, SA1 ($0,1s \leq T \leq 0,5s$), SA2 ($0,4s \leq T \leq 0,8s$), SA3 ($0,7s \leq T \leq 1,1s$), SA4 ($0,5s \leq T \leq 1,5s$), SI1 ($0,1s \leq T \leq 0,5s$), SI2 ($0,5s \leq T \leq 1,0s$), SI3 ($0,5s \leq T \leq 1,5s$).

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

RSL2A - Centro storico - MOPS 30502006

In Figura 7-25 si riporta la funzione di trasferimento, definita come il rapporto tra lo spettro di Fourier del segnale in superficie in funzione della frequenza per i tre accelerogrammi di input e per la loro media. Si osserva una prima amplificazione a frequenza di circa 0,35 Hz ed una a circa 0,78 Hz, in sostanziale accordo con quanto riscontrato dalle misure di rumore ambientale. Altri picchi sono visibili nella funzione di trasferimento a frequenze maggiori, alcune delle quali sono armoniche delle precedenti. La presenza di tali armoniche appare legata al basso smorzamento delle coperture.

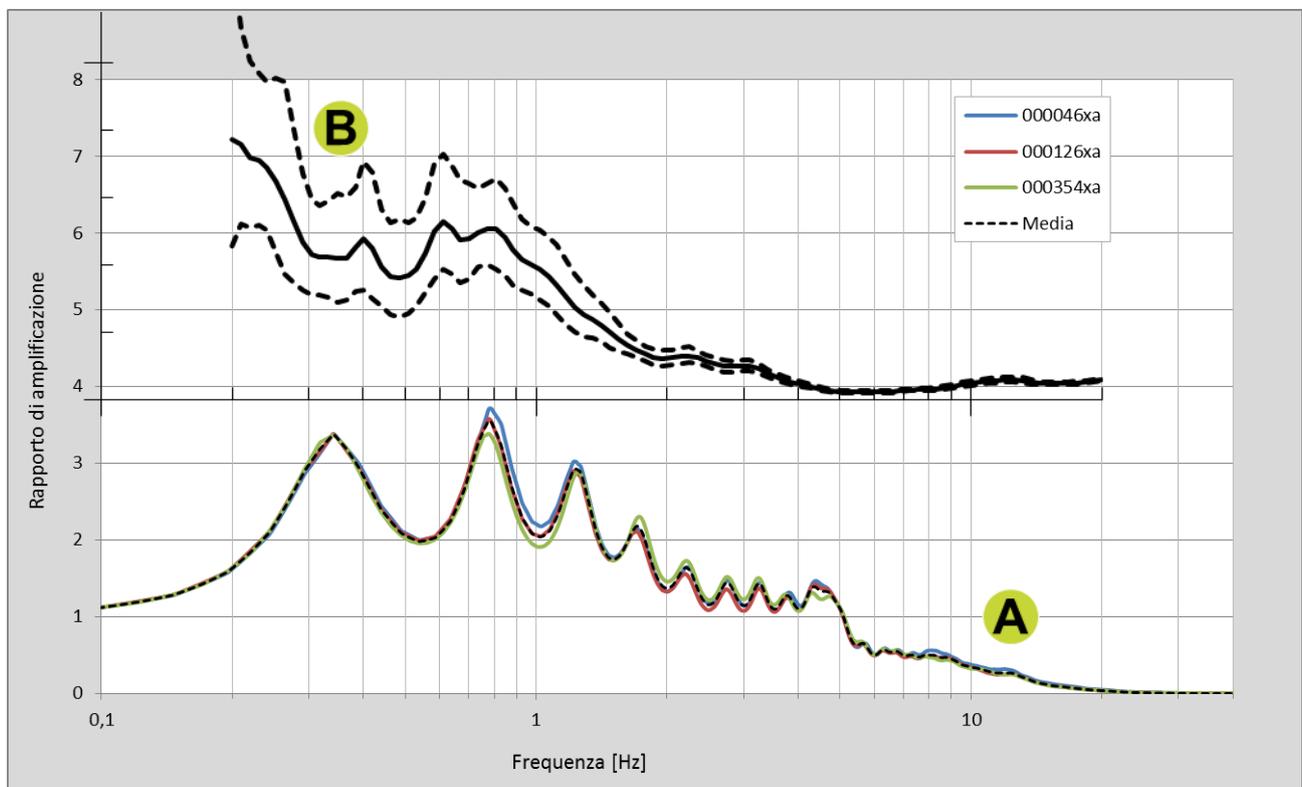


Figura 7-25 - RSL2A Centro storico. Funzione di trasferimento (rapporto di amplificazione tra lo spettro del moto in superficie ed al bedrock) per i 3 terremoti di Figura 7-19 e per la loro media. Dalla figura è possibile verificare il sostanziale accordo tra le frequenze ottenute dalla modellazione di risposta sismica locale (A) ed il dato sperimentale (B) acquisito mediante misure di rumore sismico ambientale (185160R025).

In Figura 7-26 si riportano gli spettri di risposta dell'oscillatore armonico tipo ad un grado di libertà, in funzione del periodo proprio della struttura e per uno smorzamento tipico del 5%, e del loro spettro medio, ottenuti a partire dagli accelerogrammi di Figura 7-19. Appare evidente come gli spettri di risposta ottenuti risentano significativamente dei singoli moti di input (segnali ricavati da D.G.R. n. 630/2019).

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

Lo spettro medio risulta, infatti, affetto da una elevata deviazione standard, sostanzialmente dovuta alla diversità dei tre terremoti utilizzati come segnali di input nella modellazione numerica.

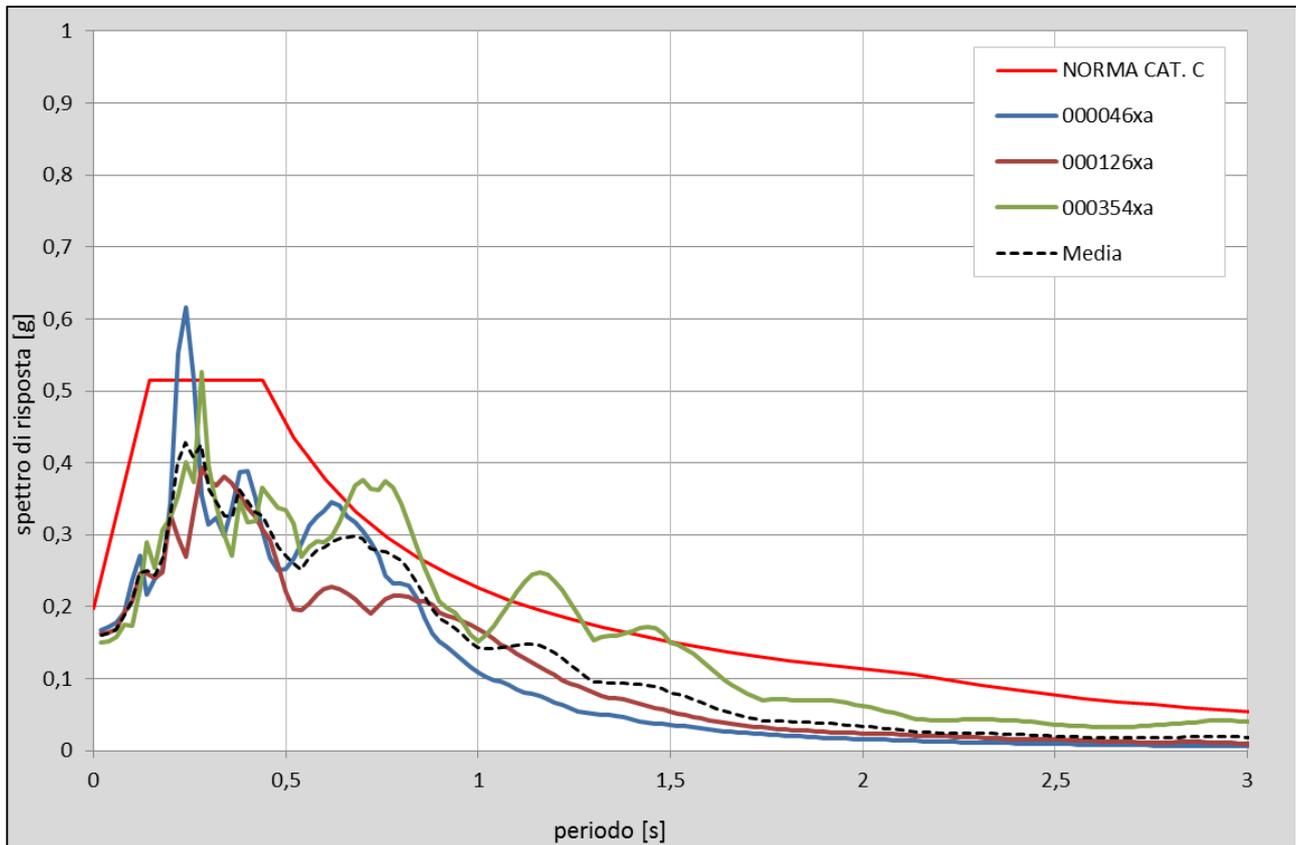


Figura 7-26 - RSL2A Centro storico. Spettri di risposta in superficie per i tre accelerogrammi ed il loro spettro medio, messi a confronto con lo spettro per la categoria C secondo le NTC2018.

In Figura 7-27 è infine riportato l'andamento dell'accelerazione massima attesa (PGA) nei primi 20 m di sottosuolo per i tre terremoti di input e per la loro media. Dal grafico si nota un generale e progressivo aumento dell'accelerazione al diminuire della profondità, che diventa più accentuato tra gli 8 metri e la superficie.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

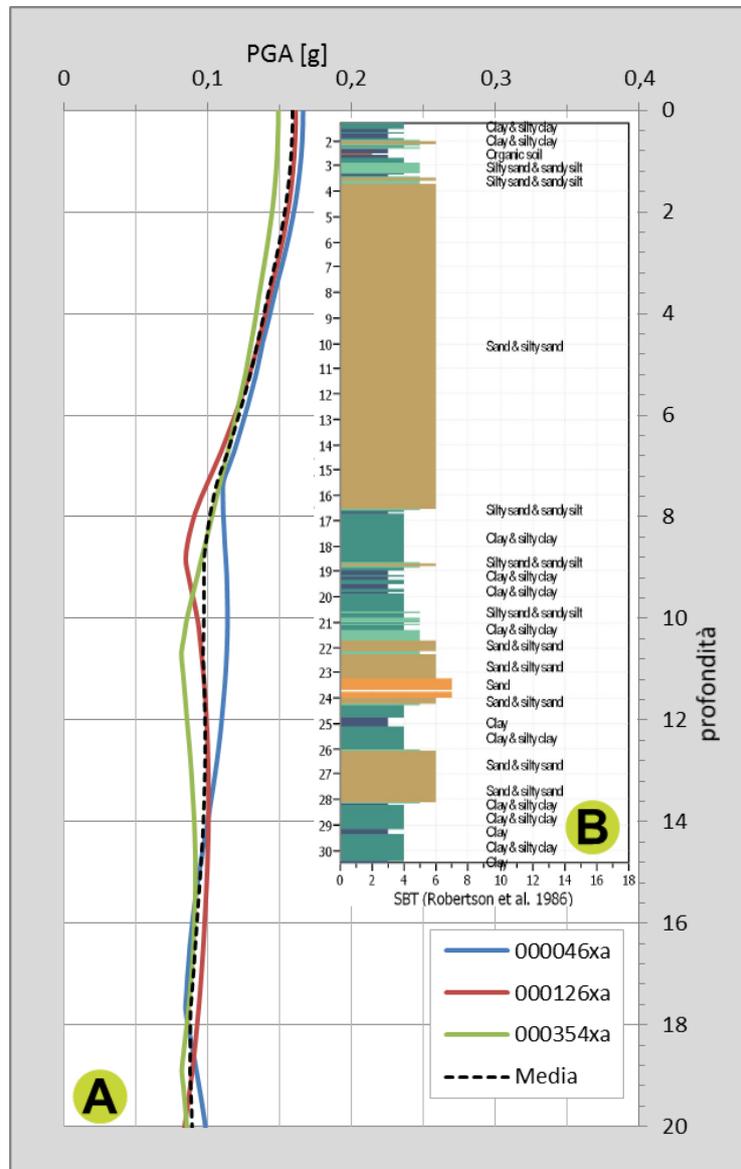


Figura 7-27 - RSL2A Centro storico. Andamento dell'accelerazione di picco con la profondità nei primi 20 m di sottosuolo (A) e relativa stratigrafia semplificata (B).

Con una accelerazione massima attesa in superficie pari a 0,16 g (Figura 7-27) si ottiene un fattore di amplificazione $FA(PGA) = 1,2$. I fattori di amplificazione ottenuti mediante integrazione degli spettri di output in accelerazione e in pseudovelocità per prefissati periodi di vibrazione sono riassunti in Tabella 7-9.

PGA	SA1	SA2	SA3	SA4	SI1	SI2	SI3
1,2	1,2	1,9	2,3	2,2	1,3	2,1	2,2

Tabella 7-9 - Fattori di Amplificazione ottenuti dalla risposta sismica locale per PGA, SA1 (0,1s≤T≤0,5s), SA2 (0,4s≤T≤0,8s), SA3 (0,7s≤T≤1,1s), SA4 (0,5s≤T≤1,5s), SI1 (0,1s≤T≤0,5s), SI2 (0,5s≤T≤1,0s), SI3 (0,5s≤T≤1,5s).

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

RSL2B - Centro storico - MOPS 2003

In Figura 7-28 si riporta la funzione di trasferimento, definita come il rapporto tra lo spettro di Fourier del segnale in superficie in funzione della frequenza per i tre accelerogrammi di input e per la loro media. Si osserva una prima amplificazione a frequenza di circa 0,32 Hz e una a circa 0,75 Hz. Altri picchi sono visibili nella funzione di trasferimento a frequenze maggiori, alcune delle quali sono armoniche delle precedenti. La presenza di tali armoniche appare legata al basso smorzamento delle coperture.

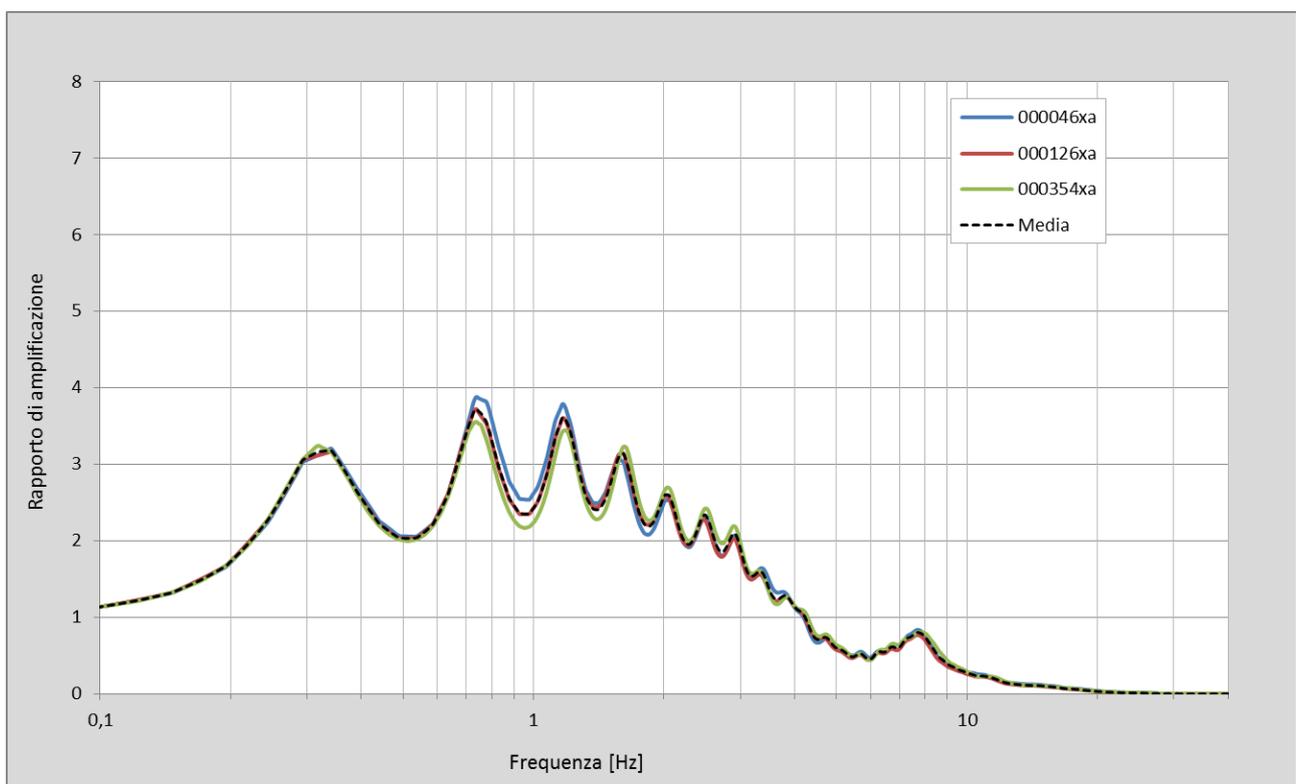


Figura 7-28 - RSL2B Centro storico. Funzione di trasferimento (rapporto di amplificazione tra lo spettro del moto in superficie ed al bedrock) per i 3 terremoti di Figura 7-19 e per la loro media.

In Figura 7-29 si riportano gli spettri di risposta dell'oscillatore armonico tipo ad un grado di libertà, in funzione del periodo proprio della struttura e per uno smorzamento tipico del 5%, e del loro spettro medio, ottenuti a partire dagli accelerogrammi di Figura 7-19. Appare evidente come gli spettri di risposta ottenuti risentano significativamente dei singoli moti di input (segnali ricavati da D.G.R. n. 630/2019). Lo spettro medio risulta, infatti, affetto da una elevata deviazione standard, sostanzialmente dovuta alla diversità dei tre terremoti utilizzati come segnali di input nella modellazione numerica.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

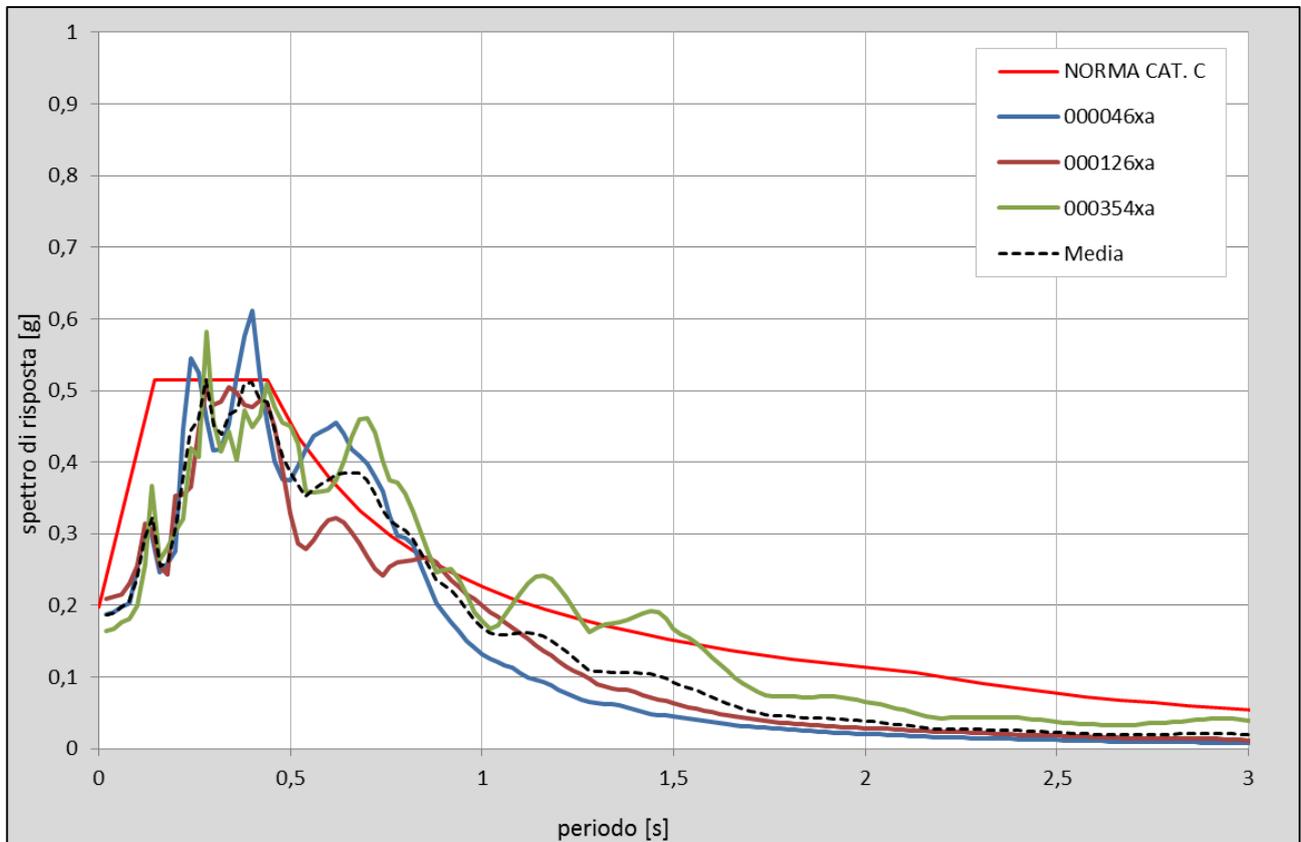


Figura 7-29 - RSL2B Centro storico. Spettri di risposta in superficie per i tre accelerogrammi ed il loro spettro medio, messi a confronto con lo spettro per la categoria C secondo le NTC2018.

In Figura 7-30 è infine riportato l'andamento dell'accelerazione massima attesa (PGA) nei primi 20 m di sottosuolo per i tre terremoti di input e per la loro media. Dal grafico si nota un generale e progressivo aumento dell'accelerazione al diminuire della profondità, che diventa più accentuato tra i 5 metri e la superficie.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

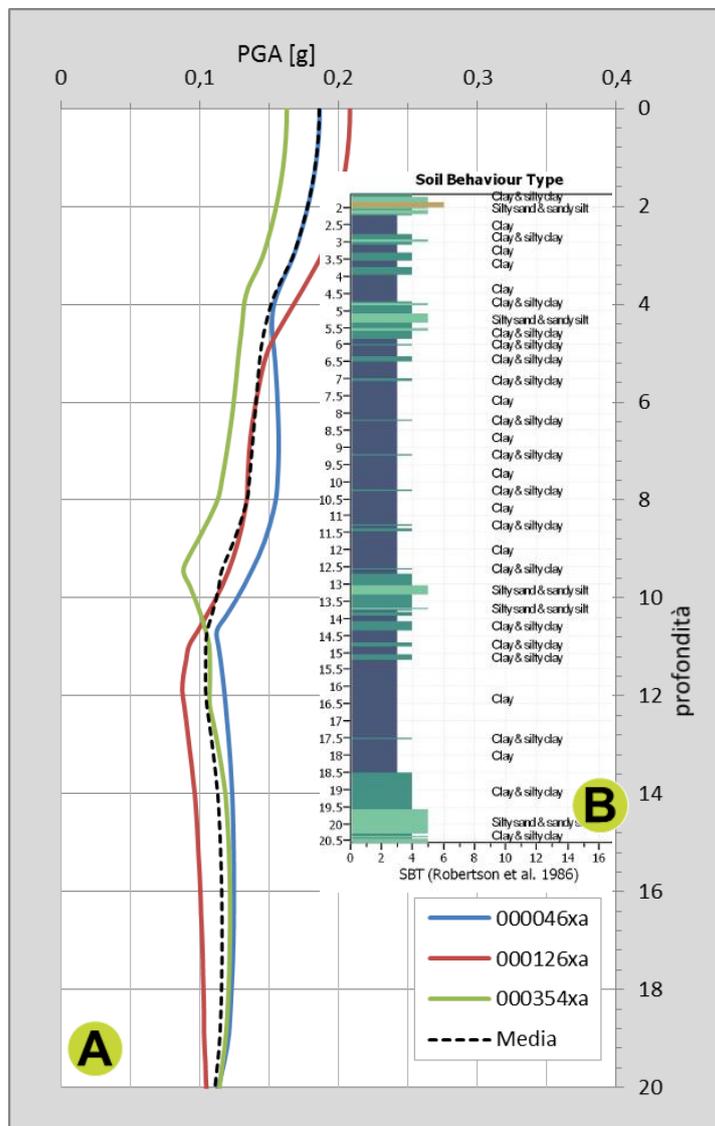


Figura 7-30 - RSL2B Centro storico. Andamento dell'accelerazione di picco con la profondità nei primi 20 m di sottosuolo (A) e relativa stratigrafia semplificata (B).

Con una accelerazione massima attesa in superficie pari a 0,19 g (Figura 7-30) si ottiene un fattore di amplificazione $FA(PGA) = 1,4$. I fattori di amplificazione ottenuti mediante integrazione degli spettri di output in accelerazione e in pseudovelocità per prefissati periodi di vibrazione sono riassunti in Tabella 7-10.

PGA	SA1	SA2	SA3	SA4	SI1	SI2	SI3
1,4	1,6	2,5	2,7	2,7	1,7	2,7	2,7

Tabella 7-10 - Fattori di Amplificazione ottenuti dalla risposta sismica locale per PGA, SA1 (0,1s≤T≤0,5s), SA2 (0,4s≤T≤0,8s), SA3 (0,7s≤T≤1,1s), SA4 (0,5s≤T≤1,5s), SI1 (0,1s≤T≤0,5s), SI2 (0,5s≤T≤1,0s), SI3 (0,5s≤T≤1,5s).

7.3 Zone instabili soggette a liquefazione

Considerato il contesto sismotettonico ed il carattere pianeggiante del territorio in cui si colloca il Comune di Ferrara, le instabilità sismoindotte attese nell'area sono da imputare a potenziali fenomeni di liquefazione ed espansione laterale (*lateral spreading*) oltre che a cedimenti differenziali.

I numerosi dati geognostici raccolti a supporto dello studio per l'adeguamento del quadro conoscitivo geologico-sismico comunale, sono stati singolarmente analizzati rispetto alle possibili criticità legate alla natura dei terreni attraversati. Le valutazioni hanno permesso di identificare ampie aree caratterizzate dalla presenza di sedimenti granulari sub-affioranti, poco addensati e saturi in acqua, in analogia con quanto evidenziato dagli studi realizzati nei comuni dell'Alto Ferrarese in seguito agli eventi sismici del 2012.

Questi sedimenti granulari hanno dato luogo ad estesi fenomeni di liquefazione ed espansione laterale in aree limitrofe a quella in esame (es. Tortiola - Paleoalveo del Po), interessando però corpi sedimentari che proseguono all'interno del territorio di Ferrara. Singole liquefazioni sono state segnalate nel 2012 anche nell'area di Casaglia, mentre abbondanti fonti storiche (Guidoboni 1984 e 1987; Guidoboni *et al.*, 2007) descrivono quelle avvenute nell'area urbana durante la crisi sismica del 1570.

La delimitazione delle aree potenzialmente liquefacibili è stata coadiuvata dai risultati ottenuti mediante tecniche d'interpolazione statistica tridimensionale applicate ad un sottoinsieme di dati geognostici disponibili nell'area urbana e periurbana di Ferrara (paragrafo 7.1.1, Figura 7-3).

Tali tecniche hanno permesso la ricostruzione tridimensionale automatica dei corpi sedimentari presenti nei primi 30 m di sottosuolo. I risultati sono stati restituiti graficamente come volumi e profili stratigrafici sintetici (e. g. Figura 7-7, Figura 7-10) che hanno consentito un'accurata definizione dell'estensione dei corpi potenzialmente liquefacibili, facilitando così l'elaborazione della cartografia di sintesi delle aree suscetibili di effetti locali (Tavole D₁₋₉). I caratteri identificati sono stati poi estesi all'intero territorio comunale mediante correlazioni puntuali tra le indagini disponibili.

Per ottenere valutazioni quantitative della suscettibilità a liquefazione nelle aree classificate instabili, sono state eseguite stime dell'indice di potenziale liquefazione (I_L) con le procedure semplificate indicate negli indirizzi regionali per la microzonazione sismica (paragrafo 7.3.1). Tali stime sono state eseguite su tutte le indagini penetrometriche con piezocono disponibili in formato numerico, archiviate durante lo studio (Allegato 3).

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

7.3.1 Verifiche del potenziale di liquefazione

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

Durante un evento sismico la pressione interstiziale dell'acqua, che è fluido incomprimibile, aumenta fino ad eguagliare le tensioni efficaci che legano i sedimenti granulari. L'annullamento della resistenza al taglio dovuto alle sovrappressioni indotte dallo scuotimento conduce alla liquefazione dei terreni, con conseguente perdita di capacità portante degli stessi e manifestazione di deformazioni permanenti, come ampiamente osservato nell'area modenese e ferrarese in occasione della sequenza sismica del 2012. In seguito agli eventi del 2012, nell'area epicentrale emiliana sono stati effettuati molti studi di microzonazione sismica (Ordinanza R.E.R. 70/2012, O.C.D.P.C. 171/2014, O.C.D.P.C. 293/2015) nell'ambito dei quali sono state eseguite molteplici stime del potenziale di liquefazione mediante procedure semplificate suggerite da indirizzi regionali (D.A.L. 112/2007, D.G.R. 2193/2015, D.G.R. 630/2019) e nazionali (Gruppo di lavoro MS, 2008).

Il confronto tra i vari metodi di letteratura, tutti applicati su indagini penetrometriche statiche, ha permesso di concludere che i valori degli indici di liquefazione I_L (Iwasaki *et al.*, 1982) ottenuti con i metodi di Idriss e Boulanger (2008) e Boulanger e Idriss (2014) fossero da considerare maggiormente attendibili di altri e compatibili con gli effetti di liquefazione osservati nel 2012.

Nell'ambito di questo studio sono state eseguite stime del potenziale di liquefazione su ben 447 prove penetrometriche a piezocono CPTu distribuite come riportato nelle Tavole dalla F_{1+9} alla N_{1+9} . Le stime, effettuate con vari metodi, hanno evidenziato come il metodo di Boulanger e Idriss (2014) fornisca di norma indici più elevati rispetto ad altri metodi di letteratura (cfr. Idriss e Boulanger, 2008 e Robertson, 2009). Gli indici ottenuti con il metodo di Boulanger e Idriss (2014) sono stati considerati affidabili e maggiormente cautelativi, ragione per cui sono stati adottati per la realizzazione delle cartografie di sintesi dello studio.

Come parametri di input per la modellazione sono stati utilizzati i valori riportati in Tabella 7-11. Il valore di Mw_{max} corrisponde a quello massimo atteso per la Zona 912 della Zonazione Sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004 - Figura 2-8), mentre la PGA è stata derivata moltiplicando l'accelerazione orizzontale di picco attesa al bedrock $a_{g,ref}$ per i fattori di amplificazione FA_{PGA} proposti dagli abachi della D.G.R. n. 630 del 29 aprile 2019.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

Considerata la notevole estensione del territorio comunale, suddiviso in ben 24 sezioni topografiche al 10.000, e le importanti variazioni di $a_{g,ref}$ nell'area, si è deciso di discretizzare il parametro attribuendo ad ogni quadrate (Figura 7-31), un valore di $a_{g,ref}$ derivato dalla media ponderata dei valori di accelerazione ai nodi del reticolo su cui si basa la mappa di pericolosità sismica nazionale INGV (T_R 475 anni, 50^{esimo} percentile).

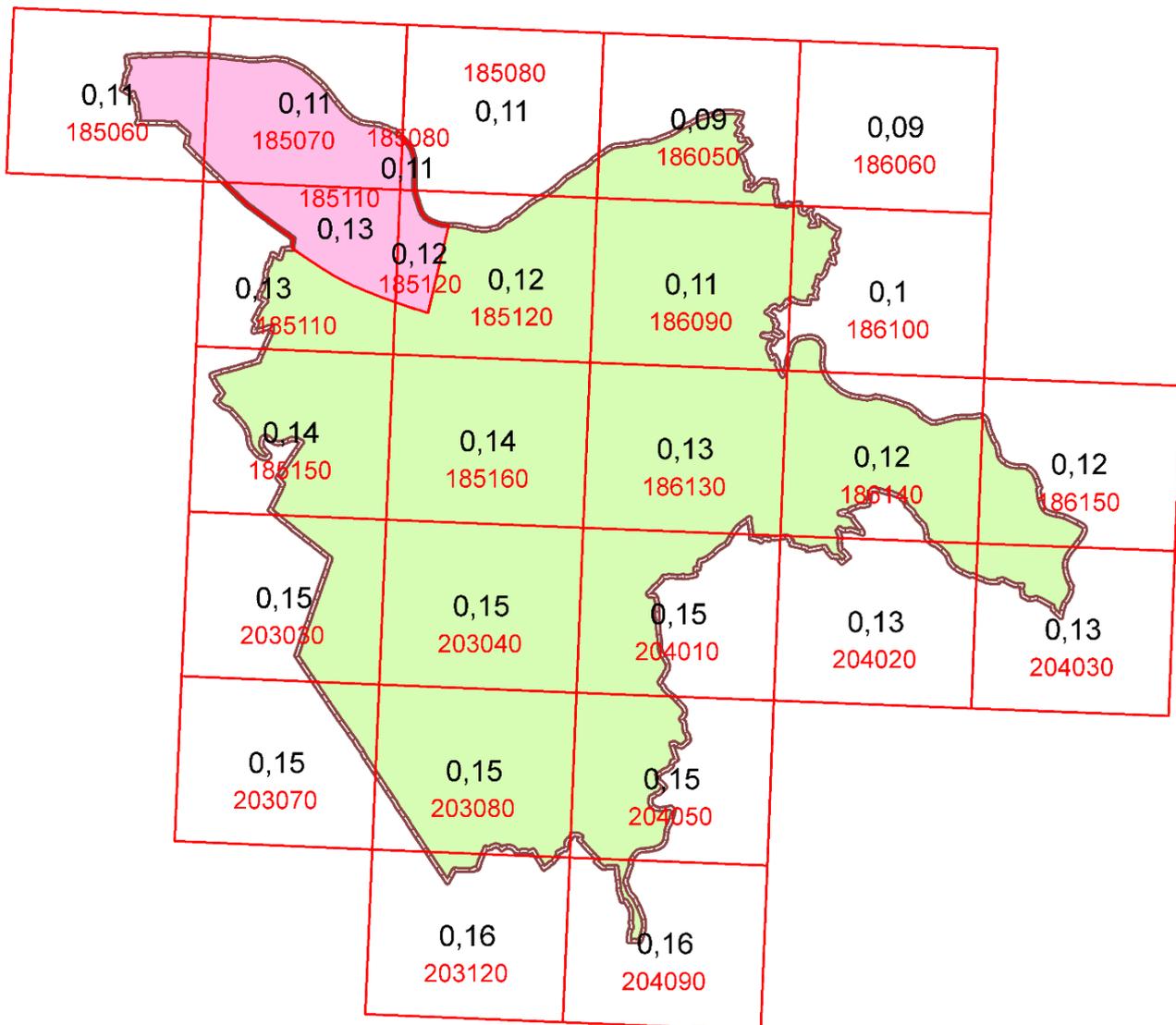


Figura 7-31 - Grigliato delle sezioni topografiche alla scala 1:10.000 in cui è suddiviso in territorio del Comune di Ferrara. Ad ogni riquadro è stato associato un valore di $a_{g,ref}$ medio ottenuto dalla mappa di pericolosità sismica di base INGV. In colore rosa è indicata l'area per la quale è stato utilizzato l'abaco di "Pianura 2" per la stima di amplificazione del moto sismico. In verde è invece rappresentata l'area nella quale sono stati applicati i fattori di amplificazione proposto dall'abaco di "Pianura 3". In rosso sono indicati i codici identificativi delle sezioni topografiche, mentre in nero i valori di $a_{g,ref}$ associati a ciascun riquadro.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

I valori di PGA sono stati ottenuti moltiplicando quelli di ag_{ref} per i fattori di amplificazione proposti dagli abachi utilizzati, ovvero:

- $FA_{PGA} = 1,7$ (cfr. abaco “Pianura 2” - D.G.R. n. 630/2019) per le zone di “alto strutturale” con substrato sismico entro i 150 m (porzione nord-occidentale del territorio comunale);
- $FA_{PGA} = 1,3$ (cfr. abaco “Pianura 3” - D.G.R. n. 630/2019) per le zone con substrato sismico oltre i 300 m (porzione nord-orientale e meridionale del territorio comunale).

In mancanza di studi idrogeologici di dettaglio e di analisi storico-statistiche sull’andamento delle isofreatiche, per la stima delle soggiacenze di falda da utilizzare nelle verifiche a liquefazione sono stati considerati valori maggiormente cautelativi rispetto a quelli misurati nel corso di diverse campagne di indagini geognostiche.

Mediante analisi morfologica del modello altimetrico di superficie (LIDAR) il territorio comunale è stato suddiviso in zone interalvee, zone di dosso morfologico naturale e zone con rilevati pronunciati artificiali. A queste aree sono stati attribuiti valori di soggiacenza della falda variabili rispettivamente da 1 a 3 m, come già proposto per le analisi di suscettività a liquefazione eseguite negli studi di microzonazione post-sisma (Martelli *et al.*, 2013; Martelli e Romani, 2013). In particolare sono state adottate le seguenti soggiacenze:

- 1 m, per le aree interalvee;
- 2 m, in presenza di dossi morfologici naturali;
- 3 m, in presenza di rilevati artificiali pronunciati (ad esempio arginature).

PARAMETRO	SEZIONE	PGA (g)	Mw_{max}	FALDA (m)
Zona di anticlinale (Pianura 2 - D.G.R. n. 630/2019)	185060	0,19	6,14	1 m (in zona interalvea) 2 m (in <u>presenza</u> di dosso morfologico) 3m (in <u>presenza</u> di rilevati artificiali pronunciati)
	185070	0,19		
	185080	0,19		
	185110	0,22		
	185120	0,20		
Zona di sinclinale (Pianura 3 - D.G.R. n. 630/2019)	185080	0,14	6,14	1 m (in zona interalvea) 2 m (in <u>presenza</u> di dosso morfologico) 3m (in <u>presenza</u> di rilevati artificiali pronunciati)
	185110	0,17		
	185120	0,16		
	185150	0,18		
	185160	0,18		
	186050	0,12		
	186060	0,12		

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

186090	0,14
186100	0,13
186130	0,17
186140	0,16
186150	0,16
203030	0,19
203040	0,19
203070	0,19
203080	0,19
203120	0,21
204010	0,19
204020	0,17
204030	0,17
204050	0,19
204090	0,21

Tabella 7-11 - Parametri di input per la verifica del potenziale di liquefazione mediante metodo di Boulanger e Idriss (2014).

I valori puntuali di I_L ottenuti mediante il software "Cliq 2.0" della *Geologismiki Geotechnical Software*, sono rappresentati in carta (Tavole dalla F_{1÷9} alla N_{1÷9}) suddivisi per classi, secondo Sonmez (2003), in modo da poter distinguere tra aree a rischio di liquefazione basso ($0 < I_L \leq 2$), moderato ($2 < I_L \leq 5$), alto ($5 < I_L \leq 15$) e molto alto ($I_L > 15$).

In Tabella 7-12 sono riportati i valori di I_L relativi alle 447 indagini penetrometriche con punta elettrica analizzate nell'ambito dello studio, mentre i rapporti di calcolo delle verifiche effettuate sono raccolti nell'Allegato 3 alla presente relazione.

CODICE	PGA (g)	M _w max	FALDA (m)	IL BOULANGER E IDRIS (2014)
185060B001	0,19	6,14	1	12
185060U504	0,19	6,14	1	2,7
185060U517	0,19	6,14	1	4
185060U518	0,19	6,14	1	3,4
185060U519	0,19	6,14	1	2,3
185060U520	0,19	6,14	3	0,8
185060U521	0,19	6,14	1	2,4
185060U523	0,19	6,14	1	2,1
185060U524	0,19	6,14	1	2,5
185060U525	0,19	6,14	1	3,7
185070B001	0,19	6,14	1	7,8

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL
COMUNE DI FERRARA

185070B002	0,19	6,14	2	2,4
185070U502	0,19	6,14	1	6,8
185070U503	0,19	6,14	1	1,7
185070U504	0,19	6,14	1	1,1
185070U505	0,19	6,14	1	2,4
185070U506	0,19	6,14	1	5,4
185070U507	0,19	6,14	1	3,2
185070U508	0,19	6,14	1	7,7
185070U509	0,19	6,14	1	11,7
185070U510	0,19	6,14	3	1,2
185070U511	0,19	6,14	1	3,1
185070U512	0,19	6,14	1	12,6
185070U513	0,19	6,14	3	3
185070U514	0,19	6,14	1	14,2
185070U515	0,19	6,14	3	0,2
185070U516	0,19	6,14	1	6,3
185070U517	0,19	6,14	1	2,1
185070U518	0,19	6,14	1	1
185070U519	0,19	6,14	1	0,2
185070U520	0,19	6,14	1	11,7
185070U521	0,19	6,14	3	2,2
185070U522	0,19	6,14	1	4,1
185080B001	0,14	6,14	1	0,5
185080U501	0,14	6,14	3	0
185080U502	0,14	6,14	3	0
185080U503	0,14	6,14	1	0,9
185080U505	0,14	6,14	1	5,6
185110B001	0,17	6,14	2	6,4
185110B002	0,17	6,14	1	2,1
185110B003	0,17	6,14	1	5,4
185110B004	0,17	6,14	1	13,6
185110B005	0,17	6,14	1	8,4
185110B006	0,17	6,14	1	7,1
185110B007	0,17	6,14	1	3,3
185110U001	0,17	6,14	1	8,5
185110U002	0,17	6,14	1	12,4
185110U501	0,22	6,14	1	4,9
185110U502	0,22	6,14	1	3,3
185110U504	0,17	6,14	1	2,6
185120B001	0,16	6,14	1	2
185120B002	0,16	6,14	1	1,8

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL
COMUNE DI FERRARA

185120B003	0,16	6,14	1	2
185120B004	0,16	6,14	1	1,4
185120B005	0,16	6,14	1	4,5
185120B006	0,16	6,14	1	3,3
185120B007	0,16	6,14	1	1,5
185120B008	0,16	6,14	1	1
185120B009	0,16	6,14	1	0,5
185120B010	0,16	6,14	1	2,1
185120B011	0,16	6,14	1	3,8
185120B012	0,16	6,14	1	1,8
185120B013	0,16	6,14	1	0,8
185120B014	0,16	6,14	1	1,1
185120B015	0,16	6,14	1	0,8
185120B016	0,16	6,14	1	2,1
185120B017	0,16	6,14	1	1,5
185120B018	0,16	6,14	1	0,8
185120B019	0,16	6,14	1	0,8
185120B020	0,16	6,14	1	2
185120B021	0,16	6,14	1	1,7
185120B022	0,16	6,14	1	6,2
185120B023	0,16	6,14	1	1,1
185120B024	0,16	6,14	1	1,9
185120B025	0,16	6,14	1	1
185120B026	0,16	6,14	1	0,5
185120B027	0,16	6,14	1	2
185120B029	0,16	6,14	1	0,8
185120B030	0,16	6,14	1	0,3
185120B031	0,16	6,14	1	0,5
185120U010	0,16	6,14	1	2,1
185120U011	0,16	6,14	1	4,1
185120U012	0,16	6,14	1	3,3
185120U013	0,16	6,14	1	5,2
185120U014	0,16	6,14	1	2,1
185120U015	0,16	6,14	1	3,3
185120U016	0,16	6,14	1	2,8
185120U017	0,16	6,14	1	4,7
185120U018	0,16	6,14	1	5,5
185120U019	0,16	6,14	1	4,6
185120U020	0,16	6,14	1	4,2
185120U021	0,16	6,14	1	5,8
185120U022	0,16	6,14	1	5,3

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL
COMUNE DI FERRARA

185120U024	0,16	6,14	1	2,3
185120U025	0,16	6,14	1	4,2
185120U026	0,16	6,14	1	3,1
185120U027	0,16	6,14	1	4,2
185120U028	0,16	6,14	1	6,5
185120U029	0,16	6,14	1	4,5
185120U030	0,16	6,14	1	4,6
185120U031	0,16	6,14	1	6,5
185120U032	0,16	6,14	1	5
185120U033	0,16	6,14	1	4,9
185120U034	0,16	6,14	1	0,3
185120U035	0,16	6,14	1	0,7
185120U501	0,16	6,14	1	2,7
185120U502	0,2	6,14	1	8,2
185120U503	0,2	6,14	3	1,1
185120U504	0,2	6,14	1	2,1
185120U505	0,2	6,14	1	2,4
185120U506	0,2	6,14	3	1
185120U507	0,2	6,14	1	4,2
185120U508	0,2	6,14	1	3
185120U509	0,2	6,14	3	0,2
185120U510	0,2	6,14	1	2,2
185120U511	0,16	6,14	1	4,5
185120U512	0,16	6,14	1	2,1
185120U513	0,16	6,14	1	2,6
185120U514	0,16	6,14	1	1,6
185120U515	0,16	6,14	1	3
185120U516	0,16	6,14	1	5,6
185120U518	0,16	6,14	3	0,8
185120U519	0,16	6,14	1	5,3
185120U520	0,16	6,14	1	2,1
185120U521	0,16	6,14	3	0,1
185120U522	0,16	6,14	1	1,2
185150B001	0,18	6,14	1	1,4
185150B002	0,18	6,14	1	4
185150B003	0,18	6,14	1	2,3
185150B004	0,18	6,14	1	1,4
185150U001	0,18	6,14	2	6,2
185150U501	0,18	6,14	1	2,1
185150U502	0,18	6,14	2	2,5
185150U503	0,18	6,14	1	7,6

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL
COMUNE DI FERRARA

185150U504	0,18	6,14	1	1
185160B002	0,18	6,14	1	2,1
185160B003	0,18	6,14	1	0,3
185160B004	0,18	6,14	1	0,2
185160B005	0,18	6,14	1	1,7
185160B006	0,18	6,14	1	0,6
185160B007	0,18	6,14	1	1,2
185160B008	0,18	6,14	1	0,9
185160B009	0,18	6,14	1	0
185160B010	0,18	6,14	1	2,4
185160B011	0,18	6,14	1	0,1
185160B012	0,18	6,14	1	1,8
185160B013	0,18	6,14	1	0,7
185160B014	0,18	6,14	2	7,6
185160B015	0,18	6,14	1	2
185160B016	0,18	6,14	1	1,5
185160B017	0,18	6,14	1	1,7
185160B018	0,18	6,14	1	1,3
185160B019	0,18	6,14	1	2,6
185160B020	0,18	6,14	1	5,7
185160B021	0,18	6,14	1	3
185160B022	0,18	6,14	2	2,5
185160B023	0,18	6,14	1	3,3
185160B024	0,18	6,14	1	0,3
185160B025	0,18	6,14	1	2
185160B026	0,18	6,14	1	1,2
185160B028	0,18	6,14	1	0,8
185160B029	0,18	6,14	1	0,9
185160B030	0,18	6,14	2	4,1
185160B031	0,18	6,14	2	5,1
185160B032	0,18	6,14	1	1,2
185160B033	0,18	6,14	1	5,1
185160B034	0,18	6,14	1	2,3
185160B035	0,18	6,14	1	1,4
185160B036	0,18	6,14	1	1,1
185160B038	0,18	6,14	1	4,5
185160B039	0,18	6,14	1	4,1
185160B040	0,18	6,14	1	6,1
185160B041	0,18	6,14	1	3,6
185160B042	0,18	6,14	1	4
185160B043	0,18	6,14	1	6,7

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL
COMUNE DI FERRARA

185160B044	0,18	6,14	1	5,6
185160B045	0,18	6,14	2	7,4
185160B046	0,18	6,14	1	2
185160B047	0,18	6,14	1	7,7
185160B048	0,18	6,14	1	1,4
185160B049	0,18	6,14	1	1,6
185160B051	0,18	6,14	1	6,8
185160B052	0,18	6,14	1	1,9
185160B053	0,18	6,14	1	10,7
185160B054	0,18	6,14	1	0,7
185160B056	0,18	6,14	1	8,5
185160B057	0,18	6,14	1	0,8
185160B058	0,18	6,14	2	8,3
185160B059	0,18	6,14	1	5,3
185160B060	0,18	6,14	1	4,1
185160B061	0,18	6,14	1	7,9
185160B062	0,18	6,14	1	1,6
185160B063	0,18	6,14	1	5,1
185160B064	0,18	6,14	1	1
185160B065	0,18	6,14	1	2
185160B066	0,18	6,14	1	0,4
185160B067	0,18	6,14	2	8,4
185160B068	0,18	6,14	2	6,1
185160B069	0,18	6,14	2	4,1
185160B071	0,18	6,14	1	2
185160B073	0,18	6,14	1	0
185160B074	0,18	6,14	1	1,9
185160B075	0,18	6,14	2	3,3
185160B076	0,18	6,14	1	6,2
185160B077	0,18	6,14	1	7,3
185160B078	0,18	6,14	1	1,3
185160B080	0,18	6,14	1	3,9
185160B081	0,18	6,14	1	2
185160B082	0,18	6,14	1	11,8
185160B083	0,18	6,14	1	4,9
185160B085	0,18	6,14	2	6,9
185160B086	0,18	6,14	2	6,9
185160B087	0,18	6,14	2	5,9
185160B088	0,18	6,14	1	0,1
185160B090	0,18	6,14	1	0,1
185160B092	0,18	6,14	2	6,9

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL
COMUNE DI FERRARA

185160B093	0,18	6,14	1	2
185160B094	0,18	6,14	2	4,3
185160B095	0,18	6,14	2	2,6
185160B096	0,18	6,14	1	1,8
185160B097	0,18	6,14	1	5,4
185160B099	0,18	6,14	1	3,3
185160B100	0,18	6,14	1	4,7
185160B101	0,18	6,14	1	4,2
185160B102	0,18	6,14	1	8,6
185160B103	0,18	6,14	1	3,4
185160B104	0,18	6,14	2	3,4
185160B105	0,18	6,14	2	2,1
185160B106	0,18	6,14	1	3,5
185160B107	0,18	6,14	1	3,7
185160B108	0,18	6,14	1	3,2
185160B109	0,18	6,14	2	10,6
185160B110	0,18	6,14	1	3,5
185160B111	0,18	6,14	2	13,8
185160B112	0,18	6,14	2	5
185160B113	0,18	6,14	1	1,4
185160B114	0,18	6,14	1	0
185160B115	0,18	6,14	1	1,2
185160B116	0,18	6,14	2	9,6
185160B117	0,18	6,14	2	5,3
185160U001	0,18	6,14	2	8,4
185160U002	0,18	6,14	2	2,9
185160U003	0,18	6,14	2	5,8
185160U008	0,18	6,14	1	1,9
185160U012	0,18	6,14	2	11,3
185160U016	0,18	6,14	2	2,9
185160U017	0,18	6,14	1	1,9
185160U018	0,18	6,14	1	3,5
185160U019	0,18	6,14	1	1,7
185160U020	0,18	6,14	1	0,6
185160U022	0,18	6,14	1	1,4
185160U023	0,18	6,14	2	2,1
185160U024	0,18	6,14	1	5,2
185160U025	0,18	6,14	1	5,6
185160U026	0,18	6,14	2	2,9
185160U028	0,18	6,14	1	2,1
185160U029	0,18	6,14	1	3,1

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL
COMUNE DI FERRARA

185160U034	0,18	6,14	1	4
185160U035	0,18	6,14	1	4,2
185160U036	0,18	6,14	1	1,2
185160U037	0,18	6,14	1	2,6
185160U038	0,18	6,14	1	2,4
185160U039	0,18	6,14	1	3,9
185160U040	0,18	6,14	1	2,8
185160U041	0,18	6,14	2	8,2
185160U042	0,18	6,14	1	2
185160U043	0,18	6,14	1	3,1
185160U044	0,18	6,14	2	4,4
185160U045	0,18	6,14	2	7,4
185160U046	0,18	6,14	1	12,3
185160U047	0,18	6,14	1	3,2
185160U048	0,18	6,14	1	0,3
185160U049	0,18	6,14	1	2
185160U051	0,18	6,14	1	0,4
185160U053	0,18	6,14	1	5,8
185160U054	0,18	6,14	1	0,8
185160U057	0,18	6,14	1	15,3
185160U058	0,18	6,14	1	9,4
185160U060	0,18	6,14	1	1,9
185160U061	0,18	6,14	1	0,7
185160U062	0,18	6,14	1	2
185160U063	0,18	6,14	1	0,8
185160U065	0,18	6,14	1	1,4
185160U067	0,18	6,14	1	3,7
185160U068	0,18	6,14	1	5,7
185160U069	0,18	6,14	1	2
185160U070	0,18	6,14	1	1,1
185160U071	0,18	6,14	1	2,6
185160U072	0,18	6,14	1	8,7
185160U076	0,18	6,14	1	0,6
185160U079	0,18	6,14	1	1,6
185160U080	0,18	6,14	1	7
185160U084	0,18	6,14	1	1,5
185160U086	0,18	6,14	1	11
185160U087	0,18	6,14	1	1,8
185160U088	0,18	6,14	1	1,2
185160U089	0,18	6,14	1	1,4
185160U090	0,18	6,14	1	1,2

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL
COMUNE DI FERRARA

185160U501	0,18	6,14	1	0,1
185160U502	0,18	6,14	1	1,4
185160U503	0,18	6,14	1	2
185160U504	0,18	6,14	1	0
185160U506	0,18	6,14	1	1,8
185160U507	0,18	6,14	1	1,9
185160U508	0,18	6,14	1	3,8
185160U509	0,18	6,14	1	5
186050U001	0,12	6,14	1	0
186050U002	0,12	6,14	1	0
186050U502	0,12	6,14	1	0,2
186050U503	0,12	6,14	3	0
186050U504	0,12	6,14	1	0
186050U505	0,12	6,14	1	0
186050U506	0,12	6,14	3	0
186050U507	0,12	6,14	1	0,1
186050U508	0,12	6,14	1	0,1
186050U509	0,12	6,14	1	0
186050U510	0,12	6,14	1	0
186050U511	0,12	6,14	3	0
186050U512	0,12	6,14	1	0
186090U001	0,14	6,14	1	0,1
186090U501	0,14	6,14	1	1,6
186090U502	0,14	6,14	1	0,7
186090U503	0,14	6,14	1	4,5
186090U504	0,14	6,14	1	1,8
186130B001	0,17	6,14	1	0,8
186130B003	0,17	6,14	1	1,5
186130B004	0,17	6,14	2	3,4
186130B005	0,17	6,14	1	0,5
186130B006	0,17	6,14	1	1,1
186130B007	0,17	6,14	1	3,5
186130B008	0,17	6,14	1	2
186130B009	0,17	6,14	1	5
186130B010	0,17	6,14	1	1,2
186130B011	0,17	6,14	1	11,4
186130B012	0,17	6,14	1	0,4
186130B013	0,17	6,14	1	4,2
186130B014	0,17	6,14	1	3,9
186130B016	0,17	6,14	1	5
186130B017	0,17	6,14	1	1,5

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL
COMUNE DI FERRARA

186130B018	0,17	6,14	1	3,2
186130B019	0,17	6,14	1	3
186130B020	0,17	6,14	2	7,4
186130U002	0,17	6,14	2	6
186130U003	0,17	6,14	1	1,1
186130U502	0,17	6,14	1	2,3
186130U503	0,17	6,14	2	2,4
186130U504	0,17	6,14	1	6,9
186130U505	0,17	6,14	1	8,4
186140B001	0,16	6,14	2	3,1
186140B002	0,16	6,14	1	2,2
186140B003	0,16	6,14	1	2,6
186140B004	0,16	6,14	2	6,8
186140B005	0,16	6,14	2	8,6
186140B006	0,16	6,14	2	6,9
186140U001	0,16	6,14	1	2,3
186140U002	0,16	6,14	2	4,7
186140U003	0,16	6,14	2	7,4
186140U501	0,16	6,14	2	9,7
186150U503	0,16	6,14	1	0,1
203030B001	0,19	6,14	1	2,2
203030B002	0,19	6,14	2	6,3
203030U001	0,19	6,14	2	9,6
203030U002	0,19	6,14	1	6,9
203030U003	0,19	6,14	1	5,3
203030U004	0,19	6,14	1	3,2
203030U005	0,19	6,14	1	5,3
203030U006	0,19	6,14	2	6,1
203030U007	0,19	6,14	2	10,6
203030U008	0,19	6,14	2	5,6
203030U009	0,19	6,14	1	0,2
203030U010	0,19	6,14	1	1,4
203030U011	0,19	6,14	1	2
203030U012	0,19	6,14	1	1,5
203030U013	0,19	6,14	1	0,3
203030U014	0,19	6,14	1	2,5
203030U015	0,19	6,14	1	0,8
203030U016	0,19	6,14	1	1,5
203030U017	0,19	6,14	1	8,8
203030U018	0,19	6,14	1	0,6
203030U019	0,19	6,14	1	1,3

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL
COMUNE DI FERRARA

203030U020	0,19	6,14	1	2
203030U021	0,19	6,14	1	0,6
203030U022	0,19	6,14	1	1
203030U023	0,19	6,14	1	0,9
203030U048	0,19	6,14	1	0,7
203030U049	0,19	6,14	1	6,7
203030U050	0,19	6,14	1	0
203030U051	0,19	6,14	1	0,9
203030U052	0,19	6,14	1	1,6
203030U053	0,19	6,14	1	0,8
203030U054A	0,19	6,14	1	1,3
203030U055	0,19	6,14	1	1,5
203030U057	0,19	6,14	1	1,8
203030U410	0,19	6,14	1	0,9
203030U502	0,19	6,14	1	3,9
203030U507	0,19	6,14	2	5,7
203040B001	0,19	6,14	1	1,2
203040B002	0,19	6,14	1	0,3
203040B004	0,19	6,14	1	1,1
203040B005	0,19	6,14	2	6,7
203040B006	0,19	6,14	2	6,5
203040B007	0,19	6,14	1	2,2
203040B008	0,19	6,14	1	3,8
203040B009	0,19	6,14	1	4,2
203040B010	0,19	6,14	2	11,5
203040B011	0,19	6,14	1	5,5
203040B012	0,19	6,14	2	7,2
203040U006	0,19	6,14	2	9,9
203040U501	0,19	6,14	2	3,5
203040U502	0,19	6,14	1	9,3
203040U503	0,19	6,14	1	1,3
203040U505	0,19	6,14	1	2
203040U506	0,19	6,14	1	1,5
203040U507	0,19	6,14	1	14,7
203040U508	0,19	6,14	1	15,5
203040U509	0,19	6,14	1	8,2
203070U508	0,19	6,14	1	7,1
203080B001	0,19	6,14	1	2
203080B002	0,19	6,14	1	2,7
203080B003	0,19	6,14	2	4,2
203080U001	0,19	6,14	1	0,5

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL
COMUNE DI FERRARA

203080U002	0,19	6,14	1	0,4
203080U502	0,19	6,14	1	4,8
203080U503	0,19	6,14	1	0,4
203080U504	0,19	6,14	2	3,7
203080U505	0,19	6,14	1	2,9
203080U507	0,19	6,14	1	5,4
203080U509	0,19	6,14	1	2,3
203120U509	0,21	6,14	2	7,3
204010B001	0,19	6,14	1	1,9
204010B002	0,19	6,14	1	0,1
204010B003	0,19	6,14	1	0,3
204010U504	0,19	6,14	1	11,5
204010U507	0,19	6,14	1	1,7
204010U508	0,19	6,14	1	3,2
204010U511	0,19	6,14	1	2
204010U512	0,19	6,14	1	4,6
204010U515	0,19	6,14	1	7,3
204020U509	0,17	6,14	1	6,7
204030U501	0,17	6,14	1	2
204030U502	0,17	6,14	1	4
204050B001	0,19	6,14	1	7,6
204050B002	0,19	6,14	1	1,7
204050U501	0,19	6,14	1	3,1
204050U502	0,19	6,14	1	2,3
204050U504	0,19	6,14	1	2,8
204050U505	0,19	6,14	2	8,7

Tabella 7-12 - Indice del potenziale di liquefazione calcolato per ciascuna delle prove penetrometriche CPTu. In tabella sono riportati anche i valori di PGA, $M_{w_{max}}$ e soggiacenza di falda utilizzati per il calcolo di I_L per ciascuna delle verticali analizzate.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

8 Elaborati cartografici

Le analisi e gli approfondimenti eseguiti nell'ambito di questo studio hanno fornito gli elementi necessari alla redazione di nuovi elaborati cartografici di microzonazione sismica per il Comune di Ferrara. Le nuove conoscenze geologiche acquisite, l'applicazione dei più recenti standard di rappresentazione ed archiviazione informatica e l'adeguamento alla vigente normativa regionale in materia di microzonazione sismica (D.G.R. n. 630/2019), hanno imposto una profonda revisione ed aggiornamento dei precedenti studi di microzonazione sismica.

La notevole estensione territoriale del Comune di Ferrara ha reso necessaria la produzione di nove tavole per ciascuno degli elaborati cartografici previsti dalla normativa regionale (Tabella 8-1). Tale suddivisione geografica è stata concordata con il Servizio di Piano e Rigenerazione Urbana comunale e sarà adottata anche per la realizzazione delle cartografie del nuovo Piano Urbanistico Generale (P.U.G.).

La Carta delle indagini, la Carta Geologico Tecnica, la Carta delle frequenze naturali dei terreni e la Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs) sono però state estese a tutto il territorio comunale, per consentire una completa ricostruzione di elementi fondamentali per lo sviluppo studio, come la distribuzione delle indagini geognostiche o delle caratteristiche geologico-tecniche dei corpi sedimentari affioranti o, ancora, delle velocità delle onde di taglio che li contraddistinguono.

Negli altri elaborati sono invece stati caratterizzati esclusivamente gli ambiti interessati dagli approfondimenti di microzonazione sismica di secondo livello.

Per ognuna delle cartografie previste è stata elaborata una mappa di sintesi – alla scala 1:36.000 – che offre il quadro di unione a livello comunale. In conformità alla direttiva regionale sono state inoltre prodotte tavole di dettaglio – alla scala 1:10.000 – per ciascuno degli elaborati cartografici, utilizzando come base topografica la Carta Tecnica Regionale in scala 1:5.000 fornita dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna.

ELABORATO	RIFERIMENTO	SCALA
Carta delle indagini	Tavola A	1:36.000
	Tavole A ₁₋₉	1:10.000
Carta Geologico Tecnica	Tavola B	1:36.000
	Tavole B ₁₋₉	1:10.000
Carta delle frequenze naturali dei terreni	Tavola C1 e C2	1:36.000
	Tavole C1 ₁₋₉ e C2 ₁₋₉	1:10.000
Carta delle aree suscettibili di effetti locali	Tavola D	1:36.000

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

	Tavole D _{1÷9}	1:10.000
Carta della velocità delle onde di taglio S (Vs)	Tavola E	1:36.000
	Tavole E _{1÷9}	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di secondo livello - PGA	Tavola F	1:36.000
	Tavole F _{1÷9}	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di secondo livello - SA1	Tavola G	1:36.000
	Tavole G _{1÷9}	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di secondo livello - SA2	Tavola H	1:36.000
	Tavole H _{1÷9}	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di secondo livello - SA3	Tavola I	1:36.000
	Tavole I _{1÷9}	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di secondo livello - SA4	Tavola J	1:36.000
	Tavole J _{1÷9}	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di secondo livello - SI1	Tavola K	1:36.000
	Tavole K _{1÷9}	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di secondo livello - SI2	Tavola L	1:36.000
	Tavole L _{1÷9}	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di secondo livello - SI3	Tavola M	1:36.000
	Tavole M _{1÷9}	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di secondo livello - HSM	Tavola N	1:36.000
	Tavole N _{1÷9}	1:10.000

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

8.1 Carta delle indagini (Tavole A_{1÷9})

La carta delle indagini consente di visualizzare l'ubicazione delle prospezioni geologiche e geofisiche utilizzate per lo studio di microzonazione sismica e comprende, pertanto, sia quelle di repertorio (4.242) che quelle realizzate a supporto del presente studio (47).

Nella cartografia di sintesi e nelle tavole di dettaglio le indagini sono raffigurate, in base alla tipologia, utilizzando la simbologia proposta per la microzonazione sismica a livello nazionale (cfr. standard di rappresentazione e archiviazione informatica - versione 4.1). In accordo con la direttiva regionale per la microzonazione sismica (D.G.R. n. 630/2019) sono state graficamente distinte le indagini geognostiche di nuova esecuzione da quelle pregresse provenienti dagli archivi comunali e regionali.

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

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

8.2 Carta Geologico Tecnica (Tavole B₁₋₉)

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

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

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

8.2.1 Elementi geologici ed idrogeologici

Tra gli elementi funzionali alla definizione del modello di sottosuolo, sono stati riportati in carta tutti i pozzi e sondaggi disponibili, con i rispettivi valori di profondità rispetto alla superficie topografica. Come previsto dagli standard di rappresentazione e archiviazione informatica i pozzi ed i sondaggi sono stati tematizzati in colore verde nel caso in cui la loro profondità raggiunga il substrato geologico, mentre in colore rosso nel caso contrario.

I sondaggi che raggiungono il substrato geologico (16) sono rappresentati in prevalenza da pozzi per la ricerca di idrocarburi o pozzi per prelievo di acque profonde.

L'area in cui il substrato geologico è posto minore profondità rispetto alla superficie è l'area di Casaglia, dove il sondaggio "P501" raggiunge il substrato a circa 130 m di profondità. Gli altri pozzi intercettano il substrato a profondità via via superiori sino a diverse centinaia di metri rispetto alla superficie topografica. In relazione agli altri tematismi previsti per la carta geologico tecnica si precisa che, vista la scarsità di dati geognostici sul sottosuolo profondo, non è stato possibile ricostruire in pianta le isobate relative all'andamento della superficie considerata come substrato sismico in questo studio. Allo stesso modo gli esigui dati freaticometrici disponibili non sono stati riportati in carta in quanto disomogenei e di dubbia qualità, e quindi ritenuti non utili, se non addirittura forvianti, ai fini della ricostruzione dell'andamento della superficie piezometrica.

Allo studio sono, infine, allegare diverse sezioni geologiche considerate rappresentative del modello di sottosuolo sia superficiale che profondo (v. Allegato 1).

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

Le sezioni profonde indicate con A-A', C-C' e F-F' derivano dallo studio sulle "Risorse idriche sotterranee della Provincia di Ferrara" (Molinari *et al.*, 2007), mentre quella indicata con B-B' proviene dallo studio sulle "Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna" (1998). Altre sezioni mostrano l'assetto stratigrafico profondo delle principali unità litologiche riconosciute nel sottosuolo comunale. Alcune di queste, indicate con D-D', E-E' e G-G', sono state realizzate nell'ambito del progetto di "Cartografia Geologica Nazionale (CARG)" mentre la sezione indicata con J-J' proviene dalla "Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna" (Martelli *et al.*, 2017). I rapporti geometrici e l'andamento dei corpi sedimentari sono stati ricostruiti alla scala regionale mediante correlazioni di sondaggi stratigrafici profondi, mentre le unità sono state interpretate sia in chiave idrogeologica, in termini di acquiferi e acquicludo, sia in chiave più strettamente stratigrafica, mediante l'utilizzo di unità a limiti inconformi (si veda Allegato 1).

Le altre sezioni, più superficiali (tracce H-H' e I-I'), mostrano i rapporti geometrici dei corpi sedimentari costituenti la porzione sommitale dei terreni di copertura, appartenenti all'intervallo stratigrafico considerato per la definizione delle microzone omogenee in prospettiva sismica descritte nella carta delle aree suscettibili di effetti locali. Queste sezioni, realizzate per la Carta Geologica del Comune di Ferrara (Geotema, 2015), sono state ottenute mediante correlazione di decine di indagini penetrometriche e sondaggi a carotaggio continuo, contenuti nelle banche dati geognostiche regionale e comunale (si veda Allegato 1).

8.2.2 Terreni di copertura

Nella porzione affiorante della successione sedimentaria quaternaria sono state distinte varie unità, ciascuna associata ad una classe stabilita mediante l'*Unified Soil Classification System (U.S.C.S. modificato, ASTM, 1985)*. Questo sistema di classificazione geotecnica dei terreni è applicabile alla maggioranza dei sedimenti non consolidati ed è frequentemente utilizzato sia in ambito geologico che ingegneristico. Le unità sono rappresentate in carta tramite colori e codici alfabetici, corrispondenti alle classi di rappresentazione e archiviazione geo-informatica *del U.S.C.S.* Il codice (e.g. SMes) è formato da una prima parte maiuscola, che descrive i caratteri granulometrici e litotecnici, seguita da una porzione minuscola, indicante l'interpretazione paleoambientale. In base a questa classificazione, sono state definite quattro unità, che presentano diverso comportamento meccanico e differente suscettibilità a liquefazione cosismica:

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL
COMUNE DI FERRARA

- **SMes - sedimenti sabbiosi di alveo**

L'unità è formata da sabbie medie e fini con granulometria poco assortita, comprendenti una frazione fine limosa. Questi sedimenti registrano il riempimento di canali fluviali di Po e, nella parte meridionale del territorio, di Reno. I corpi sedimentari principali di Po presentano una larghezza fra i 300 e 600 m, spessori che possono superare i 10 m e tendono ad avere granulometrie relativamente più grossolane e minore contenuto in fine rispetto ai sedimenti di Reno. Questi ultimi formano corpi di minori dimensioni, con larghezza di 200-300 m e spessori massimi tra 8 e 10 m. Nei depositi di canale di entrambi i fiumi si osservano talvolta corpi più fini, limoso-argillosi, che registrano fasi di abbandono del flusso fluviale. Questi limitati corpi fini non sono stati distinti in carta per ragioni di scala e rappresentazione cartografica. I corpi sabbiosi più antichi di alveo tendono ad avere una scarsa espressione morfologica ed ad affiorare in modo discontinuo, a causa della copertura da parte di sedimenti più recenti. Alcuni esempi sono stati individuati nell'area di Palmirano e Gaibanella e tra Cassana e la zona della Piccola e Media Industria, dove un antico alveo di Po mostra chiare forme di accrescimento di meandro.

I corpi sabbiosi più recenti, legati agli alvei medievali del Po di Ferrara che nei pressi di San Giorgio si biforcava nei rami di Volano e Primaro, formano ancor oggi dossi elevati su cui si sviluppa una parte significativa del centro urbano della città. Analoghi caratteri morfologici mostra il corpo di Reno di età moderna che si sviluppa al margine sud-orientale del territorio comunale, tra Borgo Scoline e Chiesuol del Fosso che poi prosegue verso sud con granulometrie progressivamente più fini.

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

- **MLes - sedimenti di argine naturale e canale fluviale minore**

Sono formati da alternanze di sabbie fini limose, limi inorganici, loam, limi argillosi a bassa plasticità. In questi depositi si possono talvolta osservare intraclasti di sedimenti fangosi, resti organici vegetali, o strutture sedimentarie da corrente trattiva, come gradazione diretta o lamine parallele. L'unità descritta inquadra due diverse tipologie di corpi sedimentari; quelli di argine naturale e quelli di palealveo minore. I primi fiancheggiano i corpi di paleoalveo maggiore descritti nel punto precedente e di essi viene rappresentata in carta solo la porzione prossimale, più granulare e sabbiosa. Essa sfuma

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL
COMUNE DI FERRARA

rapidamente in sedimenti coesivi più fini, anche ove l'espressione geomorfologica del corpo abbia ancora caratteri tipicamente arginali. La parte più granulare dei sedimenti arginali presenta una generalmente larghezza ridotta, di circa 200-300 m, e spessori di alcuni metri che diminuiscono allontanandosi dagli antichi alvei di origine. I corpi di riempimento di paleoalveo minore, invece, si diramano dai corpi di alveo principale spingendosi fra i sedimenti fini di piana interalvea, costituendo spesso strutture simili a delta interni. I canali minori hanno larghezze ridotte, tra 40 e 60 m e spessori di pochi metri. Alcuni canali minori sono stati individuati anche in area urbana, come quello che da via Traversagno interessa il polo petrolchimico o quello che passando da Palazzo dei Diamanti prosegue in direzione del Barco. Altri corpi si sviluppano lungo via Caretti e lungo via del Turco, proseguendo poi per Borgo dei Leoni, via delle Erbe e delle Vigne.

Sia i sedimenti di argine che di canale minore sono caratterizzati da una permeabilità media, che aumenta in genere avvicinandosi ai corpi di paleoalveo principale. Essi sono anche potenzialmente suscettibili a fenomeni di liquefazione cosismica.

- **Olpi - sedimenti fini di piana interalvea**

Consistono di argille, argille limose, argille limose organiche, diffusamente bioturbate, a plasticità generalmente medio-bassa, depositi in ambienti di piana inondabile e depressione interalvea. Queste aree erano soggette a consistenti apporti sedimentari fini, durante episodi di piena e tracimazione fluviale. Quando i sedimenti di questa unità fiancheggiano direttamente corpi di paleoalveo, possono inglobare subordinate intercalazioni di limi e limi sabbiosi, frequentemente amalgamati dalla bioturbazione. Questi sedimenti formano la maggior parte dell'area comunale. A sud e sud-ovest degli antichi alvei del Po di Ferrara e di Volano questi sedimenti sono interamente di provenienza appenninica e mostrano spesso una più elevata frazione limosa. A nord ed est degli stessi paleoalvei i sedimenti hanno età antica e presentano una ridotta componente limosa, tipica dei depositi di provenienza padana.

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

- **OHpi - argille organiche e torbe di palude dulcicola**

L'unità è formata da argille, spesso molto plastiche, argille limose e argille organiche assai ricche di livelli torbosi. La frazione organica di origine vegetale è spesso abbondante. Si osservano talvolta resti di legno e foglie in buono stato di conservazione. Questi sedimenti conservano spesso le originarie colorazioni scure unitamente ad elevati contenuti in umidità. Tali caratteri li rendono ben identificabili

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

anche attraverso analisi di immagini a falsi colori nell'infrarosso vicino. Questi sedimenti fangosi si rinvennero principalmente nelle porzioni topograficamente più depresse delle piane interalvee dei fiumi Po e Reno. La loro estensione areale è nettamente subordinata a quella dei sedimenti fini di piana interalvea, precedentemente descritti. Questi sedimenti coesivi presentano in genere una permeabilità molto bassa e rappresentano, quindi, un efficace livello di acquicludo superficiale.

Alle unità appena descritte si aggiungono aree rappresentate in mappa da retinati trasparenti ed identificate dalla sigla **RI**. Esse rappresentano zone in cui i terreni superficiali sono stati asportati per vari motivi ed al loro posto sono stati riportati materiali legati ad attività antropiche. In carta sono indicati i principali corpi di riporto dell'area urbana di Ferrara, in quanto le informazioni a disposizione non permettono un censimento esaustivo ed una ricostruzione dettagliata di tutti i riempimenti presenti nel vasto territorio comunale. I più antichi corpi di riporto sono legati al riempimento dei fossati delle mura trecentesche e del Canale Panfilio, oltre alla presenza delle fortificazioni rinascimentali ed allo smantellamento della fortezza seicentesca. Altri corpi minori sono identificati nell'area di San Giorgio e del Museo Archeologico. Molto estesi e di elevato spessore sono invece i riporti connessi al riempimento di cave novecentesche, come quelle dell'area di via Caretti, o di discariche. Le geometrie di queste ultime sono da considerarsi approssimate ed indicative a causa della mancanza di rilievi accurati.

8.3 Carta delle frequenze naturali dei terreni (Tavole C1₁₊₉ e C2₁₊₉)

In queste tavole sono riportati i punti di misura di microtremore a stazione singola utilizzati per lo studio di microzonazione con i rispettivi valori di frequenza di risonanza fondamentale.

I punti di misura riportati in carta sono tematizzati con colori diversi in relazione al valore di ampiezza massima del picco di H/V. Ampiezze superiori a 5 sono restituite in colore viola, mentre in rosso, arancio e giallo sono rappresentati valori di ampiezza compresi tra 5 e 2; ampiezze inferiori a 2 sono invece indicate in verde.

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

Sulla base dei dati ottenuti dalle misure microtremore sismico non è stato possibile suddividere il territorio indagato secondo le diverse classi di frequenza proposte dalla D.G.R. n. 630/2019. L'osservazione delle frequenze di risonanza ha però dettato la scelta di produrre due distinte carte delle frequenze naturali dei

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

terreni. In accordo con i precedenti studi di microzonazione sismica le carte sono state redatte sia per l'intervallo di frequenze compreso tra 0,1 e 0,5 Hz sia per frequenze maggiori di 0,5 Hz.

Le misure di microtremore analizzate mostrano, infatti, un picco di frequenza prevalente compreso tra 0,6 e 0,9 Hz (Tavole C2_{1÷9}). Un secondo picco a frequenze più basse (< 0,5 Hz) è inoltre visibile in gran parte delle misure eseguite sul territorio comunale, ad eccezione di quelle realizzate nella porzione nord-occidentale, dove il picco a bassa frequenza risulta pressoché assente (Tavole C1_{1÷9}).

Dall'analisi delle ampiezze dei picchi rilevati per frequenze maggiori di 0,5 Hz è possibile inoltre notare come, nella zona nord-occidentale, i valori di ampiezza della frequenza di picco siano sempre molto elevati e sensibilmente maggiori di 5 (Tavole C2 e C2₁).

Nelle restanti aree del territorio comunale le ampiezze relative alle frequenze di picco nello stesso intervallo sono invece inferiori e sempre compresi tra 2 e 4.

8.4 Carta delle aree suscettibili di effetti locali (Tavole D_{1÷9})

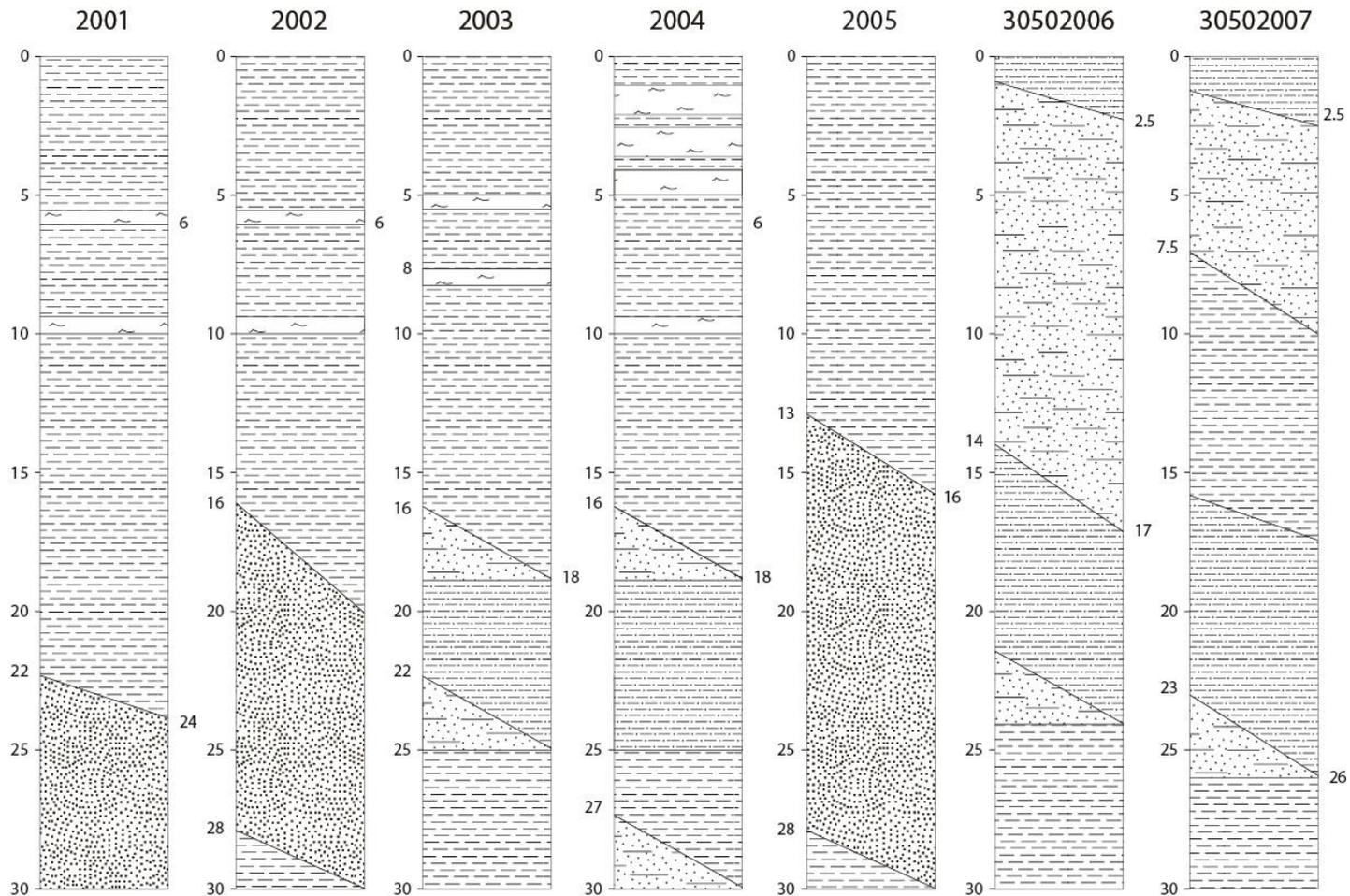
La carta delle aree suscettibili di effetti locali o carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS), è l'elaborato di sintesi fondamentale del primo livello di approfondimento degli studi microzonazione.

L'elaborato mostra la suddivisione del territorio comunale in zone suscettibili di amplificazioni locali e zone suscettibili di instabilità, in quanto non sono presenti zone classificabili come stabili. Nella tavola sono riportate anche le ubicazioni dei punti di misura del rumore ambientale (si vedano le Tavole C1_{1÷9} e C2_{1÷9}, paragrafo 8.3). Le diverse microzone sono state definite sulla base delle caratteristiche litostratigrafiche dei primi trenta metri di sottosuolo (Figura 8-1), ed ad esse sono stati associati codici identificativi progressivi e colorazioni distinte, come previsto dagli standard di rappresentazione già citati.

Le sedici zone cartografate come instabili presentano tutte problematiche legate a potenziali fenomeni di liquefazione e sono quindi state rappresentate in carta mediante apposito retino e relativo prefisso identificativo 3050. Sono state inoltre identificate cinque microzone suscettibili di sola amplificazione locale a cui sono stati attribuiti i codici da 2001 a 2005.

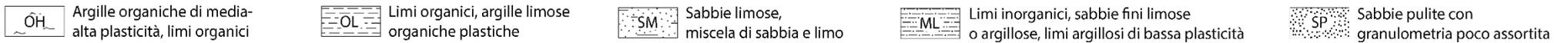
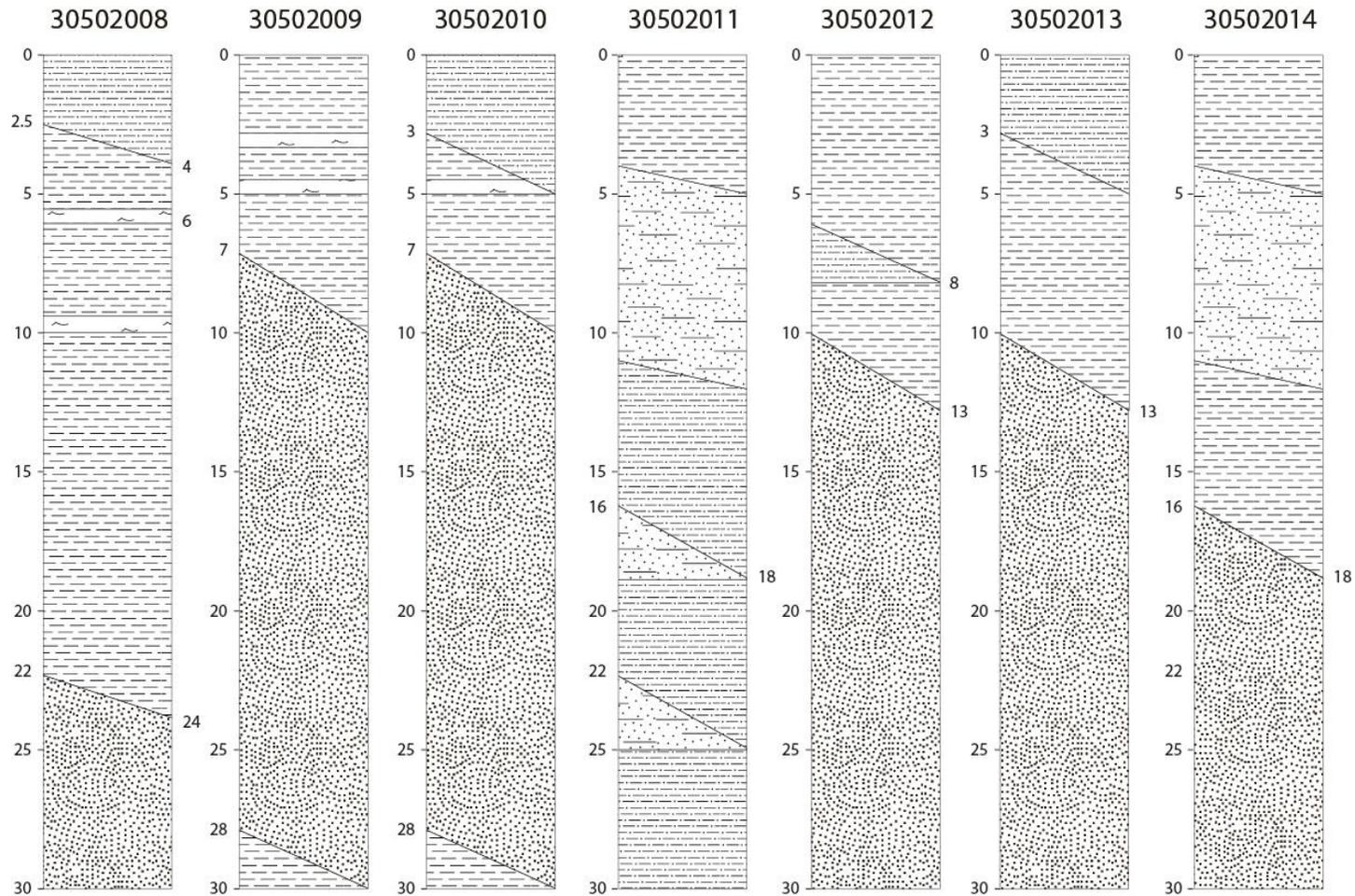
Di seguito sono riportati gli schemi dei rapporti litostratigrafici delle diverse microzonazione (Figura 8-1) e le relative descrizioni sulla base delle quali sono state definite le classi zonali. Le descrizioni sono riportate in maniera sintetica anche nella legenda di cartografia.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA



- | | | | | | | | | | |
|----|---|----|---|----|---|----|---|----|--|
| OH | Argille organiche di media-alta plasticità, limi organici | OL | Limi organici, argille limose organiche plastiche | SM | Sabbie limose, miscela di sabbia e limo | ML | Limi inorganici, sabbie fini limose o argillose, limi argillosi di bassa plasticità | SP | Sabbie pulite con granulometria poco assortita |
|----|---|----|---|----|---|----|---|----|--|

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA



APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

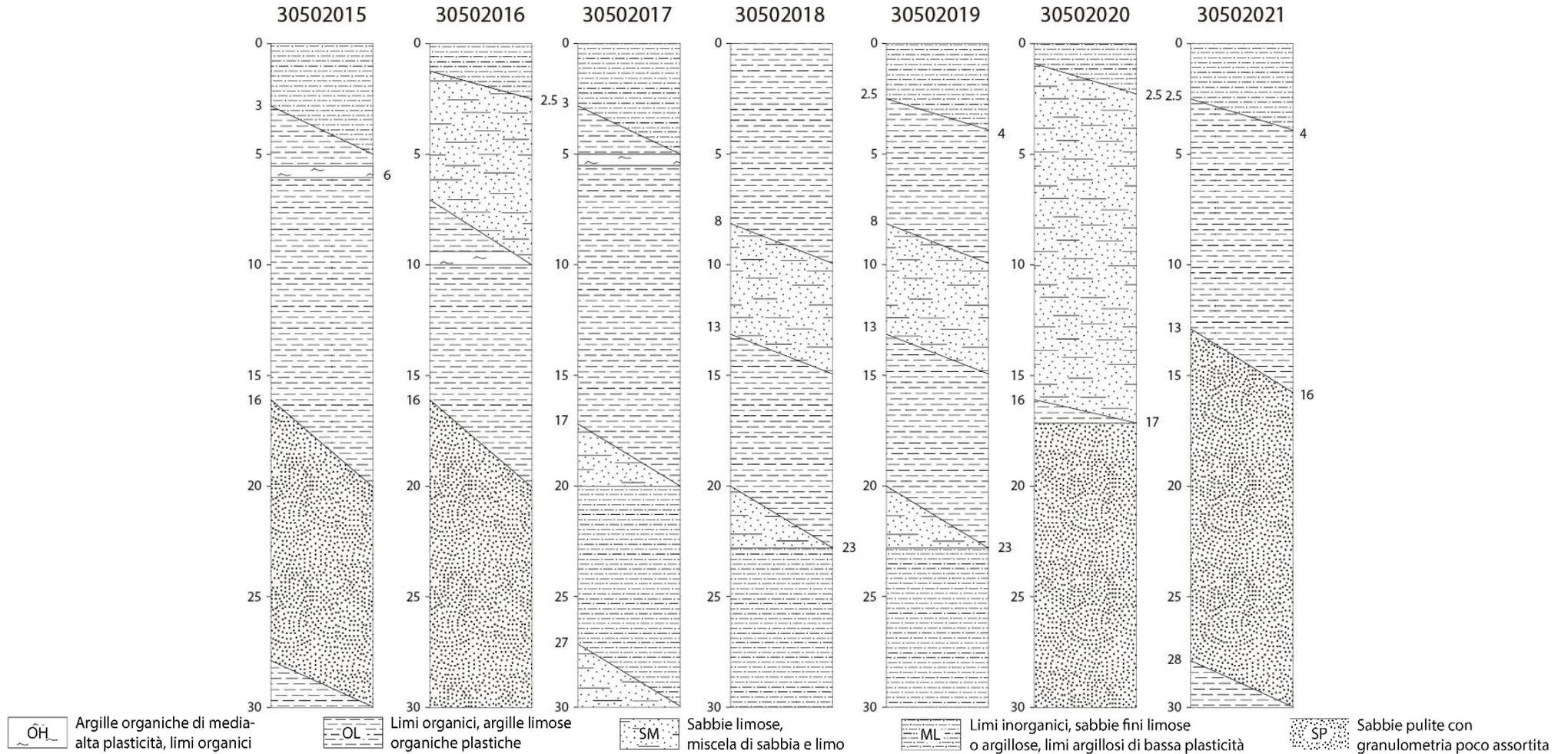


Figura 8-1 - Colonne stratigrafiche sintetiche rappresentative delle successioni di sedimenti che costituiscono i primi 30 m nelle diverse zone MOPS individuate nel territorio comunale.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL
COMUNE DI FERRARA

Zona 2001

Argille organiche plastiche con livelli di torbe e argille limose di bassa plasticità dello spessore di oltre 20 m poggiano su sabbie addensate medio-grossolane prevalentemente pulite.

Zona 2002

Argille organiche plastiche con livelli di torbe e argille limose di bassa plasticità con spessori di 16-20 m poggiano su sabbie addensate medio-grossolane prevalentemente pulite. Alla base dell'intervallo sabbioso possono essere presenti livelli di argille limose consolidate.

Zona 2003

Argille organiche plastiche con intercalazioni limose e livelli di torbe poggiano su limi inorganici, talvolta sabbiosi, con paleosuoli a concrezioni carbonatiche e limi argillosi a bassa plasticità con intercalazioni di sabbie in corpi lenticolari di spessore massimo di 3-4 m. Le intercalazioni sabbiose sono presenti al disotto dei 15 m di profondità.

Zona 2004

Argille organiche di alta plasticità con importanti livelli di torbe prossimi alla superficie poggiano su limi inorganici, talvolta sabbiosi, con paleosuoli a concrezioni carbonatiche e limi argillosi a bassa plasticità con intercalazioni di sabbie in corpi lenticolari di spessore massimo di 3-4 m. Le intercalazioni sabbiose sono presenti al disotto dei 15 m di profondità.

Zona 2005

Argille organiche plastiche talvolta torbose e argille limose di bassa plasticità con spessori di 13-16 m poggiano su sabbie addensate medio-grossolane prevalentemente pulite. Alla base dell'intervallo sabbioso possono essere presenti livelli di argille limose consolidate.

Zona 30502006

Sabbie e sabbie fini limose poco addensate e liquefacibili dello spessore massimo di 17 m poggiano su limi argillosi e argille limose di bassa plasticità con intercalazioni di sabbie limose in corpi lenticolari. Le intercalazioni sabbiose sono presenti al disotto dei 15 m di profondità.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL
COMUNE DI FERRARA

Zona 30502007

Sabbie e sabbie fini limose poco addensate e liquefacibili dello spessore massimo di 10 m, poggiano su argille organiche plastiche con intercalazioni limose e subordinatamente torbose. Seguono limi inorganici, talvolta sabbiosi, con paleosuoli a concrezioni carbonatiche e limi argillosi a bassa plasticità, con intercalazioni di sabbie in corpi lenticolari di spessore massimo di 3-4 m. Le intercalazioni sabbiose sono presenti al disotto dei 15 m di profondità.

Zona 30502008

Limi inorganici e sabbie fini limose liquefacibili dello spessore massimo di 4 m poggiano su argille organiche plastiche con livelli di torbe e argille limose di bassa plasticità. Oltre i 20 m seguono sabbie addensate medio-grossolane prevalentemente pulite.

Zona 30502009

Argille organiche plastiche con livelli di torbe con spessori di 7-10 m poggiano sabbie medio-grossolane spesso pulite e superiormente liquefacibili. Alla base dell'intervallo sabbioso possono essere presenti livelli di argille limose consolidate.

Zona 30502010

Limi inorganici e sabbie fini limose liquefacibili dello spessore massimo di 5 m poggiano argille organiche plastiche con livelli di torbe. Seguono sabbie medio-grossolane spesso pulite superiormente liquefacibili. Alla base dell'intervallo sabbioso possono essere presenti livelli di argille limose consolidate.

Zona 30502011

Argille organiche plastiche dello spessore massimo di 5 m poggiano su limi sabbiosi e sabbie limose poco addensate e liquefacibili. Oltre i 12 m seguono limi inorganici, talvolta sabbiosi, con paleosuoli a concrezioni carbonatiche e limi argillosi a bassa plasticità con intercalazioni di sabbie in corpi lenticolari di spessore massimo di 3-4 m.

Zona 30502012

Argille organiche plastiche dello spessore di 10-13 m con locali intercalazioni limoso sabbiose, poggiano su sabbie medio-grossolane spesso pulite superiormente liquefacibili.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL
COMUNE DI FERRARA

Zona 30502013

Limi inorganici e sabbie fini limose liquefacibili dello spessore massimo di 5 m poggiano argille organiche plastiche. Oltre i 10 m seguono sabbie medio-grossolane spesso pulite superiormente liquefacibili.

Zona 30502014

Argille organiche plastiche dello spessore massimo di 5 m poggiano su limi sabbiosi e sabbie limose poco addensate e liquefacibili. Seguono argille limose di medio bassa plasticità sino alla profondità di 16-18 m. Alla base sono presenti su sabbie addensate medio-grossolane prevalentemente pulite.

Zona 30502015

Limi inorganici e sabbie fini limose liquefacibili dello spessore massimo di 5 m poggiano su argille organiche plastiche con livelli di torbe ed argille limose di bassa plasticità. Oltre i 16 m seguono sabbie addensate medio-grossolane prevalentemente pulite.

Zona 30502016

Sabbie e sabbie fini limose poco addensate e liquefacibili dello spessore massimo di 10 m poggiano su argille e argille limose organiche con orizzonti di torbe. Seguono sabbie addensate medio-grossolane prevalentemente pulite.

Zona 30502017

Limi inorganici e sabbie fini limose liquefacibili dello spessore massimo di 5 m, poggiano su argille ed argille limose organiche con orizzonti di torbe. Seguono limi inorganici, talvolta sabbiosi, con paleosuoli a concrezioni carbonatiche e limi argillosi a bassa plasticità, con intercalazioni di sabbie in corpi lenticolari di spessore massimo di 3-4 m. Le intercalazioni sabbiose sono presenti al disotto dei 15 m di profondità.

Zona 30502018

Argille organiche plastiche anche torbose dello spessore massimo di 8-10 m poggiano su limi sabbiosi e sabbie limose poco addensate e liquefacibili. Seguono limi argillosi ed argille limose di bassa plasticità con intercalazioni di sabbie limose in corpi lenticolari.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

Zona 30502019

Limi inorganici e sabbie fini limose liquefacibili dello spessore massimo di 4 m poggiano su argille organiche plastiche anche torbose. Seguono limi sabbiosi e sabbie limose poco addensate e liquefacibili che si sovrappongono a limi argillosi ed argille limose di bassa plasticità con intercalazioni di sabbie limose in corpi lenticolari.

Zona 30502020

Sabbie e sabbie fini limose poco addensate e liquefacibili dello spessore massimo di 17 m poggiano su sabbie addensate medio-grossolane prevalentemente pulite. I due intervalli sabbiosi possono essere localmente separati da un'intercalazione di argille limose.

Zona 30502021

Limi inorganici e sabbie fini limose liquefacibili dello spessore massimo di 4 m poggiano su argille organiche plastiche talvolta torbose ed argille limose di bassa plasticità. Oltre 13 m seguono sabbie addensate medio-grossolane prevalentemente pulite. Alla base dell'intervallo sabbioso possono essere presenti livelli di argille limose consolidate.

8.5 Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs) (Tavole E₁₋₉)

La carta della velocità delle onde volumetriche di taglio mostra i 228 punti di misura di Vs utilizzati per lo studio di microzonazione sismica ed i rispettivi valori di Vs₃₀.

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

MISURE DIRETTE		MISURE INDIRETTE	
SCPTu	208	MASW	9
SDMT	2	ESAC-SPAC	9

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

Osservando le Vs₃₀ si nota come le indagini indirette forniscano in genere valori lievemente sovrastimati rispetto a quelli derivati da misure dirette tipo cono sismico (SCPTu) o dilatometro sismico (SDMT).

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

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

8.6 Carte di microzonazione sismica di secondo livello (Tavole $F_{1\div 9}$, $G_{1\div 9}$, $H_{1\div 9}$, $I_{1\div 9}$, $J_{1\div 9}$, $K_{1\div 9}$, $L_{1\div 9}$, $M_{1\div 9}$, $N_{1\div 9}$)

Le carte di microzonazione sismica di secondo livello, o carte dei fattori di amplificazione delle aree, rappresentano gli elaborati finali di sintesi dello studio. Le cartografie sono state realizzate in accordo con quanto previsto dalla D.G.R. 630/2019, adottando le simbologie previste dagli standard di rappresentazione ed archiviazione informatica (versione 4.1) utilizzati a livello nazionale per la microzonazione sismica. Gli elaborati riportano la classificazione delle aree in base all'amplificazione attesa per prefissati periodi di vibrazione, quantificata tramite fattori parametrici espressi sia in termini di accelerazione (SA o FA) sia di pseudovelocità o intensità di Housner¹ (SI o FH).

Tra le cartografie di sintesi elencate in seguito è presente anche quella relativa al nuovo parametro HSM che esprime lo scuotimento atteso al suolo in valore assoluto:

- PGA (Tavole $F_{1\div 9}$) - fattori di amplificazione espressi come rapporto tra le massime ampiezze dell'accelerazione orizzontale in superficie e al bedrock sismico (PGA/PGA0);
- SA1 (Tavole $G_{1\div 9}$) - fattori di amplificazione espressi in rapporto di spettro di risposta in accelerazione superficie e al bedrock sismico (SA/SA0) per periodi compresi tra 0,1 e 0,5 secondi;
- SA2 (Tavole $H_{1\div 9}$) - fattori di amplificazione espressi in rapporto di spettro di risposta in accelerazione superficie e al bedrock sismico (SA/SA0) per periodi compresi tra 0,4 e 0,8 secondi;
- SA3 (Tavole $I_{1\div 9}$) - fattori di amplificazione espressi in rapporto di spettro di risposta in accelerazione superficie e al bedrock sismico (SA/SA0) per periodi compresi tra 0,7 e 1,1 secondi;
- SA4 (Tavole $J_{1\div 9}$) - fattori di amplificazione espressi in rapporto di spettro di risposta in accelerazione superficie e al bedrock sismico (SA/SA0) per periodi compresi tra 0,5 e 1,5 secondi;
- SI1 (Tavole $K_{1\div 9}$) - fattori di amplificazione espressi in rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico (SI/SI0) per periodi compresi tra 0,1 e 0,5 secondi;

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

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

- SI2 (Tavole L₁₋₉) - fattori di amplificazione espressi in rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico (SI/SI₀) per periodi compresi tra 0,5 e 1 secondi;
 - SI3 (Tavole M₁₋₉) - fattori di amplificazione espressi in rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico (SI/SI₀) per periodi compresi tra 0,5 e 1,5 secondi;
- HSM (Tavole N₁₋₉) - scuotimento atteso al sito in valore assoluto (accelerazione in cm/s²), dato dal prodotto del parametro *Acceleration Spectrum Intensity* (ASI_{UHS}), calcolato per l'intervallo di periodi 0,1s ≤ T ≤ 0,5s, diviso per ΔT (in questo caso pari a 0,4s) e moltiplicato per il fattore di amplificazione in accelerazione (FA) calcolato per lo stesso intervallo di periodi.

I fattori di amplificazione utilizzati per la redazione delle carte (Tabella 8-3, Tabella 8-4) derivano dagli abachi regionali di Pianura 2 e Pianura 3 (D.G.R. n. 630/2019). Il primo è stato utilizzato per la caratterizzazione della area nord-occidentale del territorio di Ferrara, mentre il secondo è stato applicato alla restante parte. Come valore di riferimento per l'identificazione dei fattori di amplificazione è stata assunta una Vs₃₀ pari a 200 m/s. La scelta è stata effettuata considerando il valore medio di Vs₃₀ calcolato su scala comunale.

FA _{PGA}	SA1	SA2	SA3	SA4	SI1	SI2	SI3
1,7	1,8	2,7	3,2	3,1	2,0	3,0	3,3

Tabella 8-3 - Fattori di amplificazione di Pianura 2 utilizzati per la caratterizzazione della porzione nord occidentale del Comune di Ferrara, dove il substrato rigido è presente entro i 150 m di profondità).

FA _{PGA}	SA1	SA2	SA3	SA4	SI1	SI2	SI3
1,3	1,3	2,1	2,5	2,4	1,5	2,3	2,6

Tabella 8-4 - Fattori di amplificazione di Pianura 3 utilizzati per la caratterizzazione del resto del territorio comunale dove il substrato rigido è situato a profondità maggiori di 300 m rispetto alla superficie topografica.

Nelle cartografie elencate sono riportate sia le zone suscettibili di amplificazioni locali sia quelle suscettibili di instabilità. Queste ultime vengono distinte per mezzo di un soprassegno cartografico che indica la tipologia di instabilità cosmica attesa, ossia manifestazioni di fenomeni di liquefazione sismoindotta (cfr. zone di attenzione per le liquefazioni - ZA_{LQ}).

Rispetto a quanto previsto dalla D.G.R. n. 630/2019 nelle carte sono rappresentati anche i valori puntuali delle stime del potenziale di liquefazione eseguite sulle singole verticali d'indagine. Considerata l'elevata disponibilità di prove penetrometriche elettriche ed il maggior grado di affidabilità degli indici da esse ottenute si è ritenuto di non riportare in carta indici derivati da verifiche effettuate su prove

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

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

9 Commenti finali e criticità

Gli approfondimenti geologico-sismici eseguiti nell'ambito dello studio hanno permesso di determinare l'amplificazione sismica attesa e quantificare il grado di rischio nelle aree caratterizzate dalla presenza di condizioni predisponenti la liquefazione.

L'amplificazione attesa è stata determinata mediante approccio semplificato utilizzando gli abachi proposti dalla normativa regionale per la microzonazione sismica (Allegato A2 - D.G.R. n. 630/2019). Questo ha consentito di attribuire ad ogni porzione di territorio comunale fattori di amplificazione per prefissati periodi di vibrazione, sia in termini di accelerazione sia di pseudovelocità (paragrafo 7.2). La coerenza dei fattori di amplificazione adottati è stata verificata eseguendo analisi di risposta sismica locale. Le modellazioni numeriche sono state effettuate in siti tra loro differenti sia per profondità del substrato sismico sia per caratteristiche granulometriche e meccaniche dei terreni di copertura (paragrafo 7.2.1). Per la determinazione del rischio di liquefazione sono state, infine, eseguite numerose verifiche di suscettibilità mediante metodi semplificati. Sulla base dei risultati ottenuti il metodo di Boulanger e Idriss (2014) è stato considerato affidabile e maggiormente cautelativo, rispetto ad altri di letteratura, e dunque utilizzato per il calcolo degli indici di liquefazione I_L (paragrafo 7.3.1).

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

9.1 Microzonazione sismica e criticità

Sulla base delle nuove conoscenze acquisite, il territorio di Ferrara è stato suddiviso in due distinte aree, soggette ad una diversa amplificazione del moto sismico. Tali aree riflettono la distribuzione delle strutture tettoniche e l'assetto stratigrafico del sottosuolo:

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL
COMUNE DI FERRARA

- a) la porzione nord-occidentale del territorio corrisponde ad un pronunciato alto strutturale, costituito da un'anticlinale complessa, segmentata da faglie inverse nord-vergenti e retroscorrimenti. In quest'area le unità marine mioceniche formano il substrato sismico, il cui tetto si trova a profondità anche inferiori a 150 m. Su di esse poggia, in discordata angolare, la successione sedimentaria quaternaria, in gran parte continentale, dominata da sabbie fluviali medio-grossolane, intercalate ad intervalli minori di fanghi di pianura alluvionale. Questa porzione di territorio che sviluppa tra il polo chimico e Porporana è caratterizzata dai più alti fattori di amplificazione del moto sismico (paragrafo 7.2).
- b) nella restante parte del territorio comunale, il substrato sismico si trova a profondità molto maggiori rispetto all'area anticlinale di Casaglia. Il tetto del substrato corrisponde verosimilmente alla superficie di discordanza che limita superiormente i corpi di torbiditi arenacee plioceniche, che sono completamente assenti nel settore nord-occidentale. Anche le successioni quaternarie risultano assai più spesse ed articolate attraverso questa vasta area comunale. Le unità di mare profondo del Pleistocene basale evolvono infatti, in modo graduale, verso successioni costiere e deltizie e, successivamente, in corpi sedimentari fluviali. Nelle porzioni centro-settentrionale ed orientali, corrispondenti ad un fascio di anticlinali sepolte strutturalmente ben più depresse della culminazione di Casaglia, la successione del Quaternario superiore è ricca di sabbie fluviali provenienti dal Po, forse anche dall'Adige. Nell'ampia sinclinale che si sviluppa nella parte meridionale del territorio invece le sequenze terrigene raggiungono i massimi spessori e la successione del Quaternario superiore è formata da depositi continentali ricchi di apporti di Po e superiormente di Reno e di altri fiumi appenninici. A questa vasta area del territorio comunale sono stati attribuiti fattori di amplificazione del moto sismico inferiori rispetto a quelli della porzione nord-occidentale (paragrafo 7.2).

Nei precedenti studi di microzonazione sismica (Fioravante e Giretti, 2013) il territorio comunale era stato considerato sostanzialmente omogeneo in relazione all'amplificazione del moto sismico e quindi caratterizzato da un'unica gamma di fattori parametrici (F.A.) validi per tutto il Comune di Ferrara. Questa scelta, non rappresentativa dei caratteri tettono-stratigrafici del territorio, è parzialmente legata alle limitazioni derivanti dalla vecchia legge regionale sulla microzonazione sismica (D.A.L. n. 112/2007). Essa infatti forniva un unico abaco di riferimento per la stima dei fattori di amplificazione per tutte le aree costituite da alternanze di sabbie e peliti in cui il substrato sismico fosse individuato a profondità superiori ai 100 m.

I nuovi approfondimenti geologico-sismici hanno determinato una profonda revisione dei coefficienti di amplificazione per il territorio di Ferrara. Al settore nord-occidentale sono state oggi attribuite

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

amplificazioni del moto sismico più elevate rispetto a quelle previste dai precedenti studi di microzonazione. Al contrario i settori centrale, orientale e meridionale del territorio comunale risultano oggi caratterizzati da fattori di amplificazione inferiori. La rimodulazione dei coefficienti di amplificazione, dettata dalle nuove conoscenze acquisite dopo il sisma del 2012, risulta coerente con quanto proposto dagli abachi della D.G.R. n. 630/2019 e con i risultati delle risposte sismiche locali eseguite.

In termini di pericolosità sismica locale però, le porzioni nord-occidentale e meridionale del territorio comunale mostrano analoghi valori di scuotimento sismico atteso in superficie. Questo risulta evidente dall'analisi della distribuzione del parametro HSM (Tavole N₁₊₉) che mostra anche come lo scuotimento atteso diminuisca procedendo verso le aree nord-orientali. Tale andamento è legato sia alla diminuzione verso nord della pericolosità sismica di base (mappe INGV <http://esse1.mi.ingv.it/>) sia ai diversi fattori di amplificazione che, come detto, caratterizzano il territorio. Nonostante i minori valori di accelerazione di base previsti dai modelli probabilistici, la presenza del substrato sismico a profondità non troppo elevate nei settori nord-occidentali induce una maggiore amplificazione del moto sismico in superficie, rendendo i valori di scuotimento simili a quelli dell'area meridionale.

Per valutare il rischio indotto dalla principale criticità emersa dagli approfondimenti geologico-sismici, sono state eseguite stime del potenziale di liquefazione su tutto il territorio comunale. Indici di liquefazione (I_L) sono stato calcolati per circa 450 indagini penetrometriche a piezocono utilizzando i parametri di input ed i metodi semplificati descritti nei paragrafi 7.2.1 e 7.3.1.

La distribuzione degli indici di liquefazione evidenzia come le fasce a maggior rischio siano collocate in corrispondenza dei principali paleoalvei sub-affioranti. Queste fasce, formate da sabbie e sabbie limose poco addensate di riempimento di canale mostrano spesso potenziali di liquefazione elevati con I_L compresi tra 5 e 15. I gradienti topografici, legati alla presenza dei dossi fluviali ed arginali, possono aggravare i rischi connessi alla liquefazione, favorendo l'insorgere di movimenti gravitativi di espansione laterale e franamento cosismico, come verificato nel 2012 nelle località di San Carlo e Mirabello.

Condizioni di rischio moderato si riscontrano, di norma, in presenza di corpi limoso-sabbiosi da rotta fluviale o argine prossimale, oltre che in corrispondenza di paleoalvei minori sub-affioranti. Queste fasce liquefacibili bordano, in genere, i principali corpi di alveo abbandonati o da essi si separano divagando nelle aree di piana interalvea.

Anche antiche sabbie tardo pleistoceniche, sepolte a non elevata profondità, mostrano una moderata suscettibilità a liquefazione ($2 < I_L < 5$). Queste condizioni sono state verificate nel settore nord-occidentale e settentrionale del territorio comunale.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

Rischi di liquefazione da molto bassi a nulli ($I_L < 2$) caratterizzano invece le aree topograficamente depresse, formate da sedimenti argillosi coesivi, spesso organici, depositi in condizioni di palude e depressione interalvea. In questi contesti significativi corpi di sabbie, se presenti, si rinvenivano in genere oltre i 15 m di profondità (paragrafo 8.4 - MOPS da 2001 a 2005).

Le aree a minor rischio coincidono spesso con zone rurali meno abitate, ma le stesse condizioni di non liquefacibilità sono state verificate anche in buona parte del centro storico come nell'area urbana cittadina sita a sud del Po di Volano.

Gli indici ottenuti dalle nuove analisi di liquefazione hanno permesso di aumentare notevolmente le conoscenze relative al grado di rischio nel territorio comunale. Raffronti con i preesistenti studi di microzonazione sismica risultano però alquanto complessi, sia per il diverso numero e tipologia di indagini penetrometriche analizzate, sia per l'utilizzo di differenti metodi semplificati per la stima del potenziale di liquefazione. A questo si deve inoltre aggiungere la variazione delle accelerazioni di picco (PGA) utilizzate per il calcolo degli indici di liquefazione, dettata dai nuovi fattori di amplificazione proposti dagli abachi regionali (D.G.R. n. 630/2019) ed avvalorati dai risultati delle analisi di risposta sismica locale eseguite. I risultati degli approfondimenti geologico-sismici hanno condotto ad una complessiva riduzione delle aree considerate potenzialmente soggette fenomeni di liquefazione, rispetto a quanto indicato nei precedenti studi di microzonazione. La riduzione è stata particolarmente significativa all'interno dell'area urbana orientale, interessando sia il centro storico che le zone di più recente espansione oltre le mura. Altre modifiche ad aree precedentemente classificate come potenzialmente liquefacibili sono state apportate in ambiti di diverse frazioni comunali.

9.2 Correlazione fra insediamento antropico e potenziale di liquefazione

Nella pianura ferrarese, emerge una forte correlazione fra la distribuzione dell'edificato, la viabilità storica e le zone a più elevato potenziale di liquefazione, in quanto i fattori che hanno controllato l'insediamento antropico storico sono gli stessi che hanno prodotto i corpi sabbiosi liquefacibili.

In questi vasti territori di bassa pianura, i limitati gradienti morfologici e la naturale pensilità degli alvei rendono lo scolo delle acque molto difficile. La diffusione di aree umide e paludi nelle depressioni interalvee ha limitato lo sviluppo agricolo e l'insediamento antropico. In questo contesto, i corpi arginali ed i dossi di paleoalveo costituivano le sole strutture stabilmente emerse e drenate, generalmente percorribili anche nei periodi più umidi. La natura continua degli alvei fluviali consentiva lo sviluppo di percorsi e strade, mentre gli alvei attivi rappresentavano vie di trasporto fluviale. La presenza di una falda freatica

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

all'interno dei corpi arginali consentiva l'approvvigionamento idrico attraverso pozzi, fornendo al contempo acqua agli apparati radicali delle piante, coltivabili anche in periodi siccitosi. La combinazione di questi fattori ha fatto sì che i centri antichi si enucleassero, nella quasi totalità dei casi, su corpi sabbiosi di argine ed alveo. In epoca più recente, a seguito delle bonifiche idrauliche e dello sviluppo economico e tecnologico, l'impatto di questi condizionamenti territoriali si è fortemente ridotto, anche se la storica correlazione fra zone liquefacibili ed insediamento permane in parte. Infatti gli insediamenti moderni tendono a svilupparsi intorno ai centri preesistenti e buona parte della rete stradale attuale, ad eccezione di quella sovregionale, ripercorre percorsi storici su corpi di paleoalveo.

Lo stretto rapporto fra evoluzione del reticolo fluviale, deposizione dei corpi sedimentari liquefacibili ed evoluzione storica del tessuto urbano si osserva anche a Ferrara, anche se la crescita urbana ha reso più complesso il quadro. La città si nucleò, in epoca altomedievale, nell'area di San Giorgio su corpi arginali limoso-sabbiosi nei pressi della biforcazione dei rami deltizi del Po e sulla sua sponda settentrionale, sui ventagli da rotta depositi fra via Cammello e via Ghisiglieri. L'insediamento si accrebbe poi sull'argine sinistro del fiume, raggiungendo già all'inizio del XII secolo una lunghezza di circa 2.500 m, fra l'area dell'attuale stadio e Quacchio. I risultati dello studio hanno evidenziato come solo la porzione più granulare del corpo arginale, sviluppata in prossimità dell'antica sponda fluviale, sia potenzialmente suscettibile di liquefazione cosismica. Fenomeni di liquefazione sono verosimilmente concausa dei crolli avvenuti alla chiesa di San Paolo, nel 1570. Verso nord il corpo arginale sfuma rapidamente in sedimenti fangosi coesivi, presenti anche all'interno del tessuto urbano più antico, come nella depressione fra via Scienze e vicolo Torcicoda. Anche l'allineamento delle vie Garibaldi, Mazzini, Saraceno, Borgo di Sotto e Scandiana, posto a nord della porzione granulare dell'argine, non sembra essere soggetto a rischio di liquefazione. Fra il XII ed il XIV secolo, la città si espanse verso nord, fino ad essere limitata dalle mura che si ergevano a sud di Viale Cavour e Corso Giovecca. Questa prima espansione settentrionale è avvenuta in gran parte su terreni fangosi coesivi, che non presentano rischio di liquefazione. In quest'area sorgono alcuni dei principali edifici monumentali della città, come il Castello Estense e la Cattedrale di San Giorgio.

Nel frattempo, nel XII secolo, si sviluppò il ramo fluviale settentrionale del Po, che prese gradualmente il sopravvento. La graduale riduzione del flusso che lambiva a sud la città permise la sua progressiva espansione sulle sabbie di riempimento dell'alveo. In una prima fase, si svilupparono gli isolati a sud delle vie Ripagrande e Mayr, poi la precedente isola di San Antonio in Polesine fu inglobata nella compagine urbana, alla metà del XV secolo. Questa addizione meridionale si imposta su spesse successioni di sabbie di Po, sede di falda freatica e quindi in condizioni ideali per i fenomeni di liquefazione cosismica.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

Antichi fenomeni di liquefazione cosismica e connessi movimenti gravitativi sono, con ogni probabilità, causa del crollo del quattrocentesco Castelnuovo, sito in prossimità dell'attuale Piazza Travaglio.

A partire dal 1492, la città si accrebbe con l'ampia espansione urbana dell'Addizione Erculea, che incorporò borghi e zone in precedenza sparsamente insediate, oltre che preesistenti grandi monasteri. L'area è parte di un'ampia depressione interalvea, dominata da argille ed argille torbose, per nulla suscettibili di liquefazione cosismica. Corpi sabbiosi di alveo minore che fuoriuscivano dal Po si sviluppano però dalla zona dello stadio verso il quadrivio dei Diamanti, per poi proseguire per il Parco Urbano, e da via del Turco lungo le vie Borgo dei Leoni, Erbe e Vigne. Queste strette fasce sabbioso-limose possono presentare elevati potenziali di liquefazione.

L'espansione urbana si arrestò sostanzialmente fino al XX secolo. Solo nel secolo scorso la crescita dell'agglomerato urbano riprese, assumendo un ritmo tumultuoso nel secondo dopoguerra. Fra le due guerre mondiali, sull'area dell'antica fortezza pontificia, sorse il cosiddetto Rione Giardino, fondato su sabbie di Po caratterizzate da elevata suscettibilità a liquefazione e contenenti abbondanti riporti antropici. L'espansione novecentesca saturò buona parte degli spazi rimasti ineditati all'interno delle mura estendendosi ampiamente nel territorio circostante, con strutture che mostrano scarse relazioni con le preesistenze storiche, geomorfologiche e geologiche. Alcune espansioni minori interessano corpi di sabbie di paleoalveo del Po affioranti a ovest del centro storico, in direzione di Cassana-Porotto e in zona Piccola e Media Industria.

Altri insediamenti sorgono in parte su corpi di sabbie di alveo potenzialmente liquefacibili, come Fossanova San Marco e Torre Fossa sul corpo del Po di Primaro o Cocomaro di Cona e di Focomorto, Codrea, Contrappò, Baura, Viconovo, Albarea, Villanova, Denore, Parasacco sul quello del Po di Volano. Infine Pontegradella e Boara sorgono su corpi di paleoalveo minore.

Ulteriori aree potenzialmente liquefacibili si trovano in corrispondenza del paleoalveo del Reno del XVII secolo, su cui corre la S.S. 64 "Porrettana" tra Chiesuol del Fosso a Montalbano.

La maggior parte delle espansioni urbane del '900, sia a Ferrara che nelle frazioni, sono però sviluppate su terreni coesivi non liquefacibili. Ne sono un esempio il Barco e l'ampio quartiere sui due lati di Via Bologna. Corpi allungati di sabbie fluviali sepolte possono però indurre strette fasce di instabilità potenziale, come in corrispondenza dell'antico alveo sepolto di Reno ad occidente di via Bologna o nell'area di via Caretti. Anche corpi di sabbie fluviali singlaciali del Pleistocene superiore hanno mostrato suscettibilità a liquefazione, quando sepolti a deboli profondità e sottoposti ad accelerazioni sismiche più rilevanti.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

Queste condizioni sono state verificate nel settore nord-occidentale del territorio comunale, nelle frazioni di Ravalle e Casaglia ed in un'ampia area a nord di Cassana e Mizzana, comprendente la zona della Piccola e Media Industria, il polo chimico e la parte settentrionale di Pontelagoscuro. Un'area più modesta, con simili caratteristiche, è individuata fra Ca' Grande e Malborghetto di Boara e nella parte settentrionale di Francolino.

9.3 Indicazioni per la riduzione del rischio sismico

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

In base alle principali criticità emerse dagli approfondimenti geologico-sismici sul Comune di Ferrara, si indicano in sintesi le analisi e le indagini ritenute necessarie per la realizzazione di studi geologici a supporto dei diversi livelli di pianificazione territoriale (POC/PUA) ed in fase esecutiva di opere e progetti. L'analisi delle numerose indagini raccolte ha evidenziato come la presenza di livelli sabbiosi e limo-sabbiosi saturi risulti distribuita lungo le direttrici dei numerosi paleoalvei del Po e Reno affioranti o dove le loro sabbie sono sepolte a più debole profondità.

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

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

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

Il calcolo dell'indice di potenziale di liquefazione (I_L) dovrà tenere conto dei metodi e dei parametri di input utilizzati nel presente studio (paragrafo 7.3.1). Scelte meno cautelative dovranno essere adeguatamente

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL COMUNE DI FERRARA

motivate, anche attraverso una approfondita indagine sul contesto idrogeologico locale e sulle soggiacenze minime della falda.

Qualora le stime semplificate di suscettibilità a liquefazione indichino un rischio elevato dovranno essere considerati sondaggi geognostici con prelievo di campioni indisturbati dei terreni granulari, da sottoporre ad analisi granulometriche e prove cicliche di laboratorio, al fine di quantificare l'effettiva suscettibilità alla liquefazione. Queste prove dovranno essere considerate a priori qualora si rinvenissero spessori significativi di depositi liquefacibili e in caso di interventi edilizi strategici e rilevanti previsti dalla pianificazione. Anche le più sofisticate analisi di liquefacibilità sono comunque sempre rappresentative di volumi di terreno limitati, specie in un contesto come quello di pianura in cui la variabilità laterale dei caratteri stratigrafici e sedimentologici risulta particolarmente elevata. L'estendere valutazioni puntuali di suscettibilità alla liquefazione ad aree limitrofe, può risultare quindi alquanto incerto e rischioso. Dovranno perciò essere previste indagini in tipologia e numero adeguato all'estensione dell'area considerata ed alla rilevanza delle opere da realizzare.

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

A tal proposito si precisa che le modellazioni e le analisi di risposta sismica eseguite in questo studio (paragrafo 7.2.1) possono fornire un riferimento metodologico per le analoghe analisi richieste dalle norme tecniche, ma non possono in alcun modo sostituirle.

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

Infine anche nelle aree caratterizzate dalla presenza di spessori significativi di depositi con caratteristiche geotecniche particolarmente scadenti (bassi valori di C_u e alto indice plastico), concentrate in particolare nella microzona 2004 (Figura 8-1 - Tavole D_{1+9}) dovranno essere proposte adeguate campagne di indagini geognostiche in situ e prove geotecniche di laboratorio, per la valutazione e la quantificazione di possibili cedimenti post-sismici.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL
COMUNE DI FERRARA

10 Bibliografia

- AA.VV., (2004): *Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation*. Deliverable D23.12 of the SEASAME project, April, [Online], <http://www.SESAME-FP5.obs.ujf-grenoble.fr>.
- AA.VV., (2011): *Contributi per l'aggiornamento degli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica"*. Supplemento alla rivista *Ingegneria Sismica* Anno XXVIII - n. 2.
- Affatato A., Baradello L., Petronio L., Barbagallo A., Sorgo D., Cristofano G., Lovo M., Maffione S., Pasciullo V., Caputo R., Stefani M., Abu Zeid N., (2019): *Prospezioni sismiche in ambiente urbano a supporto della pianificazione territoriale - parte profonda*. Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata, Vol. 60, supplemento 2, pp. s68-s74
- Albarelo D., Castellaro S., (2011): *Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola*. In AA.VV. (2011): "Contributi per l'aggiornamento degli Indirizzi e Criteri per la microzonazione sismica", supplemento alla rivista *Ingegneria sismica*, a. XXVIII, n. 2.
- Amorosi A., (1997a): *Detecting compositional, spatial, and temporal attributes of glaucony: a tool for provenance research*. *Sedimentary Geology*, 109: 135-153.
- Amorosi A., (1997b): *Miocene shallow-water deposits of the northern Apennines: A stratigraphic marker across a dominantly turbidite foreland-basin succession*. *Geologie en Mijnbouw*, v. 75, p. 295-307.
- Amoroso S., Monaco P., Lehane B. And Marchetti D., (2014): *Examination of the potential of the seismic dilatometer (SDMT) to estimate in situ stiffness decay curves in various soil types*. *Soils and Rocks*, Vol. 37, No. 3, 177-194. ISSN: 1980-9743. Brazilian Association for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ABMS) and Portuguese Geotechnical Society (SPG). São Paulo, Brazil.
- ASTM, (1985): *Classification of Soils for Engineering Purposes: Annual Book of ASTM Standards, D 2487-83, 04.08*, American Society for Testing and Materials, 1985, pp. 395-408.
- Bigi G., Cosentino D., Parotto M., Sartori R., Scandone, P., (1990): *Structural model of Italy - Sheet n°1*, in: Castellarin A., Coli M., Dal Piaz G.V., Sartori R., Scandone P., Vai G.B. (Eds.), *Structural model of Italy*. CNR, Progetto Finalizzato Geodinamica, Roma.
- Boccaletti M., Martelli L., (a cura di) (2004): *Carta Sismo-tettonica della Regione Emilia-Romagna, Scala 1:250.000 e Note Illustrative*. SELCA, Firenze.
- Boccaletti M., Bonini M., Corti G., Gasperini P., Martelli L., Piccardi L., Tanini C. and Vannucci G., (2004): *Seismotectonic Map of the Emilia-Romagna Region, 1:250000*. Regione Emilia-Romagna - CNR.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL
COMUNE DI FERRARA

- Bordoni P., Azzara R.M., Cara F., Cogliano R., Cultrera G., Di Giulio G., Fodarella A., Milana G., Pucillo S., Riccio G., Rovelli A., Augliera P., Luzi L., Lovati S., Massa M., Pacor F., Puglia R., Ameri G., (2012): *Preliminary results from EMERSITO, a rapid response network for site-effect studies*. Ann. Geophys. 55 (4), 599–607. <http://dx.doi.org/10.4401/ag-6153>.
- Boulangier R. W., Idriss I. M., (2014): *CPT and SPT based liquefaction triggering procedures*. Report No. UCD/CGM-14/01, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA, 134 pp.
- Burrato P., Ciucci F., Valensise G., (2003): *An inventory of river anomalies in the Po Plain, northern Italy: evidence for active blind thrust faulting*, Annals of Geophys., 46 (5), 865-882.
- Burrato P., Vannoli P., Fracassi U., Basili R., Valensise G., (2012): *Is blind faulting truly invisible? Tectonic-controlled drainage evolution in the epicentral area of the May 2012, Emilia-Romagna earthquake sequence (northern Italy)*. Annals of Geophys., 55(4), 525-531, doi: 10.4401/ag-6182.
- Caputo R., Papathanasiou G., (2012): *Ground failure and liquefaction phenomena triggered by the 20 May, 2012 Emilia-Romagna (Northern Italy) earthquake: case study of Sant’Agostino - San Carlo - Mirabello zone*. Nat. Haz. Earth System Sciences, 12(11), 3177-3180, doi:10.5194/nhess-12-3177-2012.
- Carta Geologica d’Italia alla scala 1:50.000, *Foglio 187 - Codigoro*, (2009): ISPRA - Servizio Geologico d’Italia - Regione Emilia-Romagna.
- Carta Geologica d’Italia alla scala 1:50.000, *Foglio 202 - San Giovanni in Persiceto*, (2009): ISPRA - Servizio Geologico d’Italia - Regione Emilia-Romagna.
- Carta Geologica d’Italia alla scala 1:50.000, *Foglio 203 - Poggio Renatico*, (2009): ISPRA - Servizio Geologico d’Italia - Regione Emilia-Romagna.
- Carta Geologica d’Italia alla scala 1:50.000, *Foglio 204 - Portomaggiore*, (2009): ISPRA - Servizio Geologico d’Italia - Regione Emilia-Romagna.
- Carta Geologica d’Italia alla scala 1:50.000, *Foglio 240-241 - Forlì-Cervia*, (2005): ISPRA - Servizio Geologico d’Italia - Regione Emilia-Romagna.
- Castellaro S., (2012): *H/V: un contributo oltre Vs30*, In: Tecniche speditive per la stima dell’amplificazione sismica e della dinamica degli edifici, a cura di Marco Mucciarelli, ARACNE editrice, 448 pp.
- Castellaro S., Mulargia F., (2011): *Seismic soil classification from a different perspective*. Annual meeting of the Seismological Society of America, Memphis (Tennessee, USA), Apr. 13-15.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL
COMUNE DI FERRARA

- Castello B., Selvaggi G., Chiarabba C., Amato A., (2006): *CSI Catalogo della sismicità italiana 1981-2002*, versione 1.1. INGV-CNT, Roma. <http://csi.rm.ingv.it/>.
- Castiglioni G., Biancotti A., Bondesan M., Cortemiglia G.C., Elimi C., Favero V., Gasperi G., Marchetti G., Orombelli G., Pellegrini G. B., Tellini C., (1999): *Geomorphological map of the Po Plain, Italy, at scale of 1:250.000*. Earth Surf. Proc. Land., 24, 1115-1120.
- Cerrina Feroni A., Ottria G., Martinelli P., Martelli L., Catanzariti R., (2002): *Carta geologico-strutturale dell'Appennino Emiliano-Romagnolo, 1: 250,000*. SELCA, Firenze.
- Commissione tecnica per la microzonazione sismica, (2018): *Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.1*.
- Corrado, S., Aldega, L., Zattin, M., (2010): *Sedimentary vs. tectonic burial and exhumation along the Apennines (Italy)*. Journal of the Virtual Explorer 36.
- Correggiari A., Field M.E., Bortoluzzi G., Ligi M., Penitenti D., (1992) - *Ridge and swale morphology on the North Adriatic epicontinental shelf*. Rapport CIESM 33:125.
- D.A.L. 112/2007: Atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art. 16, c. 1, della L. R. 20/2000 per *Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica*. Deliberazione dell'Assemblea Legislativa della Regione Emilia-Romagna n. 112 del 02/05/2007, Bollettino Ufficiale della Regione Emilia-Romagna n. 64 del 17/05/2007.
- D.C.P. Provincia di Ferrara n. 32/2014: *Adozione della Variante al PTCP: ambiti produttivi sovracomunali e sistema infrastrutturale*.
- Devoti, R., Esposito A., Pietrantonio G., Pisani A. R., Riguzzi F., (2011): *Evidence of largescale deformation patterns from GPS data in the Italian subduction boundary*, Earth Planet. Sci. Lett., 311, 230–241, doi:10.1016/j.epsl.2011.09.034.
- D.G.R. Emilia-Romagna n. 1227/2015: Ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile n. 171/2014. *Attribuzione contributi a favore degli enti locali. Approvazione dei criteri per gli studi di microzonazione sismica e delle indicazioni per l'archiviazione informatica*.
- D.G.R. Emilia-Romagna n. 2193/2015: *Approvazione aggiornamento dell'atto di coordinamento tecnico denominato "indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica", di cui alla Deliberazione dell'Assemblea Legislativa 2 maggio 2007, n. 112*.
- D.G.R. Emilia-Romagna n. 630/2019: *Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. 24/2017)*.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL
COMUNE DI FERRARA

Di Capua G., Tarabusi G., (2013): DPC-INGV S2 2012-2013 project Annex2 to D4.1 – Site-specific hazard assessment in priority areas - MIRANDOLA (MO) seismo-stratigraphic models, Online <https://sites.google.com/site/ingvdpc2014progettos2/tasks/task-4/d4-1>.

Di Dio G., Caporale L., (1998): *Un modello fisico tridimensionale della conoide alluvionale del Fiume Reno per la gestione degli acquiferi e lo studio della subsidenza*. In: Geofluid '98 - Problemi di ingegneria: Estrazione di fluidi e subsidenza (a cura di G. Brighenti e E. Mesini), Piacenza, 3 ottobre 1998, 67-76.

Di Dio G., Molinari F., (2000): *A study of the groundwater resources in the Ferrara Province (Po River Basin, Northern Italy)*. Proceedings of III Congress on Regional Geological Cartography and Information Systems, 24-27/10/2000. Bavaria, Munich, Germany: 84-86.

DISS Working Group (2018): *Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.2.1: 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; DOI:10.6092/INGV.IT-DISS3.2.1.

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

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

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

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

Fioravante V., Giretti D., (2013): *Studio di Microzonazione Sismica di Terzo Livello. Attuazione dell'Articolo 11 della Legge 2 giugno 2009 n.77, dell'O.P.C.M 4007/2012 e della Delibera della Giunta Regionale dell'Emilia-Romagna, 1302-2012. Piano Operativo Comunale, elaborato QC1.1.1. Adottato il 28/10/2013 con delibera consiliare PG. 82532/13*. Università degli Studi di Ferrara e Consorzio Ferrara Ricerche.

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

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL
COMUNE DI FERRARA

- Galli P., Castenetto S., Peronace E., (2012b): *The MCS macroseismic survey of the Emilia 2012 earthquakes*.
Annals of Geophysics Vol. 55, No 4.
- Garofalo F., Foti S., Hollender F., Bard P.Y., Cornou C., Cox B.R., Ohrnberger M., Sicilia D., Asten M., Di Giulio
G., Forbriger T., Guillier B., Hayashi K., Martin A., Matsushima S., Mercerat D., Poggi V., Yamanaka H.,
(2016): *InterPACIFIC project: Comparison of invasive and non-invasive methods for seismic site
characterization. Part I: Intra-comparison of surface wave methods, Soil Dynamics and Earthquake
Engineering*, vol. 82, pp. 222-240, doi: 10.1016/j.soildyn.2015.12.010i.
- Geotema S.r.l., (2015): *Carta geologica di superficie del Comune di Ferrara e note illustrative*.
https://servizi.comune.fe.it/attach/territorio/docs/qc1_2_4_carta_geologica_note.pdf.
- Geotema S.r.l., (2016): *Carta Geomorfologica Provincia di Ferrara*. <http://www.ferraradeltapo-unesco.it/>.
- Ghielmi M., Minervini M., Nini C., Rogledi S., Rossi M., Vignolo A., (2010): *Sedimentary and Tectonic
Evolution in the Eastern PoPlain and Northern Adriatic Sea Area from Messinian to Middle Pleistocene
(Italy)*, in F.P. Sassi, G. Dal Piaz, and C. Doglioni, (eds.), *Nature and Geodynamics of the Northern Adriatic
Lithostere*: Rend. Fis. Acc. Lincei, v. 21/1, p. 131-16.
- Govoni A., Marchetti A., De Gori P., Di Bona M., Lucente F.P., Improta L., Chiarabba C., Nardi A., Margheriti
L., Piana Agostinetti N., Di Giovambattista R., Latorre D., Anselmi M., Ciaccio M.G., Moretti M.,
Castellano C., Piccinini D., (2014): *The 2012 Emilia seismic sequence (Northern Italy): imaging the thrust
fault system by accurate aftershocks location*. *Tectonophysics*,
<http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2014.02.013>.
- Gruppo di Lavoro Liquefazione, (2012): *Rapporto sugli effetti della liquefazione osservati a Mirabello*.
<http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/sismica/liquefazione-gruppo-di-lavoro>.
- Gruppo di lavoro MPS, (2004): *Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM
3274 del 20 marzo 2003*. Rapp. conclusivo per il DPC, INGV, Milano-Roma, pp 65 + 5 appendici.
- Gruppo di Lavoro MS, (2008): *Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica*. Conferenza delle Regioni e
Province Autonome – Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 3 vol. e CD-rom.
http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/view_pub.wp?contentId=PUB1137.
- Guidoboni E., (1984): *Riti di calamità: terremoti a Ferrara nel 1570-74*, Quaderni storici 55/ a. XIX, n. 1.
- Guidoboni E., (1987): *Demografia e mondo rurale: XV-XVI secolo*, in *Storia di Ferrara*, n. 17, San Marino.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL
COMUNE DI FERRARA

- Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Comastri A., Tarabusi G., Valensise G., (2007): *CFTI4Med, Catalogue of Strong Earthquakes in Italy (461 B.C.-1997) and the Mediterranean Area (760 B.C.-1500)*, INGV-SGA; <http://storing.ingv.it/cfti4med/>.
- Idriss I. M., Boulanger R. W., (2008): *Soil Liquefaction during earthquakes*. MNO-12, Earthquake Engineering Research Institute, 469 pp.
- ISIDe Working Group, (INGV, 2010): *Italian Seismological Instrumental and parametric database*. <http://iside.rm.ingv.it>.
- Iwasaki T., Arakawa T., Tokida K., (1982): *Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes*. Proceedings of the Conference on Soil Dynam.
- Laurenzano G., Priolo E., Barnaba C., Gallipoli M. R., Klin P., Martelli L., Mucciarelli M., Romanelli M.; (2013): *Studio sismologico per la caratterizzazione della risposta sismica di sito ai fini della microzonazione sismica di alcuni comuni della regione Emilia-Romagna*. Rel. OGS 2013/74 Sez. CRS 26, dd. 31 luglio 2013.
- L.R. Emilia-Romagna n. 19 del 30 ottobre 2008: *Norme per la riduzione del rischio sismico*. Bollettino Ufficiale Regione Emilia-Romagna n. 44 del 12 marzo 2010.
- L.R. Emilia-Romagna n. 24 del 21 dicembre 2017: *Disciplina regionale sulla tutela e l'uso del territorio*. Bollettino Ufficiale Regione Emilia-Romagna n. 340 del 21 dicembre 2017.
- Lo Presti D., Meisina C., Squeglia N., (2009): *Applicabilità di prove penetrometriche statiche nella ricostruzione del profilo stratigrafico*. Rivista Italiana di Geotecnica, 2/2009, pag. 9-33.
- Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Conte S., Rocchetti E., (2016): *DBMI15, the 2015 version of the Italian Macroseismic Database*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi:<http://doi.org/10.6092/INGV.IT-DBMI15>.
- Martelli L., Bonini M., Calabrese L., Corti G., Ercolessi G., Molinari F.C., Piccardi L., Pondrelli S., Sani F., Severi P., (2017): *Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe, edizione 2016*.
- Martelli L., Calabrese L., Ercolessi G., Severi P., Romani M., Tarabusi G., Pileggi D., Rosselli S., Minarelli L., Pergalani F., Compagnoni M., Vannucchi G., Madaia C., Facciorusso J., Fioravante V., Giretti D., Mucciarelli M., Priolo E., Laurenzano G., Brammerini F., Speranza E., Conte C., Di Salvo G., Giuffrè M., Zuppiroli M., Guidi F., Vona V., Manicardi A., Mengoli B., Ugoletti C., Ricci L., (2013): *Microzonazione Sismica Dell'area Epicentrale Del Terremoto Della Pianura Emiliana Del 2012 (Ord. 70/2012)*. Atti 32° Convegno Nazionale Gngts, Trieste. Isbn: 978-88-902101-7-4.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL
COMUNE DI FERRARA

- Martelli L., Romani M., (2013): *Microzonazione sismica e analisi della condizione limite per l'emergenza delle aree epicentrali dei terremoti della pianura emiliana di maggio-giugno 2012* (Ordinanza del commissario delegato – Presidente della Regione Emilia-Romagna n. 70/2012), Relazione Illustrativa.
- Mascandola C., Massa M., Barani S., Lovati S., Santulin M., (2017): *Long-Period Amplification in Deep Alluvial Basins and Consequences for Site-Specific Probabilistic Seismic-Hazard Analysis: An Example from the Po Plain (Northern Italy)*. Bulletin of the Seismological Society of America 107 (2): 770-786. <https://doi.org/10.1785/0120160166>.
- Mascandola C., Massa M., Barani S., Albarello D., Lovati S., Martelli L., Poggi V., (2019): *Mapping the Seismic Bedrock of the Po Plain (Italy) through Ambient-Vibration Monitoring*. Bulletin of the Seismological Society of America 109 (1): 164-177. <https://doi.org/10.1785/0120180193>.
- Massa M., Augliera P., Carannante S., Cattaneo M., D'Alema E., Lovati S., Monachesi G., Moretti M., Piccinini D., (Seismological projects DPC-INGV 2012-2013): *May-June 2012 Emilia seismic sequence: relocated seismicity, Project S1, Base-knowledge improvement for assessing the seismogenic potential of Italy*, Deliverable D18, Task b2, <https://sites.google.com/site/ingvdpcprojects1/home>.
- Meletti C., Valensise G. (a cura di), (2004): *Zonazione sismogenetica ZS9 - App.2 al Rapporto conclusivo. Gruppo di lavoro per la redazione della mappa di pericolosità sismica (Ordinanza PCM 3274/2003)*, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.
- Milana, G., P. Bordoni, F. Cara (2014). *1D velocity structure of the Po River plain (Northern Italy) assessed by combining strong motion and ambient noise data*. Bulletin of Earthquake Engineering, 12, 2195; doi:10.1007/s10518-013-9483-y.
- Minarelli L., (2013): Ricostruzione geologica tridimensionale della stratigrafia tardo quaternaria nel sottosuolo di Ferrara. Tesi di Dottorato. <http://eprints.unife.it/805/>.
- Minarelli L., Amoroso S, Tarabusi G., Stefani M., Pulelli M., (2016): *Down-hole geophysical characterization of middle-upper Quaternary sequences in the Apennine Foredeep, Mirabello, Italy*. Annals of Geophysics, 2016.
- Molinari F. C., Boldrini G., Severi P., Dugoni G., Rapti Caputo D. & Martinelli G., (2007) – *Risorse idriche sotterranee della Provincia di Ferrara*. In: Dugoni G. & Pignone R. (Eds.), Risorse idriche sotterranee della Provincia di Ferrara. DB-MAP, Firenze, 7-61.
- Montone P., Mariucci M.T., Pierdominici S., (2012): *The Italian present-day stress map*, Geophys. J. Int., 189, 705-716; doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05391.x.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL
COMUNE DI FERRARA

- Mucciarelli M. (a cura di), (2012): *Tecniche speditive per la stima dell'amplificazione sismica e della dinamica degli edifici*.
- Naso G., Martelli L., Baglione M., Brammerini F., Castenetto S., D'Intinosante V., Ercolessi G., (2019): *Maps for land management: from geology to seismic hazard*. Boll. Geof. Teor. Appl., Vol. 60, DOI 10.4430/bgta0263.
- Ori G.G., Friend P.F., (1984): *Sedimentary basins formed and carried piggyback on active thrust sheets*. Geology, 12, 475-478.
- Pieri M., Groppi G., (1975): *The structure of the base of the Pliocene-Quaternary sequence in the subsurface of the Po and Veneto Plains, the Pedepennine Basin and the Adriatic Sea*. Structural model of Italy, Quaderni de "La Ricerca Scientifica" 90, 409-415.
- Pieri M., Groppi G., (1981): *Subsurface geological structure of the Po Plain (Italy)*. C.N.R., Prog. Fin. Geodinamica, Pubbl., 414, 1-13.
- Pondrelli S., Salimbeni S., Perfetti P., Danecek P., (2012): *Quick regional centroid moment tensor solutions for the Emilia 2012 (northern Italy) seismic sequence*. Annals of Geophys., 55(4), 615-621, doi: 10.4401/ag-6146.
- Rathje E. M, Kottke A. (2013) - *Strata*, <https://nees.org/resources/strata>.
- Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP, (1998): *Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna. A cura di G. M. Di Dio. Regione Emilia-Romagna, ufficio geologico – ENI-Agip, Divisione Esplorazione e Produzione. S.EL.CA., Firenze, pp 120*.
- Ricci Lucchi F., Colalongo M.L., Cremonini G., Gasperi G., Iaccarino S., Papani G., Raffi S., Rio D., (1982): *Evoluzione sedimentaria e paleogeografica nel margine appenninico*, in: Cremonini G., Ricci Lucchi F. (Eds.). Guida alla Geologia del margine appenninico-padano Pitagora-Technoprint, Bologna, pp. 17-46.
- Robertson P.K., (2009): *Performance based earthquake design using the CPT*, Keynote Lecture, International Conference on Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering - from case history to practice, IS-Tokyo, June 2009.
- Robertson P. K., Cabal K.L., (2012): *Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering*, 5th Edition, Gregg Drilling & Testing, Inc.
- Robertson P.K., Campanella R.G., Gillespie D., Greig J. (1986): *Use of piezometer cone data*. In In-Situ'86 Use of In-situ testing in Geotechnical Engineering, GSP 6, ASCE, Reston, Va., Specialty Publication, SM 92, pp. 1263-1280.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL
COMUNE DI FERRARA

Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P. (eds), (2016): *CPTI15, the 2015 version of the Parametric Catalogue of Italian Earthquakes*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi:<http://doi.org/10.6092/INGV.IT-CPTI15>.

Scognamiglio L., Margheriti L., Mele F.M. Tinti E., Bono A., De Gori P., Lauciani V., Lucente F.P., Mandiello A.G., Marcocci C., Mazza S., Pintore S., Quintiliani M., (2012): *The 2012 Pianura Padana Emiliana seismic sequence: locations, moment tensors and magnitudes*. Annals of Geophys., 55(4), 549-556, doi: 10.4401/ag-6159 Sieberg A., (1930): *Geologie der Erdbeben*. Handbuch der Geophysik, 2(4), 552-555.

Sieberg A., (1930): *Geologie der Erdbeben*. Handbuch der Geophysik, 2, 4, pp. 550-555.

Sonmez H., (2003): *Modification to the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction-prone area (Inegol-Turkey)*. Environ. Geology 44(7), pp. 862-871.

Toscani G., Burrato P., Di Bucci D., Seno S., Valensise G., (2009): *Plio-Quaternary tectonic evolution of the Northern Apennines thrust fronts (Bologna-Ferrara section, Italy): seismotectonic implications*. Bollettino della Società Geologica Italiana 128.

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL
COMUNE DI FERRARA

11 Allegati

Carta delle indagini	Tavola A	1:36.000
	Tavole A _{1÷9}	1:10.000
Carta Geologico Tecnica	Tavola B	1:36.000
	Tavole B _{1÷9}	1:10.000
Carta delle frequenze naturali dei terreni	Tavola C1 e C2	1:36.000
	Tavole C1 _{1÷9} e C2 _{1÷9}	1:10.000
Carta delle aree suscettibili di effetti locali	Tavola D	1:36.000
	Tavole D _{1÷9}	1:10.000
Carta della velocità delle onde di taglio S (Vs)	Tavola E	1:36.000
	Tavole E _{1÷9}	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di secondo livello - PGA	Tavola F	1:36.000
	Tavole F _{1÷9}	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di secondo livello - SA1	Tavola G	1:36.000
	Tavole G _{1÷9}	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di secondo livello - SA2	Tavola H	1:36.000
	Tavole H _{1÷9}	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di secondo livello - SA3	Tavola I	1:36.000
	Tavole I _{1÷9}	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di secondo livello - SA4	Tavola J	1:36.000
	Tavole J _{1÷9}	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di secondo livello - SI1	Tavola K	1:36.000
	Tavole K _{1÷9}	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di secondo livello - SI2	Tavola L	1:36.000
	Tavole L _{1÷9}	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di secondo livello - SI3	Tavola M	1:36.000
	Tavole M _{1÷9}	1:10.000
Carta di microzonazione sismica di secondo livello - HSM	Tavola N	1:36.000
	Tavole N _{1÷9}	1:10.000

APPROFONDIMENTI GEOLOGICO-SISMICI A SUPPORTO DEL NUOVO PIANO URBANISTICO GENERALE (P.U.G.) DEL
COMUNE DI FERRARA

Allegato 1 - Sezioni Geologiche

Allegato 2 - Rapporti di Prova

Allegato 3 - Verifica Potenziale di Liquefazione CPTu
