



PROTEZIONE CIVILE
Presidenza del Consiglio dei Ministri
Dipartimento della Protezione Civile



Regione Emilia Romagna



CONFERENZA DELLE REGIONI E
DELLE PROVINCE AUTONOME

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

MICROZONAZIONE SISMICA

Livello 3

Relazione illustrativa

Regione Emilia–Romagna

Comune di Brisighella



Regione	Soggetto realizzatore	Data
EMILIA–ROMAGNA Studio realizzato con il contributo di cui all'OCPDC 52/2013 recepita con DGR 1919/2013	Raggruppamento temporaneo di professionisti Capogruppo: dott. geol. Samuel Sangiorgi Mandanti: dott. geol. Tiziano Righini, dott. geol. Stefano Marabini, dott. geol. Antonio Milioto	Maggio 2019

INDICE GENERALE

1	INTRODUZIONE.....	3
1.1	Criteri di realizzazione dello studio e riferimenti normativi.....	3
1.2	Lo studio di microzonazione sismica preesistente e l'attività di adeguamento.....	5
1.3	Elaborati prodotti.....	8
2	DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO.....	10
2.1	Riferimenti bibliografici.....	10
2.2	Sismicità storica.....	11
2.3	Sorgenti sismogeniche.....	17
2.4	Altri elementi di pericolosità sismica di riferimento per la pianificazione territoriale.....	18
	2.4.1 <i>Gli indirizzi regionali sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica.....</i>	18
	2.4.2 <i>La pericolosità preliminare elaborata per il PSC.....</i>	21
3	ASSETTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO.....	24
3.1	Inquadramento geologico strutturale.....	24
3.2	Substrato geologico marino e depositi quaternari.....	25
3.3	Successioni marine affioranti.....	27
3.4	Coperture alluvionali quaternarie.....	28
3.5	Aspetti geomorfologici.....	30
4	DATI GEOTECNICI E GEOFISICI.....	34
4.1	Le indagini di repertorio.....	34
4.2	La banca dati delle indagini.....	37
4.3	Le indagini eseguite per gli approfondimenti di livello 3.....	37
	4.3.1 <i>Indagini geognostiche e geofisiche.....</i>	37
	4.3.2 <i>Indagini di laboratorio.....</i>	40
5	MODELLO DEL SOTTOSUOLO.....	42
6	INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE.....	48
6.1	Frequenza naturale dei terreni (f_0).....	48
6.2	Substrato rigido e coperture.....	48
6.3	Ulteriori considerazioni sugli approfondimenti di livello 3.....	49
7	METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI.....	51
7.1	Zone suscettibili di amplificazioni locali – fattori di amplificazione semplificati.....	51
7.2	Zone suscettibili di amplificazioni locali – modelli numerici bidimensionali della RSL.....	53
7.3	Zone suscettibili di amplificazioni locali – confronto con modelli numerici 1D.....	61
7.4	Elaborazione dei valori di H.....	65
8	ELABORATI CARTOGRAFICI.....	67
8.1	Carta delle Indagini (tavola 1).....	67
8.2	Carta Geologico Tecnica (tavola 2).....	67

8.2.1	<i>Forme di superficie e sepolte</i>	68
8.2.2	<i>Terreni di copertura</i>	68
8.2.3	<i>Substrato geologico</i>	68
8.2.4	<i>Elementi geologici</i>	69
8.2.5	<i>Instabilità di versante</i>	69
8.3	Carta delle Frequenze Naturali dei Terreni (tavola 3).....	70
8.4	Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (tavola 4).....	70
8.5	Carta delle velocità delle onde di taglio S (tavola 5).....	74
8.6	Carta di microzonazione sismica di livello 3 (tavole da 6 a 13).....	75
8.7	Carta della distribuzione dei valori di H (tavola 14).....	76
9	BIBLIOGRAFIA.....	77

1 INTRODUZIONE

1.1 Criteri di realizzazione dello studio e riferimenti normativi

L'Unione dei Comuni della Romagna Faentina (figura 1.1) è risultata destinataria di più contributi per la realizzazione di studi di microzonazione sismica (MS) del territorio di propria competenza come previsto dalla Legge 77/2009. Le fasi di elaborazione/aggiornamento degli studi di MS sono schematizzati nella tabella 1.1:

Riferimenti normativi	Note sulle elaborazioni e/o aggiornamenti
OCDPC 52/2013 DGR 1919/2013	<ul style="list-style-type: none"> Adeguamento agli standard di archiviazione informatica degli studi di MS livello 2 con analisi CLE (per i Comuni di Brisighella, Casola Valsenio, Castel Bolognese e Riolo Terme) Adeguamento agli standard di archiviazione informatica degli studi di MS di livello 2 e locali approfondimenti di livello 3 (per il Comune di Faenza) Analisi della CLE, adeguamento agli standard di archiviazione informatica degli studi di MS di livello 2 e locali approfondimenti di livello 3 (per il Comune di Solarolo)
OCDPC 293/2015 DGR 573/2016	<ul style="list-style-type: none"> Locali approfondimenti di livello 3 (per i Comuni di Brisighella, Casola Valsenio, Castel Bolognese e Riolo Terme)
Rep. 746/2019 dell'Unione della Romagna Faentina	<ul style="list-style-type: none"> Ulteriore adeguamento degli studi di MS dei Comuni dell'Unione della Romagna Faentina alla DGR 630/2019

Tabella 1.1

L'Unione dei Comuni della Romagna Faentina ha affidato al dr. Geol. Gabriele Tarabusi il lavoro di adeguamento degli studi di livello 2 agli standard di archiviazione informatica dei Comuni di Brisighella, Casola Valsenio, Castel Bolognese e Riolo Terme, mentre ha affidato al Raggruppamento di Professionisti costituito dai dr. Geol. Samuel Sangiorgi, dr. Geol. Tiziano Righini e dr. Geol. Antonio Milioto l'elaborazione delle analisi di microzonazione sismica di terzo livello per l'ambito territoriale del Comune di Faenza e Solarolo. Questi ultimi due Comuni hanno parti di territorio caratterizzate da particolari criticità geologiche in caso di terremoto (susceptibilità alla liquefazione), come già riscontrato dalle precedenti analisi di microzonazione sismica.

I locali approfondimenti di livello 3 per i Comuni di Brisighella, Casola Valsenio, Castel Bolognese e Riolo Terme sono stati successivamente affidati al Raggruppamento di

Professionisti costituito dal dr. Geol. Samuel Sangiorgi, dr. Stefano Marabini, dr. Geol. Tiziano Righini e dr. Geol. Antonio Milioto.

L'ulteriore adeguamento degli studi di MS dei Comuni dell'Unione della Romagna Faentina alla DGR 630/2019 è stato anch'esso affidato al Raggruppamento di Professionisti costituito dal dr. Geol. Samuel Sangiorgi, dr. Stefano Marabini, dr. Geol. Tiziano Righini e dr. Geol. Antonio Milioto.

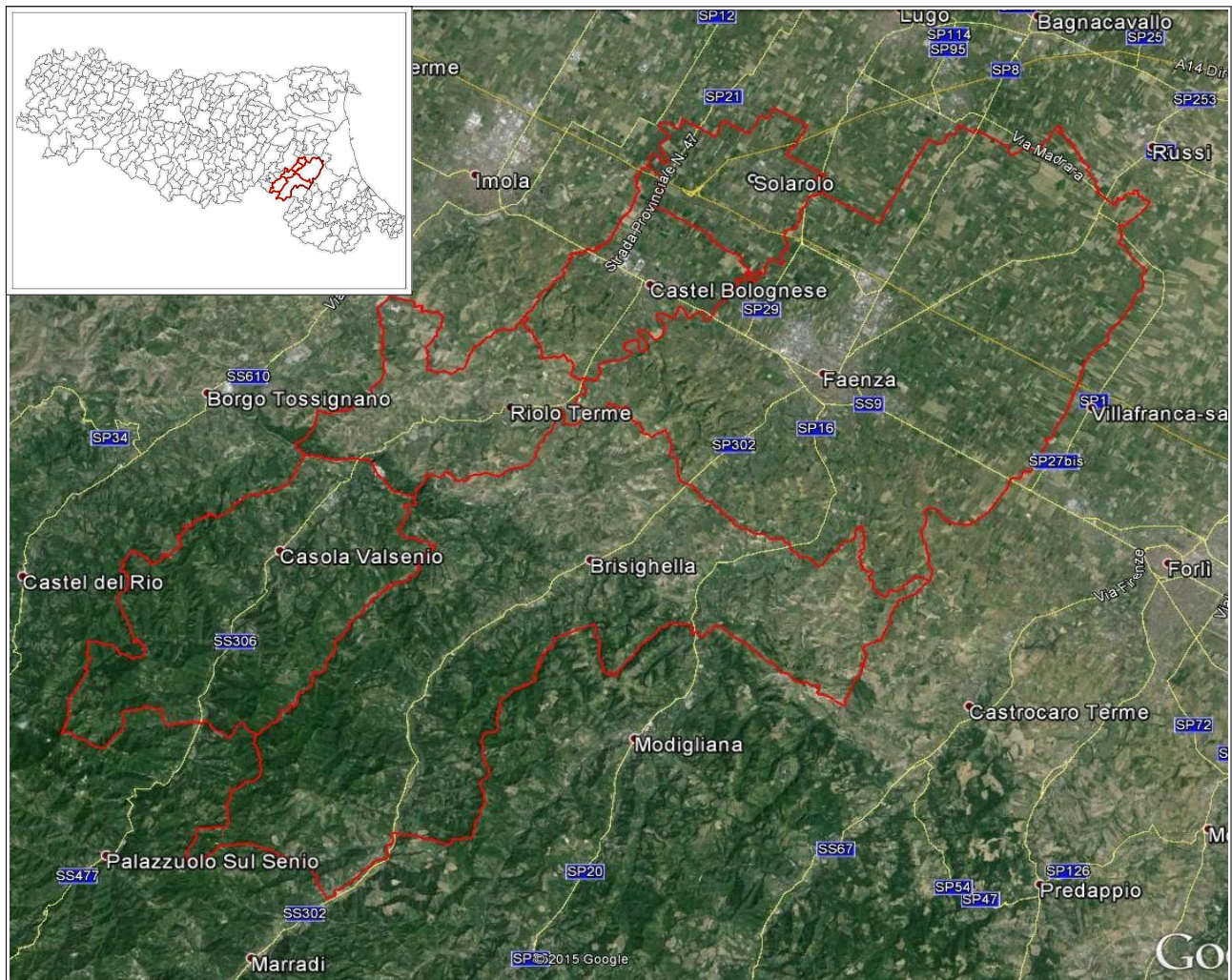


Figura 1.1 – Localizzazione del territorio amministrativo dell'Unione della Romagna Faentina (da: "Google Earth").

Occorre rammentare che l'Unione della Romagna Faentina già disponeva di uno studio¹ sismico parzialmente equiparabile ad un primo e secondo livello di approfondimento (S.

¹Piano Strutturale Comunale Associato Faenza – Brisighella – Casola Valsenio – Castel Bolognese – Riolo Terme – Solarolo: Quadro Conoscitivo – Allegato 1 <<Microzonazione sismica degli ambiti urbani sismica locale>> e Quadro Conoscitivo – Sistema Naturale e Ambientale <<Carta della Pericolosità sismica Locale scala 1:50.000>>.

Marabini, 2009). Questo precedente lavoro è stato elaborato a corredo del Quadro Conoscitivo per il Piano Strutturale Comunale (PSC) in forma associata².

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

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

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

- DGR n. 630/2019 “Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, LR n. 24/2019”;
- LR 30/10/2008 n.19 “Norme per la riduzione del Rischio Sismico”;
- DM del 17/01/2018 “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”.

1.2 Lo studio di microzonazione sismica preesistente e l'attività di adeguamento

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

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

Per ottimizzare costi e tempi la microzonazione sismica è attualmente richiesta nelle aree urbanizzate e nelle ulteriori aree indicate nella DGR 630/2019 (cfr. par. 2.1).

Per il presente lavoro, l'area oggetto dello studio di microzonazione (definita come "ambiti di studio" nelle cartografie) per ciascun Comune è stata definita in accordo con i tecnici dell'Ufficio Associato di Pianificazione Urbanistica dell'Unione. Il perimetro di tali ambiti è identificato in tutte le tavole cartografiche con un tratto di colore azzurro. Nella figura 1.2 si riportano gli ambiti di studio ricadenti nel Comune di Brisighella.

²Ai sensi della LR n.20/2000 e ss.mm.

Nel 2009, un gruppo di lavoro che aveva come responsabile il dr. Geol. Stefano Marabini e che era coordinato dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna (da qui in avanti SGSS), ha realizzato una serie di elaborati per lo studio di microzonazione sismica a scala dell'Unione, che all'epoca hanno rappresentato un riferimento per novità e qualità del prodotto (Marabini, 2009).

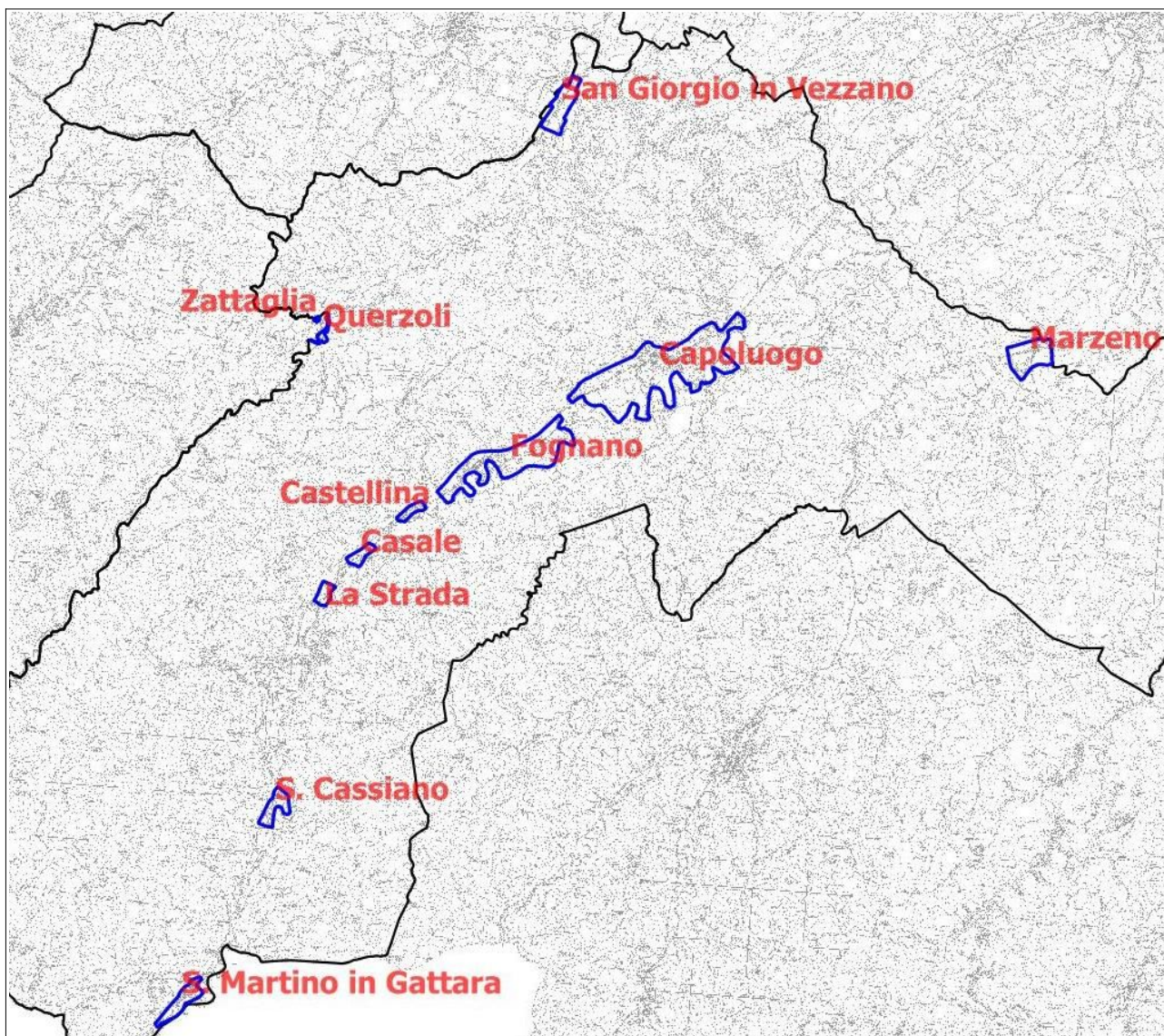


Figura 1.2 – Localizzazione degli areali di studio nel Comune di Brisighella.

Nell'ambito dell'attuale studio è stato però necessario procedere ad una completa rivisitazione di quanto esistente e alla realizzazione di diversi nuovi elaborati richiesti dagli attuali standard di archiviazione informatica indicati dalla CTMS. Lo studio del 2009 aveva infatti previsto, oltre ad elaborati di inquadramento (carte geolitologica, geomorfologica, idrogeologica, ecc.) a scala dell'Unione (1:50.000) e quindi non adeguabili agli standard attuali, la sola "carta di microzonazione sismica" a scala comunale. Tale carta è stata realizzata però solo per il fattore di amplificazione in Intensità Spettrale di Housner (SI) per

un intervallo di periodi compresi tra 0,1 e 0,5 secondi, ed è quindi solo parzialmente assimilabile alla cartografia di secondo livello richiesta dagli attuali standard.

La necessità di fornire elaborati con contenuti informativi molto diversi e aggiuntivi rispetto a quanto già disponibile dal precedente studio, ha suggerito, sin dalla fase di impostazione del lavoro, di reperire ed archiviare dati di indagini geognostiche e geofisiche realizzate anche dopo il 2009, di eseguire un attento confronto rispetto ai dati più aggiornati della Cartografia Geologica della Regione Emilia-Romagna. Quest'ultima fase di studio ha consentito di realizzare anche per i Comuni di Brisighella, Casola Valsenio, Castel Bolognese e Riolo Terme, ulteriori approfondimenti di "livello 3" basati su indagini geognostiche e geofisiche specifiche (sondaggi a carotaggio continuo con prove di laboratorio, anche di "colonna risonante", su campioni di sedimenti; prove "Down-Hole", tomografie sismiche a rifrazione; "Coni Sismici", ecc.) oltre all'esecuzione di ulteriori indagini penetrometriche, stendimenti MASW e registrazioni HVSR in aree ancora relativamente carenti di dati sismostratigrafici.

Per quanto concerne il Comune Brisighella, il precedente studio di MS di livello 2 (OCDPC 52/2013; DGR 1919/2013) aveva in particolare individuato anche alcune "zone di attenzione", riconducibili a processi instabilità di versante. A questo proposito le ulteriori analisi di approfondimento sono consistite fondamentalmente nella rettifica di alcuni refusi e nell'aggiornamento degli elementi cartografici riconducibili a corpi di frana come desunto dall'Inventario del dissesto predisposto dal SGSS regionale.

Occorre infatti evidenziare come i dissesti di versante interferenti con le aree studiate di Brisighella siano riconducibili ad alcuni fenomeni di crollo, scorrimenti e frane complesse. Non si è tuttavia reputato utile e/o necessario effettuare specifici approfondimenti sulla stabilità, per il fatto che tali "zone di attenzione" interessano settori relativamente limitati degli areali studiati e/o condizioni di interferenza da ritenersi non significative. Si tratta, inoltre, di dissesti che risultano già interessati da interventi di messa in sicurezza, in particolare quelli di crollo nel centro storico di Brisighella (come meglio specificato nel paragrafo 6.3).

Gli approfondimenti di "livello 3" si sono invece concentrati nell'areale "Capoluogo", più densamente abitato, ritenendosi a tal proposito utile ed efficace elaborare modelli numerici 2D di RSL interessanti al tempo stesso sia l'ambito di terrazzo fluviale (sul quale si insedia in prevalenza l'abitato), sia il sovrastante versante; quest'ultimo, come meglio descritto nei successivi capitoli, è prevalentemente caratterizzato da substrati rocciosi considerati "rigidi" (Formazione Marnoso-Arenacea e Gessoso-Solfifera), in parte detensionati e con al piede coperture colluviali di spessore significativo e molto variabile. Il settore più orientale dell'abitato, anch'esso in prevalenza esteso in ambito di terrazzo fluviale, è invece caratterizzato da substrato roccioso "non rigido" ("Argille Azzurre" ovvero prevalentemente marne e argille, di età Plio-pleistocenica), variamente "allentato" in

superficie e con ancora discrete coperture eluvio-colluviali al piede del versante sovrastante.

L'aumentata disponibilità di informazioni di sottosuolo, acquisite sia da indagini di repertorio raccolte presso Professionisti che tramite le specifiche indagini eseguite per questo studio, ha inoltre permesso di elaborare e utilizzare per la modellazione di RSL sezioni sismostratigrafiche originali e di sufficiente dettaglio anche per una verifica degli effetti di amplificazione per condizioni di focalizzazione delle onde sismiche.

1.3 Elaborati prodotti

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

Gli elaborati dello studio di microzonazione sismica per il Comune di Brisighella sono i seguenti:

- le 15 tavole cartografiche in formato PDF come riportato in tabella 1.1 (e illustrate al capitolo 8);
- l'archivio informatizzato dei dati delle indagini (alfanumerici e cartografici in formato "shp" - shapefile);
- la relazione descrittiva in formato PDF;
- le tre sezioni geologiche (allegato 1) in formato PDF;
- i rapporti delle indagini di nuova esecuzione (allegato 2).

Tutti gli elaborati sono stati aggiornati e risultano conformi secondo le specifiche indicate, per il primo, il secondo e il terzo livello di approfondimento, alla Delibera n.630/2019 della Regione Emilia-Romagna. Tali specifiche rimandano sostanzialmente alle linee guida emanate dal Dipartimento della Protezione Civile (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2018), che dettagliano ogni aspetto legato a tali studi, integrandoli con la richiesta di alcuni specifici elaborati aggiuntivi, come specificato al capitolo 8. Si segnala a questo proposito che l'obbligo di attenersi in modo rigoroso ai suddetti standard di rappresentazione, ha vincolato il presente lavoro sia a livello di articolazione delle tavole (numero e tipologia) e della relazione (titoli e ordine dei capitoli), che a livello di rappresentazione cartografica (tematismi rappresentati, legende e denominazioni, ma anche layout, colori e font dei caratteri) e di contenuti descrittivi.

Le cartografie elaborate (tutte alla scala 1:10.000) hanno utilizzato come base topografica di riferimento lo strato raster fornito dai Comuni dell'Unione. Questa cartografia

rappresenta un ulteriore aggiornamento della Carta Tecnica Regionale alla scala 1:5.000 per quanto riguarda lo stato dell'urbanizzato (edifici e viabilità). Per questo lavoro, la base topografica raster è stata georeferenziata secondo il sistema di riferimento richiesto, ovvero nelle coordinate "WGS_1984_UTM_Zone_33N", per produrre tutti gli strati informativi in formato numerico in coerenza con quanto richiesto dagli Standard.

Elaborato cartografico	Comune di Brisighella
Carta delle indagini	Tavola 1a
Carta geologico-tecnica	Tavola 2a
Carta delle frequenze naturali dei terreni	Tavola 3a
Carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS)	Tavola 4a
Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs)	Tavola 5a
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FAPGA	Tavola 6a
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FA0.1-0.5	Tavola 7a
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FA0.4-0.8	Tavola 8a
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FA0.7-1.1	Tavola 9a
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FA0.5-1.5	Tavola 10a
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FH0.1-0.5	Tavola 11a
Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FH0.5-1.0	Tavola 12a
Carta di microzonazione sismica di livello 3 - FH0.5-1.5	Tavola 13a
Carta di distribuzione dei valori di HSM	Tavola 14a
Carta di distribuzione dei valori di H_{0408} H_{0711} H_{0515}	Tavola 15a

Tabella 1.1 - Elaborati cartografici redatti per lo studio di microzonazione sismica del Comune di Brisighella. Le lettere al termine del nome della tavola identificano il Comune dell'Unione: Brisighella (a), Casola Valsenio (b), Castel Bolognese (c), Faenza (d), Riolo Terme (e), Solarolo (f).

2 DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO

2.1 Riferimenti bibliografici

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

A supporto della redazione del presente capitolo, sono stati utilizzati i dati liberamente consultabili di database pubblici sviluppati da diversi enti e gruppi di ricerca:

- il CPTI15 - Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani versione 2015 (Rovida et al., 2016; <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15/>), che raccoglie i parametri dei terremoti avvenuti in Italia con intensità massima ≥ 5 o magnitudo ≥ 4.0 d’interesse nella finestra temporale 1000-2014;
- il DBMI15 - Database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI15 e provenienti da diverse fonti. È relativo ai terremoti con intensità massima ≥ 5 e d’interesse per l’Italia nella finestra temporale 1000-2014 (Locati et al., 2016 <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11/>) e la sua precedente versione DBMI04 (Stucchi et al., 2007);
- il CFTI5Med - Catalogo dei Forti Terremoti in Italia e in area mediterranea (Guidoboni et al., 2019), che riporta per numerose località i risentimenti di circa 300 tra i terremoti storici più forti avvenuti sul territorio italiano, e fornisce anche informazioni sul contesto storico, sociale e demografico in cui gli eventi si sono prodotti, sui parametri epicentrali, sugli effetti dei terremoti sull’ambiente fisico (fagliazione superficiale, frane sismo-indotte, liquefazioni, maremoti, ecc.), sul danneggiamento dei centri storici e di beni monumentali;
- la Mappa di Pericolosità Sismica Nazionale (INGV, 2004; <http://esse1.mi.ingv.it/>) che definisce una “pericolosità di base” su un reticolo di punti di riferimento. Ai punti del reticolo sono attribuiti, per nove differenti periodi di ritorno del terremoto atteso, i valori di a_g (accelerazione orizzontale massima del suolo) e dei principali “parametri spettrali” riferiti all’accelerazione orizzontale, da utilizzare per il calcolo dell’azione sismica;
- la Zonazione Sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004, che individua sul territorio italiano 42 macrozone-sorgente e ha rappresentato il riferimento per i calcoli di pericolosità sismica nel territorio nazionale di cui al punto precedente;
- il Database delle Sorgenti Sismogenetiche Italiane DISS versione 3.2.1 (DISS Working Group, 2018), che contiene sorgenti individuali e composite di terremoti, intese come una rappresentazione georeferenziata semplificata e in 3D di faglie (sorgenti individuali) o regioni contenenti faglie (sorgenti composite) in grado di generare terremoti di M 5.5 o superiore;
- il Catalogo della Sismicità Italiana (Castello et al., 2006; <http://csi.rm.ingv.it/>) che contiene tutti gli eventi registrati dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale dal 1981 al 2002;
- il Database ISIDe (ISIDe Working Group 2010; <http://iside.rm.ingv.it/>), che contiene tutti gli eventi registrati dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale dal 2003 ad oggi.

2.2 Sismicità storica

Il DBMI15 (Locati et al., 2016) indica, per l'area dell'Unione, effetti di danno a partire dall'anno 1661 con intensità macrosismiche che arrivano fino al grado IX-X della scala MCS (Sieberg, 1930), registrato in alcune frazioni di Brisighella in occasione del terremoto del 4 aprile 1781. Di seguito si riportano le schede che sintetizzano la storia sismica dei quattro capoluoghi comunali in formato tabellare (con intensità a partire dal grado V MCS) e grafico (tutti i valori di intensità).

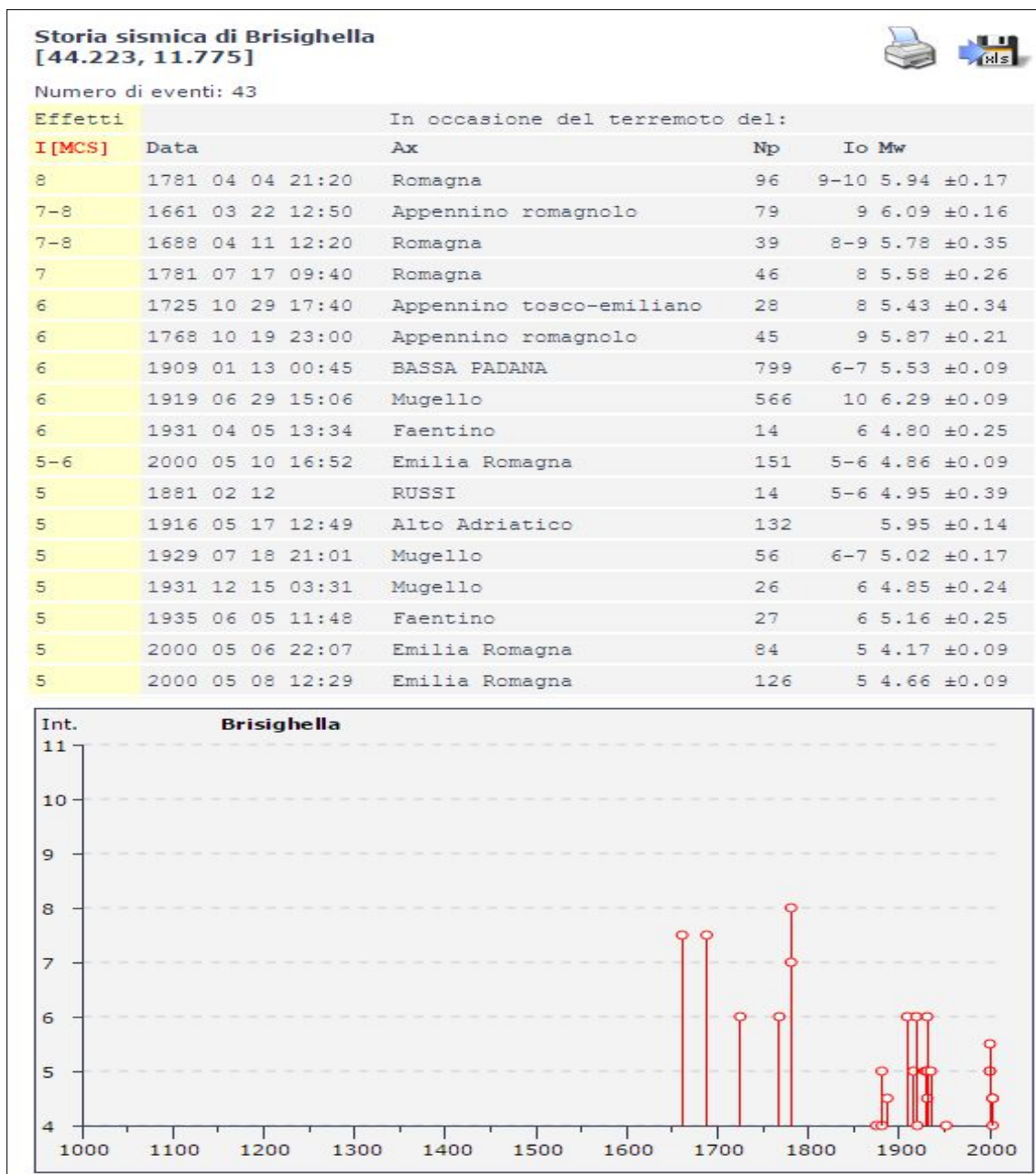


Figura 2.1 – Elenco, distribuzione e macrointensità stimata dei terremoti significativi per i Comuni di Brisighella, Casola Valsenio, Castel Bolognese e Riolo Terme (fonte: INGV – Database Macrosismico Italiano 2015).

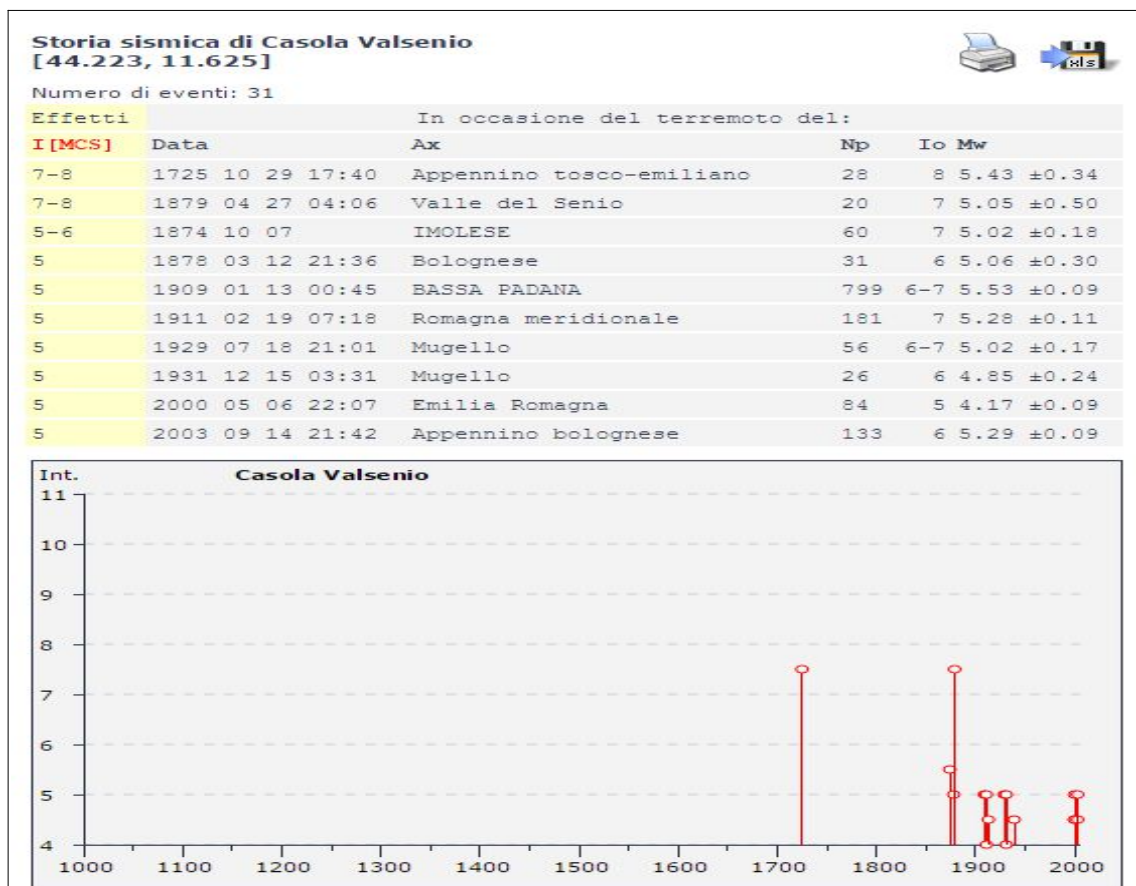
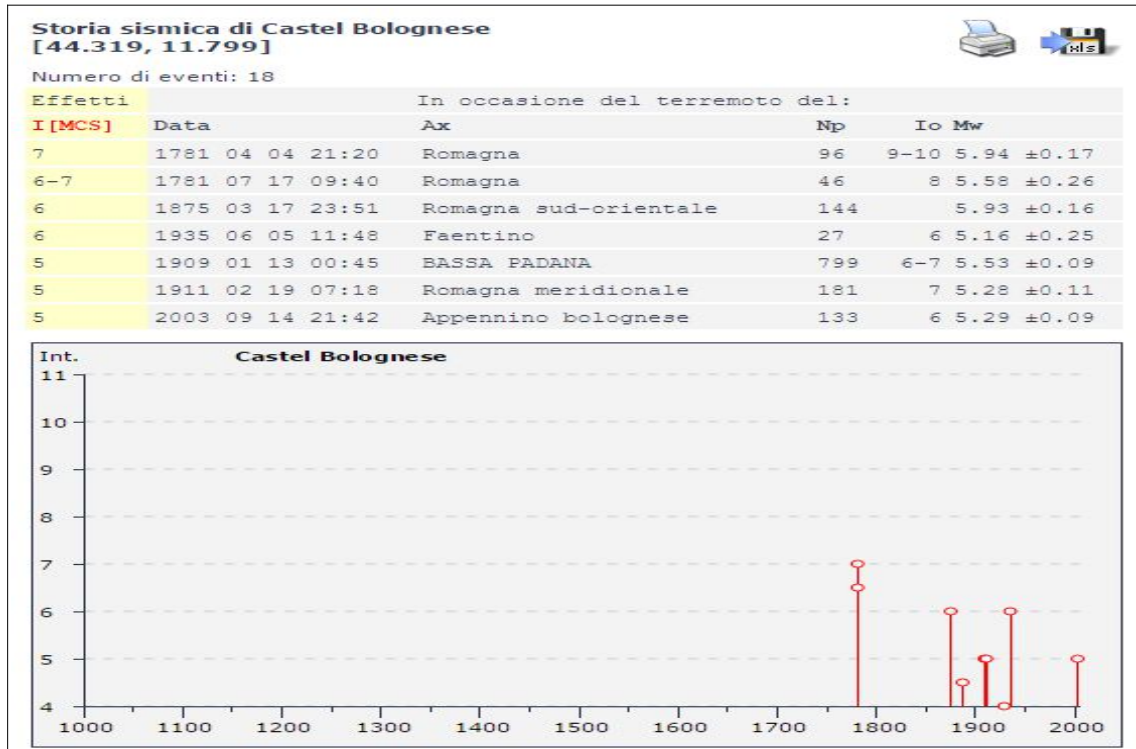


Figura 2.1 (continua) – Elenco, distribuzione e macrointensità stimata dei terremoti significativi per i Comuni di Brisighella, Casola Valsenio, Castel Bolognese e Riolo Terme (fonte: INGV – Database Macrosismico Italiano 2015).

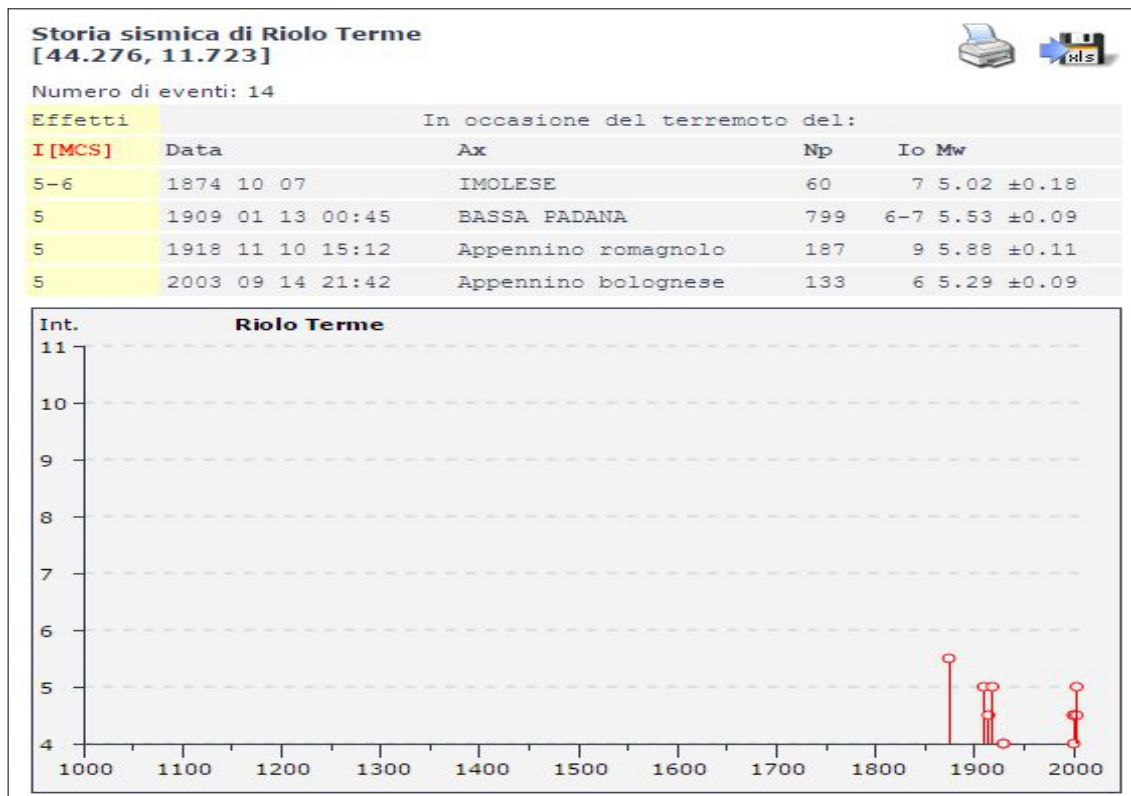


Figura 2.1 (continua) – Elenco, distribuzione e macrointensità stimata dei terremoti significativi per i Comuni di Brisighella, Casola Valsenio, Castel Bolognese e Riolo Terme (fonte: INGV – Database Macrosismico Italiano 2015).

Nella figura 2.1 si riportano le schede che sintetizzano le storie sismiche dei Comuni di Brisighella, Casola Valsenio, Castel Bolognese e Riolo Terme.

Secondo quanto riportato nel DBMI, l'evento sismico che ha prodotto i danni maggiori nel Faentino, soprattutto nel Comune di Brisighella (ma anche, con intensità inferiore, a Castel Bolognese) è quello del 4 aprile 1781 (a cui è attribuita una magnitudo di oltre 5.9), di cui è riportata in figura 2.2 la mappa degli effetti. Come è possibile osservare, i maggiori effetti (grado IX-X MCS), con crolli e distruzioni diffusi, sono localizzati proprio in comune di Brisighella (Poggio, San Ruffillo, Villa San Giorgio in Vezzano) o al confine con quello di Faenza (Quartolo). L'epicentro macrosismico, in sostanza il "baricentro" degli effetti, è collocato infatti in comune di Brisighella in prossimità del confine con Faenza. Per questa sequenza sismica il catalogo CFT15Med (Guidoboni et al., 2018) riporta la seguente sintesi degli effetti:

la scossa del 4 aprile, avvenuta alle ore 21:20 GMT circa, ebbe effetti disastrosi soprattutto nei dintorni di Brisighella dove 5 villaggi subirono la distruzione della quasi totalità del patrimonio edilizio: a Poggio crollarono 13 case su 18; a Quartolo 9 su 11; a Villa San Giorgio in Vezzano 36 su 40; a San Ruffillo 37 su 42; a Tebano su 42 case 2 crollarono completamente e 36 subirono crolli parziali e divennero pericolanti. Una ventina di altre località, quasi tutte del Faentino, subirono danni gravi. In particolare nell'area

extraurbana di Faenza crollarono o furono gravemente lesionate 694 case, 46 chiese e 47 canoniche su un totale di oltre 2000 edifici (circa il 39%). A Faenza furono giudicati inabitabili 247 edifici su 1.832 (13% circa). L'area in cui il terremoto fu sentito fu molto ampia, da Lucca a Venezia.

Un'altra scossa, avvenuta il 17 luglio alle ore 9:40 GMT circa, pur meno forte di quella precedente, causò tuttavia gravi danni nella valle del fiume Montone, tra Faenza e Forlì. Crollarono case a Corleto e Scaldino, a Forlì i danni furono molto gravi; una quindicina di altre località, tra le quali Ravenna, subirono forti danni. A Ravenna furono danneggiati il palazzo apostolico, il duomo e le chiese di S. Giovanni Battista delle Catene, di S. Domenico, di S. Giovanni Evangelista e di S. Maria di Porto. Furono nuovamente danneggiati Faenza e il suo contado dove, complessivamente, su oltre 2200 edifici ne divennero inabitabili 406 (18%). L'area in cui questa scossa fu sentita si estese da Lucca a Vicenza.

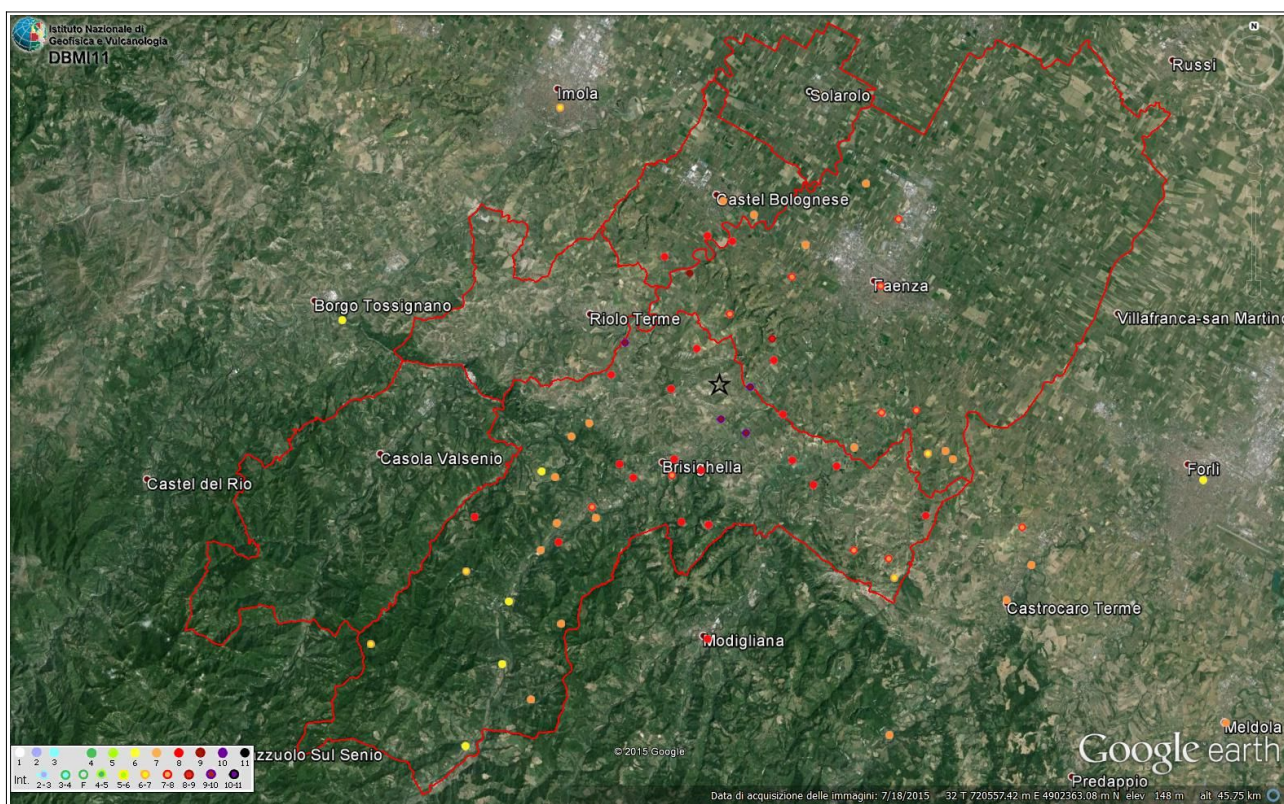


Figura 2.2 – Gli effetti della scossa del 4 aprile 1781 in rapporto alle aree oggetto di studio (confini comunali distinti col tratto rosso). L'epicentro macrosismico è rappresentato con la stella nera.

Secondo quanto riportato nel DBMI, altri due eventi sismici hanno invece prodotto danni maggiori soprattutto a Casola Valsenio (grado VII-VIII MCS), entrambi con epicentro macrosismico localizzato nel territorio comunale di Casola Valsenio e appartenenti a lunghe sequenze sismiche ed entrambi preceduti da scosse di minore intensità nei giorni precedenti: quello del 29 ottobre 1725 e quello del 27 aprile 1879.

Per la sequenza sismica del 1725 il catalogo CFTI5Med (Guidoboni et al., 2018) riporta la seguente sintesi degli effetti:

La scossa principale avvenne il 29 ottobre 1725 alle ore 17:40 GMT ca. (ore 1 della notte, in orario "all'italiana"); era stata preceduta da una scossa più leggera la sera precedente e fu seguita da una replica non forte alle ore 20:00 GMT circa (ore 4 della notte). La zona più colpita fu l'area appenninica toscoro-romagnola fra le valli dei fiumi Santerno e Lamone. I danni più gravi avvennero a Castel del Rio, Fontanelice (all'epoca Fontana), Marradi, Palazzuolo sul Senio, Tossignano, dove vi furono crolli di abitazioni ed edifici religiosi. A Casola Valsenio la scossa causò il crollo del convento e della chiesa dei Domenicani; a Modigliana cadde la copertura del mastio della fortezza e furono danneggiati i muri e i soffitti della cappella di Santa Barbara. La scossa fu avvertita sensibilmente a Bologna e più leggermente a Firenze.

Per la sequenza sismica del 1879 il catalogo CFTI5Med (Guidoboni et al., 2018) riporta la seguente sintesi degli effetti:

Il periodo sismico fu caratterizzato da oltre 500 scosse di varia intensità avvertite fra il 25 aprile e il 3 maggio 1879. La scossa principale avvenne il 27 aprile 1879 alle ore 4:06 GMT ca. e colpì la vallata del Senio nell'Appennino toscoro-romagnolo. Il terremoto ebbe i suoi massimi effetti a Casola Valsenio e a Palazzuolo sul Senio: nella prima località vi furono gravi danni alle abitazioni e, nella campagna circostante, crollarono varie case rurali; nella seconda molte case subirono danni notevoli. La scossa fu avvertita più o meno fortemente, ma senza danni, a Pieve di Casio, Modigliana, Borgo Tossignano, Castel del Rio, Guzzano, Firenze e Bologna. Numerose repliche furono avvertite successivamente, fino al 13 agosto 1879.

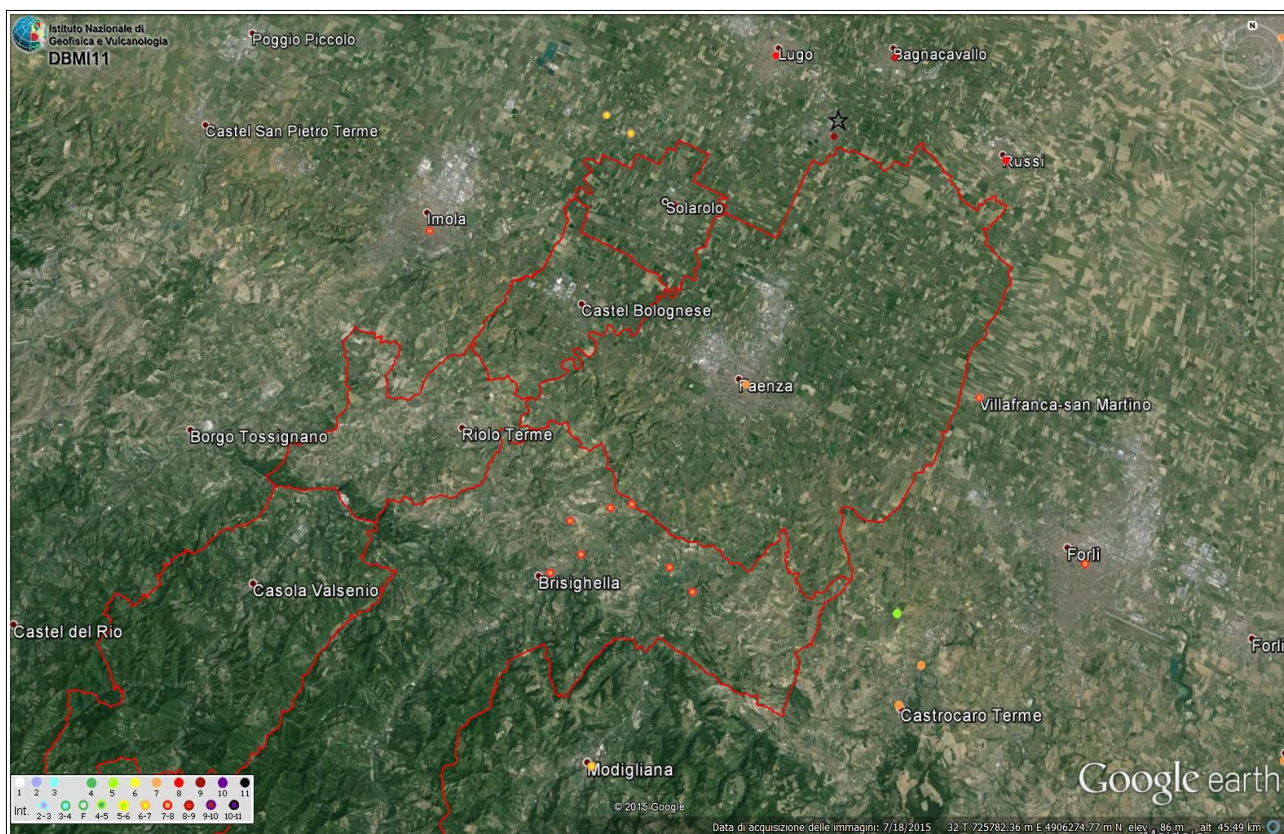


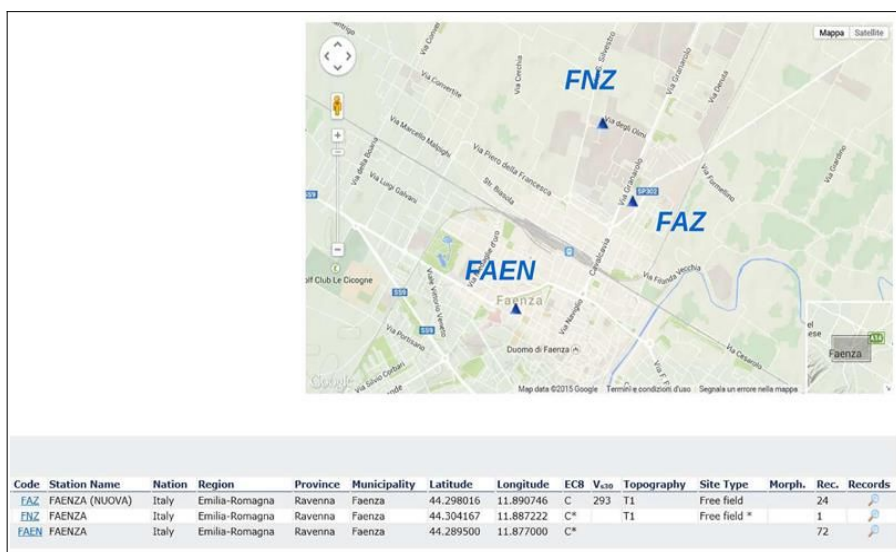
Figura 2.3 – Gli effetti della scossa dell'11 aprile 1688 in rapporto alle aree oggetto di studio (confini comunali distinti col tratto rosso). L'epicentro macrosismico è rappresentato con la stella nera.

Un ulteriore evento sismico significativo, che ha prodotto effetti maggiori nella “bassa romagna”, soprattutto a Cotignola (figura 2.3), ma che ha causato danneggiamenti anche nei Comuni di Solarolo (intensità macrosismica stimata pari a 8) e Faenza, è quello del 4 novembre 1688, a cui è attribuita una magnitudo di circa 5.78 (epicentro macrosismico localizzato nei pressi di Cotignola). Per questo sisma, il catalogo CFTI5Med (Guidoboni et al., 2018) riporta la seguente sintesi degli effetti:

la scossa distruttiva avvenne l'11 aprile 1688 alle 12:20 GMT circa (ore 18 secondo l'uso orario "all'italiana") ed ebbe una durata di circa 20 secondi [...]. La località più danneggiata fu Cotignola, dove ci furono distruzioni estese a gran parte dell'abitato: 68 case crollarono totalmente e tutte le altre furono danneggiate gravemente e molte rese inabitabili; gravi danni subirono anche gli edifici pubblici ed ecclesiastici del paese, in particolare la chiesa parrocchiale di S.Stefano di cui crollò il tetto e furono gravemente lesionate le navate e il campanile. Danni molto gravi furono rilevati anche a Bagnacavallo: 40 case crollarono totalmente e quasi tutte le altre furono danneggiate; molti edifici di rilievo fra cui 11 chiese con gli annessi edifici monastici crollarono parzialmente o furono lesionate in modo grave. A Solarolo, Russi e Lugo ci furono crolli di abitazioni. Danni rilevanti avvennero in altre 15 località circa, fra cui Forlì, Imola, Cesena e Ravenna. La scossa fu sentita in modo molto forte a Bologna e a Venezia, dove causò leggeri danni sporadici; più leggermente fu avvertita fino a Padova a nord e fino a Firenze a sud. La scossa principale fu seguita da numerose repliche. Le più forti avvennero il 27 e 28 maggio 1688 e causarono qualche ulteriore danno a Imola e Faenza. Un grosso macigno si staccò dal monte sovrastante il paese di Brisighella causando gravi danni.

Occorre infine rammentare che, nella primavera del 2000, l'area Faentina e Forlivese è stata interessata da una sequenza di sismi di lieve e medio-bassa energia che, sebbene abbia provocato una diffusa preoccupazione tra la popolazione per il perdurare delle scosse, ha prodotto danni generalmente leggeri (classificati fino al VI° MCS in due casi rispettivamente a Faenza e Brisighella), ma piuttosto diffusi (caduta di intonaci, lesioni capillari) e risultato del cumulo dei diversi eventi osservati.

Figura 2.4 – Localizzazione delle stazioni accelerometriche di Faenza (Fonte: INGV).



Va inoltre sottolineato che, in generale, il danneggiamento ha interessato prevalentemente edifici vulnerabili, o per tipologia edilizia o per condizioni di manutenzione. Complessivamente, sono stati registrati 70 eventi con magnitudo 3 o superiore, di cui 11 scosse con magnitudo superiore a 3.8. La più elevata (10 maggio 2000), ha raggiunto una magnitudo momento pari a 4.86.

Lo sciame sismico del 2000 è stato registrato dalle stazioni accelerometriche situate nel nel Capoluogo Faenza (figura 2.4). In particolare, la stazione "FNZ" (Rete Accelerometrica Nazionale) ha consentito di misurare una a_g massima al suolo pari a $108,09 \text{ cm/s}^2$ (cioè pari a $0,110g$) per la principale scossa 10 maggio.

2.3 Sorgenti sismogeniche

Secondo la Zonazione sismogenetica del Territorio Italiano - ZS9, prodotta dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) nel 2004 (Meletti e Valensise, 2004), che rappresenta il riferimento per le valutazioni di pericolosità sismica nel territorio nazionale, l'area in esame ricade principalmente entro la Zona 914, mentre soltanto la porzione più settentrionale del territorio amministrativo di Faenza ricade nella Zona 912. Entrambe le zone sono caratterizzate da un valore di $M_{w_{max}}$ pari a 6.14.

Il database DISS (DISS Working Group, 2015) indica la presenza di tre sorgenti sismogenetiche che, complessivamente, attraversano la vasta area dell'Unione dei Comuni della Romagna Faentina. Come evidenziato dalla figura 2.5, gli epicentri macrosismici dei terremoti che hanno dato luogo ai maggiori risentimenti nei Comuni montani e collinari dell'area di studio, sono attribuibili a diverse sorgenti sismogenetiche composite del sistema compressivo appenninico, un sistema di faglie con vergenza nord-est. Anche per i Comuni di pianura, gli effetti di macrosismicità sono riconducibili a sorgenti sismogenetiche composite che derivano dal sistema di faglie del margine avanzato e sepolto dell'arco appenninico.

I principali effetti risentiti a Casola Valsenio sono dovuti ai terremoti del 1725 e 1879, riconducibili all'attività della sorgente *ITCS027 - Bore-Montefeltro-Fabriano-Laga*, che è collocata ad una profondità compresa tra 12 e 22 km di profondità, ha uno *slip rate* compreso tra 0,1 e 0,5 mm/anno e a cui è associata una magnitudo massima di 6.2 (derivata però da sorgenti individuali dell'Appennino Umbro-Marchigiano lontane dall'area di studio). Il terremoto del 1781, che ha prodotto i massimi effetti di danno registrati storicamente nei Comuni di Faenza e Brisighella, è invece associato alla sorgente *ITCS001 - Castel San Pietro Terme-Meldola*, che è collocata ad una profondità compresa tra 2 e 8 km di profondità, ha uno *slip rate* compreso tra 0,24 e 0,63 mm/anno e a cui è associata una magnitudo massima di 5.8 (derivata dalla sorgente individuale *ITIS093 - Faenza*, associata proprio al terremoto del 1781, così come definito nella versione 04 del catalogo CPTI).

Per il Comune di Solarolo, i principali effetti sono dovuti ai terremoti del 1688 e dell'aprile 1509. Quest'ultimo colpì un'area particolarmente ristretta della Romagna tra Faenza e Solarolo, dove causò dissesti e crolli parziali di edifici pubblici e di strutture militari. Entrambi i terremoti sono riconducibili all'attività delle due sorgenti composite associate: la *ITCS011 – Mordano – Guarniera* e la *ITCS109 – Fusignano – Villanova*, entrambe collocate ad una profondità compresa tra 2 e 10 km di profondità e con *slip rate* tra 0,10 e 0,33 mm/anno. A queste due sorgenti composite è associata una magnitudo massima di 6.0 (derivata dalla sorgente individuale *ITIS100 – Bagnacavallo* e associata al citato terremoto di Cotignola del 1688 e da altri terremoti avvenuti nella pianura romagnola).

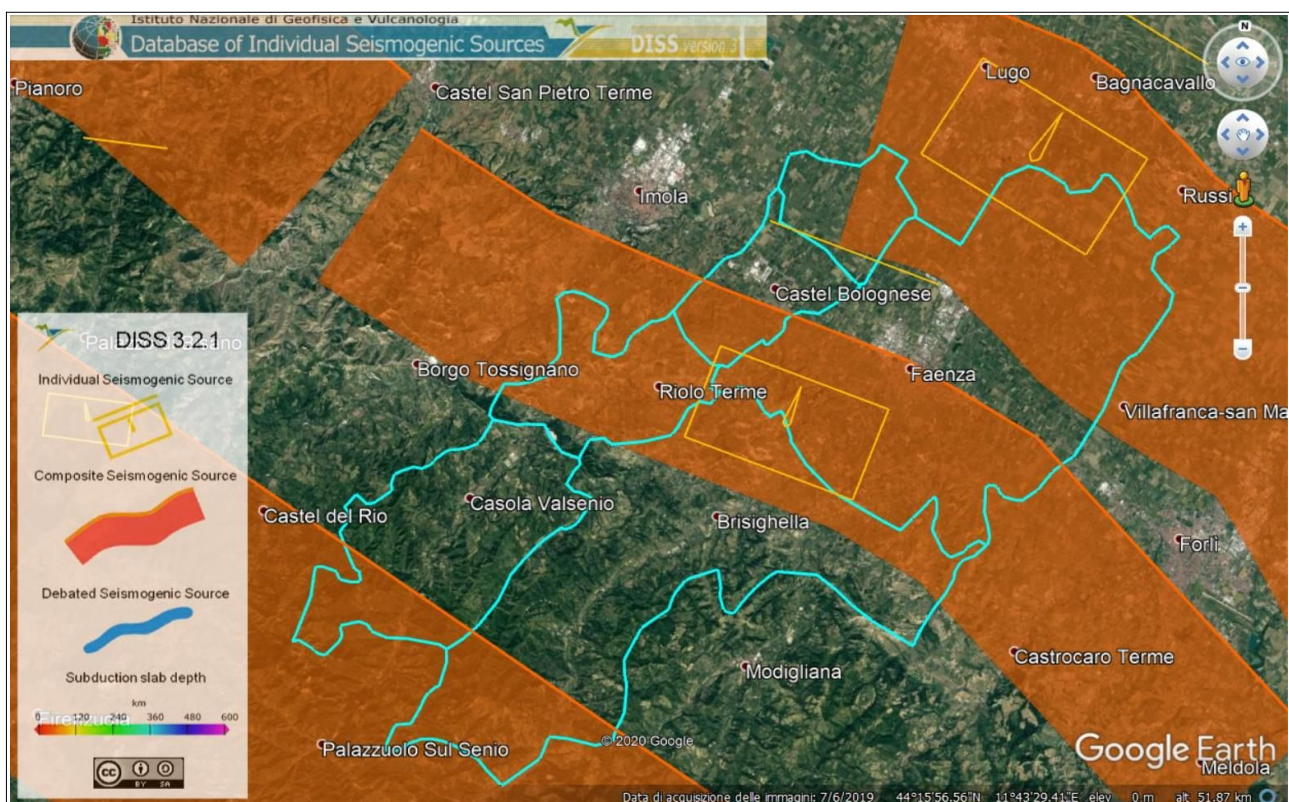


Figura 2.5 - Le sorgenti sismogenetiche del database DISS 3.2.1, nell'intorno dell'area di studio. In rosso è distinta l'area dei comuni oggetto di studio.

2.4 Altri elementi di pericolosità sismica di riferimento per la pianificazione territoriale

2.4.1 Gli indirizzi regionali sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica

La Regione Emilia-Romagna ha elaborato e approvato (con Delibera dell'Assemblea Legislativa n.112 del maggio 2007) gli <<Indirizzi per gli studi di Microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica>>, in coerenza con la LR n.20/2000 <<Disciplina generale sulla tutela e l'uso del territorio>>. Questi indirizzi regionali per la microzonazione sismica, sono stati elaborati sulla scorta degli esiti delle indagini sismiche che la Regione Emilia-Romagna ha effettuato nel territorio regionale

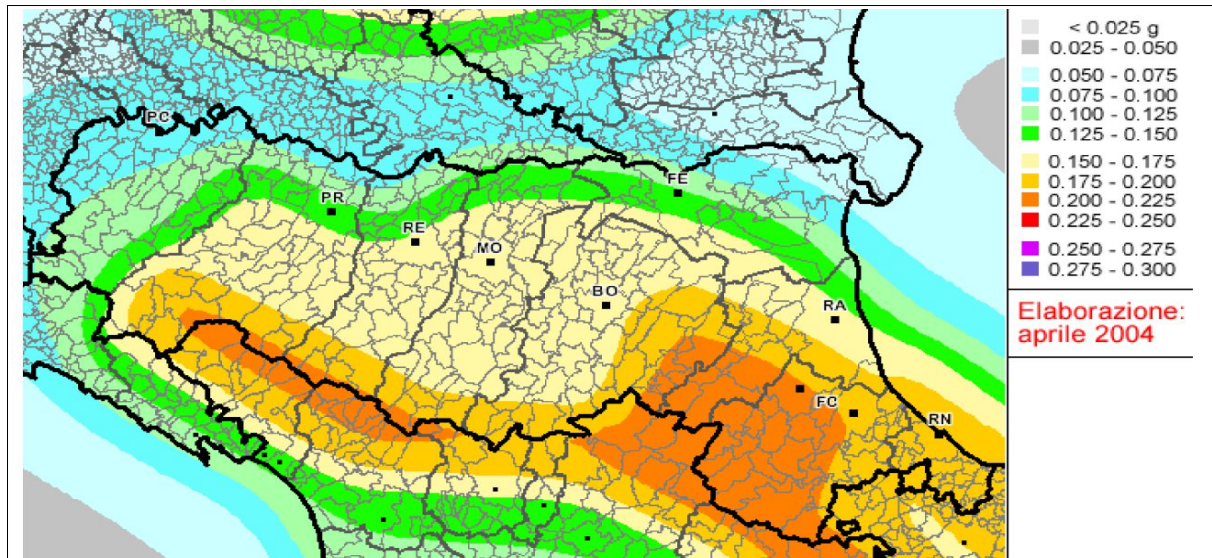
negli ultimi 40 anni circa, assumendo come riferimento la “pericolosità di base” elaborata da INGV e recepita a livello nazionale con l'OPCM 3519/2006.

Con le più recenti DGR 2193/2015 e DGR 630/2019, la Regione Emilia-Romagna ha introdotto ulteriori aggiornamenti agli indirizzi riportati nella DAL 112/2007. Questa parziale revisione prende quale riferimento anche le vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC), le ulteriori esperienze scientifiche seguite ai recenti eventi sismici italiani (L'Aquila 2009; pianura emiliana del 2012) e, infine le esperienze di applicazione della DAL 112/2007. In sintesi, le principali novità contenute nella la DGR 2193/2015 e nella DGR 630/2019 consistono:

- nelle rimodulazioni degli abachi di microzonazione sismica da considerarsi per le analisi semplificate (“livello 2”);
- nella definizione di ulteriori parametri di amplificazione riferiti all'intensità spettrale di Housner (per l'intervallo di periodo T 0,5-1,5 s) e riferiti all'intensità spettrale in accelerazione (per i seguenti intervalli di periodo: 0,1-0,5 s, 0,4-0,8 s, 0,7-1,1 s, 0,5-1,5 s);
- nella definizione dell'input sismico (ag al sito di riferimento) che ora è definito in base ai valori di pericolosità sismica elaborati dall'INGV per tutto il territorio nazionale sui punti di una griglia di passo pari a $0,05^\circ$ (reticolo analogo a quello previsto per le NTC 2008);
- nella richiesta di predisporre cartografie delle frequenze naturali dei terreni a scala territoriale e a supporto del “primo livello” di approfondimento;
- nella richiesta di predisporre una carta della distribuzione sul territorio dei valori di HSM (Naso et al., 2019)

Gli indirizzi RER forniscono gli elementi essenziali per espletare gli studi di pericolosità sismica secondo i tre “livelli” di approfondimento e forniscono inoltre tabelle e formule propedeutiche alla valutazione semplificata dell'amplificazione locale (microzonazione sismica di “secondo livello”).

La mappa nazionale MPS04 (Gruppo di lavoro MPS04, 2004) descrive la pericolosità sismica attraverso il parametro dell'accelerazione massima attesa su suolo rigido e pianeggiante, con una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni (figura 2.6): i valori sono attribuiti ad ogni punto della griglia di calcolo, costruita per tutto il territorio nazionale (griglia con una densità di 20 punti per grado, ossia circa un punto ogni 5 km). Tale mappa è diventata ufficialmente la mappa di riferimento per il territorio nazionale con l'emanazione dell'Ordinanza PCM 3519/2006 (G.U. n.105 dell'11 maggio 2006).



Fi

Figura 2.6 – Pericolosità sismica di base: valori di PGA al suolo rigido (10% di probabilità di superamento in 50 anni) secondo la OPCM 3519/2006.

La DAL 112/2007 e le successive deliberazioni regionali di aggiornamento indicano anche tre accelerogrammi di riferimento per le modellazioni numeriche di risposta sismica locale (analisi di “terzo livello”): si tratta di input selezionati dalla Banca dati IESD attraverso una procedura che ha valutato la similarità tra la forma spettrale di riferimento e la forma degli spettri di risposta dei singoli segnali. È così possibile ricavare lo spettro di risposta e gli accelerogrammi di riferimento per ogni areale riscaldando lo spettro normalizzato di figura 2.7 con la relativa PGA di riferimento al suolo rigido.

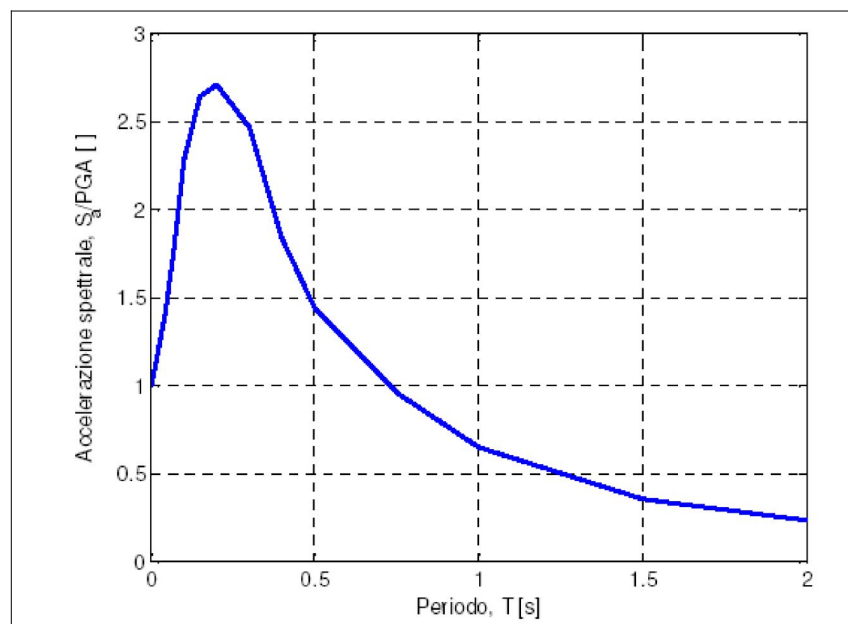


Figura 2.7 – Spettro di risposta normalizzato impiegato per la selezione dalla banca dati accelerometrica IESD dei segnali di riferimento regionale.

2.4.2 La pericolosità preliminare elaborata per il PSC

L'Unione dei Comuni della Romagna Faentina già dispone di uno studio di pericolosità sismica di primo e secondo livello, a corredo del Quadro Conoscitivo per il Piano Strutturale Comunale (PSC) in forma associata.

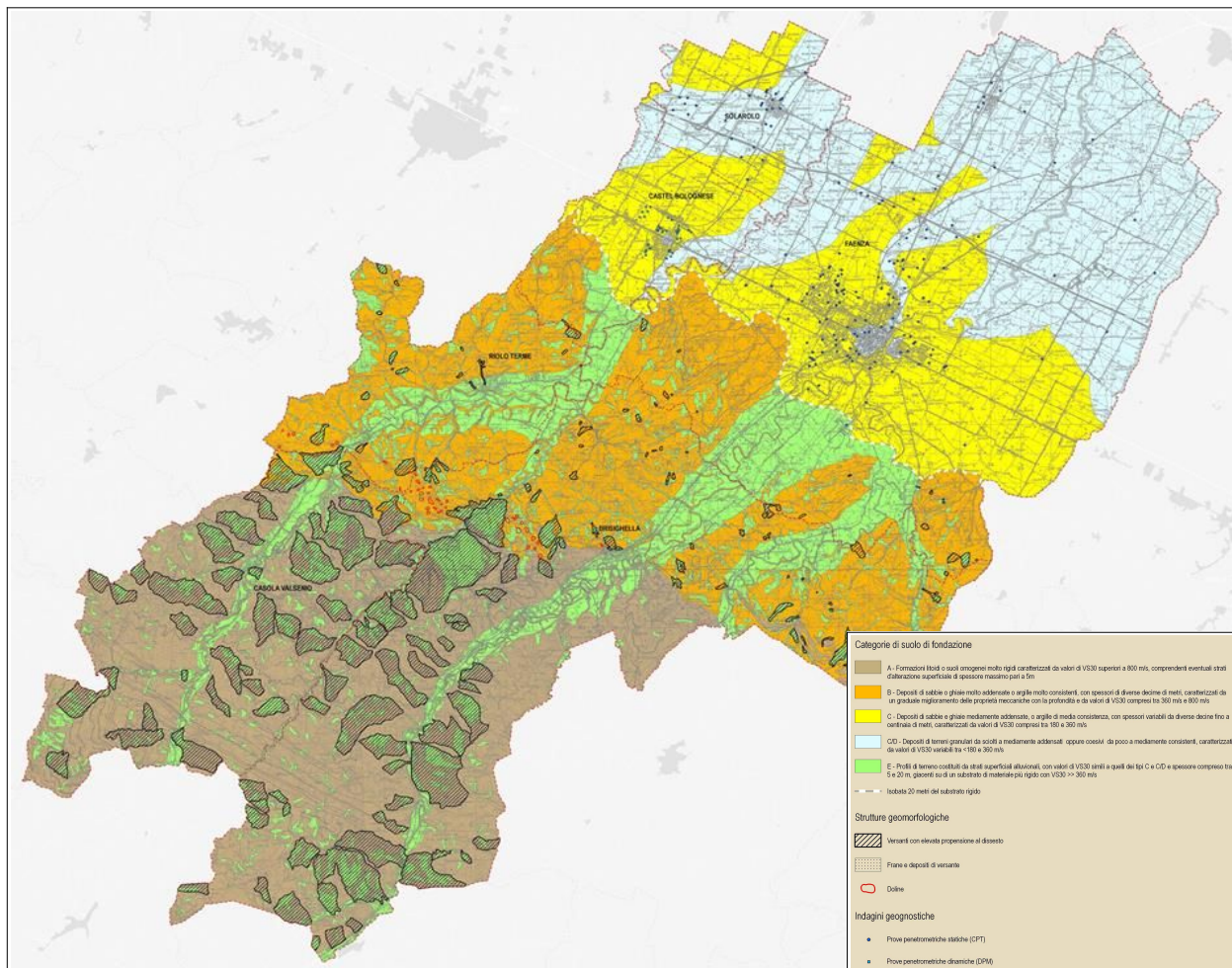


Figura 2.8 – Stralcio della Carta della Pericolosità Sismica Locale alla scala 1:50.000 (Marabini, 2009).

Lo studio, elaborato nel 2009 da un gruppo di lavoro che comprendeva il dr. Geol. Stefano Marabini e il coordinamento del SGSS regionale, si è basato sugli esiti delle indagini geognostiche disponibili all'epoca del lavoro. Lo studio del 2009 rappresenta uno dei primi lavori di microzonazione sismica territoriale dell'Emilia-Romagna elaborati in ossequio alla DAL n. 112/2007 (Marabini, 2009) e ha consentito:

- di produrre una preliminare cartografia che individua le aree suscettibili di effetti locali (primo livello di approfondimento). Questa mappa, pur rispondendo parzialmente ai criteri di analisi di primo livello dettati nelle linee guida regionali (si tratta di un'analisi a scala più vasta – 1:50.000 – e priva di approfondimenti alla scala comunale o

subcomunale), ha di fatto rappresentato una prima base per le ulteriori indagini di approfondimento per la microzonazione sismica (figura 2.8);

- di effettuare ulteriori indagini geognostiche e geofisiche mirate alla caratterizzazione sismica dei comuni interessati (sondaggi a carotaggio continuo; penetrometrie; stendimenti MASW; prove in foro "Down-Hole");
- di redigere la cartografia di microzonazione sismica degli ambiti urbani (secondo livello di approfondimento) consolidati e di potenziale espansione. La microzonazione sismica si è basata sui criteri di stima dei fattori di amplificazione attraverso l'utilizzo di tabelle e formule riportate nella DAL n. 112/2007 e in funzione degli esiti di caratterizzazione geognostica e geofisica del territorio studiato.

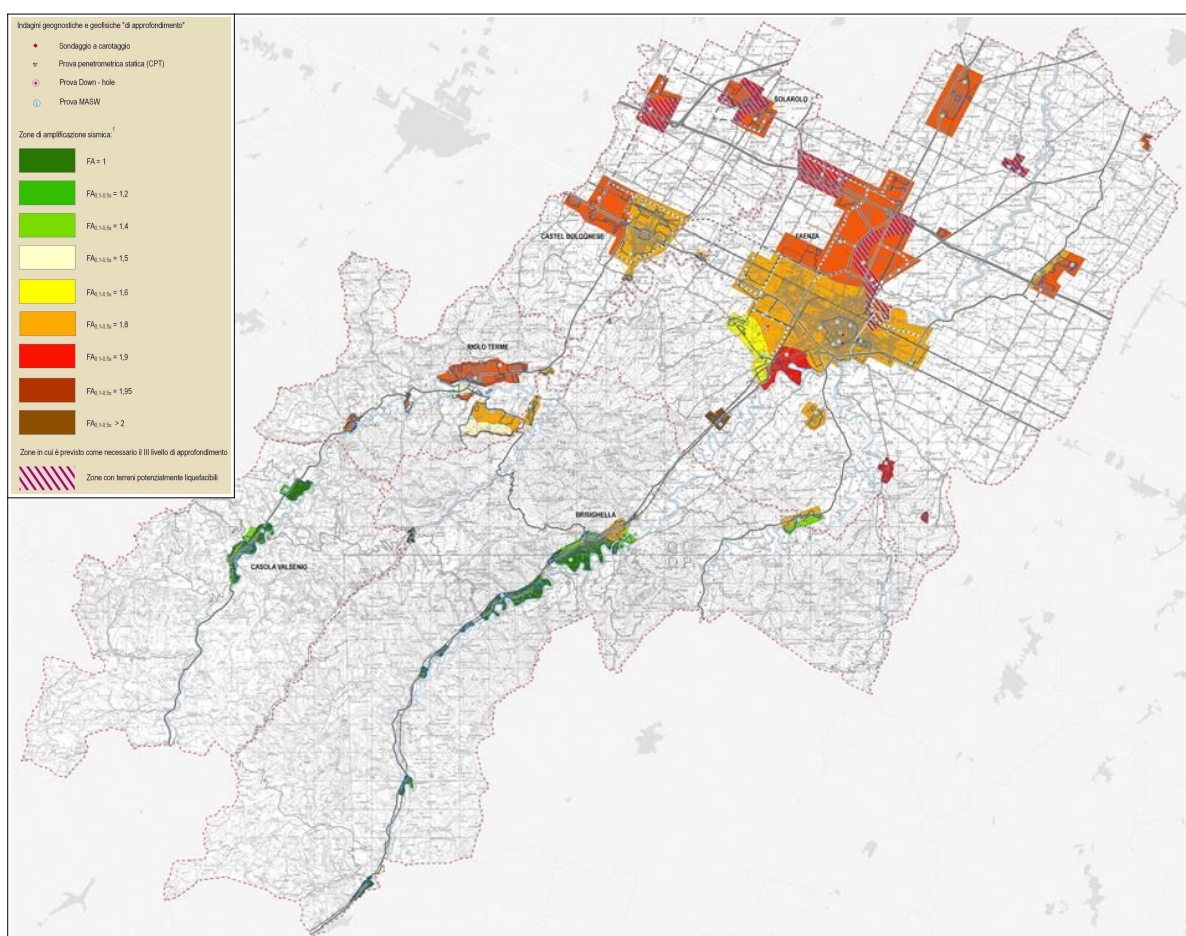


Figura 2.9 - Stralcio della Carta di Sintesi Territoriale della Microzonazione Sismica alla scala 1:50.000 (Marabini, 2009).

I risultati della microzonazione sismica sono stati sintetizzati in mappe di dettaglio (scala 1:10.000) che individuano zone a differente pericolosità sismica e forniscono indicazioni relative alla maggiore o minore pericolosità in termini di fattori di amplificazione sismica (figura 2.9). All'epoca dello studio, si è convenuto di considerare come fattore di

amplificazione rappresentativo del territorio studiato il solo rapporto di Intensità Spettrale di Housner (SI) per un intervallo di periodi compreso tra 0,1 e 0,5 secondi (per un TR pari a 475 anni e smorzamento 5%), in quanto in questo intervallo è compresa oltre il 90% degli edifici esistenti o di previsione.

3 ASSETTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO

3.1 Inquadramento geologico strutturale

Dal punto di vista geologico strutturale il territorio complessivo dell'Unione della Romagna Faentina si estende fino a includere zone di “catena” appenninica e di “margine” appenninico sepolto, ovvero fino quasi al fronte delle “Pieghie Romagnole” (Pieri & Groppi, 1981). Si rammenta che la zona in cui la pianura termina contro i primi declivi appenninici non rappresenta l’inizio della “catena”: infatti all’Appennino morfologico, visibile, segue in pianura un “Appennino in embrione” sepolto sotto i depositi alluvionali padani (PTF di Boccaletti et al., 1985; 2004). In figura 3.1 è inquadrato il contesto tettonico locale che identifica i rapporti tra catena e pianura nel territorio di interesse.

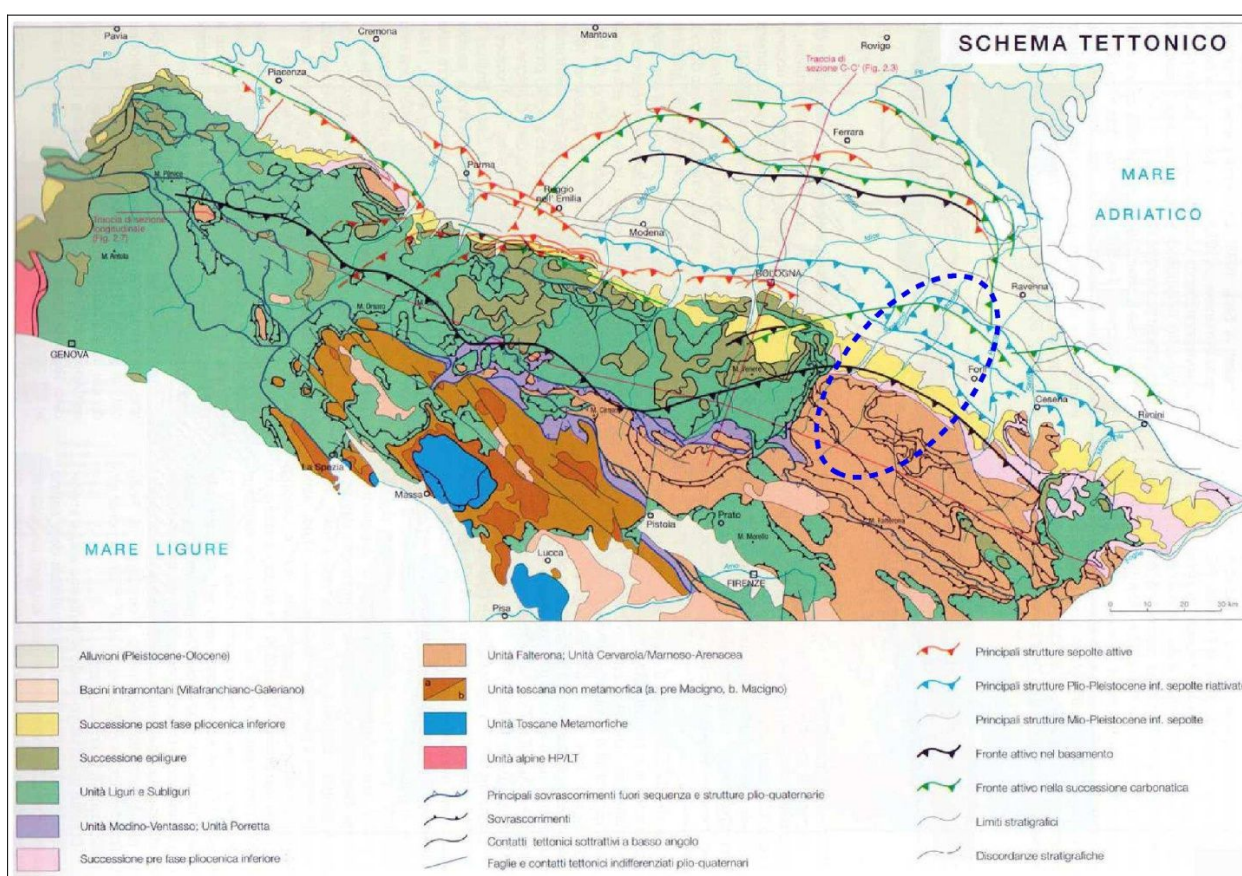


Figura 3.1. Schema tettonico dell'Emilia-Romagna. Il territorio dell'Unione della Romagna Faentina è compreso nel cerchiato blu (Boccaletti et al., 2004).

Nella zona di catena appenninica, affiorano unità che non hanno subito importanti traslazioni e considerate “alloctone”, appartenenti al dominio romagnolo (parte alta della Successione Umbro-Marchigiano-Romagnola ed evaporiti messiniane) e al dominio padano (successione post-evaporitica del margine padano-adriatico). Dal punto di vista strutturale le formazioni rocciose affioranti e subaffioranti immergono con assetto

prevalentemente a monoclinale verso NNE, con strutture principali riconducibili a “thrust” nord/nord-est vergenti (attivi nel Pliocene e nella parte bassa del Pleistocene) e “back-thrust” quaternari con vergenza sud/sud-ovest (Cerrina Feroni et al., 2002, Boccaletti et al., 2004).

Le strutture affioranti “appenniniche”, con direzione parallela all’asse della catena appenninica, si sono formate durante le fasi orogenetiche del Pliocene e del Pleistocene inferiore (Cerrina Feroni et al., 2002). Esse sono particolarmente concentrate nelle evaporiti messiniane, grazie al comportamento duttile del gesso che ha evidentemente assunto la funzione di superficie di deformazione preferenziale. Sono inoltre diffuse le strutture affioranti a direzione “antiappenninica” di età più recente, a componente trascorrente, che interessano tanto i terreni miocenici e pliocenici che quelli pleistocenici. In corrispondenza di queste ultime strutture si sono impostati i principali corsi d’acqua.

La figura 3.2 offre uno schema di profilo trasversale dell’Appennino e del suo margine che interessa il Faentino.

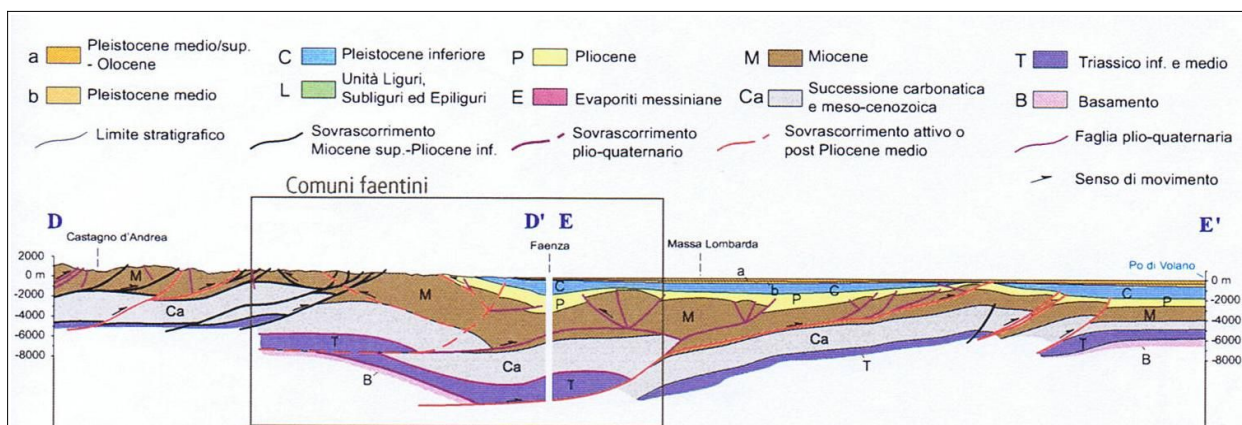


Figura 3.2 - Sezione geologico strutturale dell'area Faentina, attraverso l'Appennino e la Pianura Padana elaborata da Boccaletti et al. (2004).

E' stato ipotizzato che l'ultima fase tettonica di significativa intensità sia cronologicamente collocabile alla fine del Pleistocene medio, intorno a 100.000 anni fa. I primi depositi indeformati e in discordanza su recenti deformati, sono le alluvioni del Subsistema di Villa Verucchio (AES7) del Pleistocene superiore (125-18 ka). Tuttavia non sono state escluse anche deformazioni più recenti.

3.2 Substrato geologico marino e depositi quaternari

Si riportano i principali elementi caratterizzanti delle unità deposizionali (marine e continentali) presenti nel territorio dell'Unione della Romagna Faentina. La base conoscitiva litostratigrafica e strutturale locale è rappresentata dalla Carta Geologica dell'Emilia-Romagna alla scala 1:10.000, consultabile anche on-line nel sito del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna. Un ulteriore riferimento per

questo lavoro, è rappresentato anche dalla Carta geologica d'Italia alla scala 1:50.000 (ISPRA et al. 2009a e 2009b).

Per i depositi alluvionali, si distinguono le unità affioranti e quelle sepolte, a formare i settori di conoide del Lamone e Senio (marginalmente, anche del Santerno), della pianura di interconoide e di quella più esterna.

Occorre anche rammentare che la più recente cartografia geologica regionale e nazionale distingue le coperture alluvionali comprese in AES secondo la convenzionale classificazione stratigrafica sequenziale (cicli deposizionali), comprese nel principale "Supersistema Emiliano-Romagnolo" (Regione Emilia-Romagna, 1998). I depositi alluvionali attribuiti AES sono suddivisi in quattro principali sequenze deposizionali di diverso ordine gerarchico (subsistemi identificati con sigle da AES5 – più antichi - ad AES8 – più recenti).

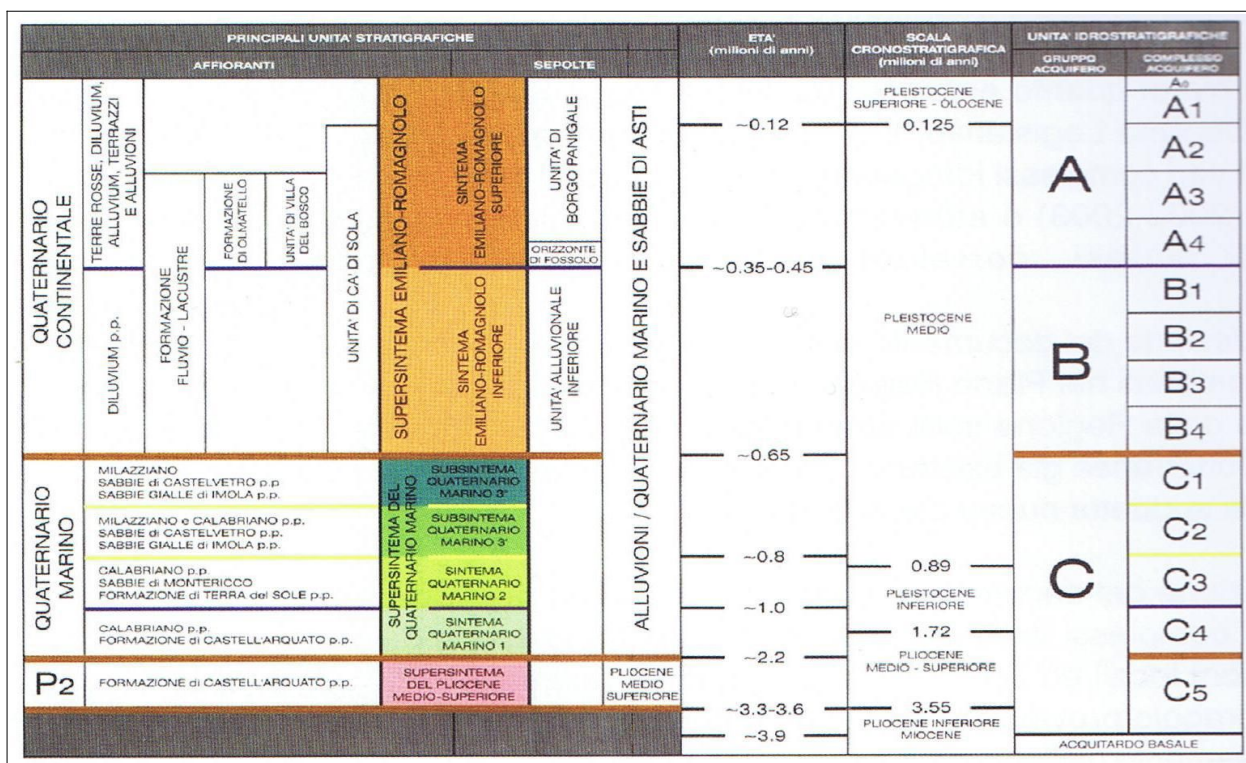


Figura 3.3 - Schema stratigrafico del margine appenninico e della pianura emiliano-romagnola (modif. da Regione Emilia-Romagna, 1998). Sono evidenziati anche i rapporti tra unità deposizionali di pianura e i principali acquiferi.

La figura 3.3 propone lo schema dei rapporti stratigrafici del margine appenninico e della pianura, basata sulla citata classificazione delle unità deposizionali alluvionali e il sottostante substrato geologico marino che costituisce il margine affiorante e sepolto della catena appenninica.

Le unità affioranti nel settore appenninico, come già detto, appartengono alla Successione Umbro-Marchigiano-Romagnola, alla successione evaporitica messiniana e alla Successione post-evaporitica del margine padano-adriatico. L'età delle formazioni affioranti è più giovane procedendo da sud-ovest verso nord-est: dalle unità marine antiche, di età compresa tra il Miocene medio–superiore (Formazione Marnosa-Arenacea) e il Pleistocene medio (Sabbie di Imola), si passa ai depositi alluvionali del Supersistema Emiliano-Romagnolo (Pleistocene medio-Attuale), distribuiti lungo i settori intravallivi, al margine collinare e sbocco delle valli e nell'antistante pianura.

3.3 Successioni marine affioranti

Successione Umbro-Marchigiano-Romagnola

L'unità stratigrafica affiorante più antica è la Formazione Marnoso-Arenacea (FMA) costituita da una successione di torbiditi di avanfossa (Tortoniano) spessa alcune migliaia di metri. Si tratta di alternanze arenaceo-pelitiche con intervalli di marne emipelagiche risedimentate in un bacino di avanfossa attivo tra il Burdigalliano e il Tortoniano, interessato da una forte tettonica sin-sedimentaria, che riceveva materiale da diverse aree sorgente poste al paleomargine alpino e appenninico.

Segue la Formazione di Ghioli di Letto (GHL), unità di ambiente batiale, che segna il passaggio al Messiniano e alla crisi di salinità che interessò l'intera area mediterranea circa 6 milioni di anni fa. Essa è costituita da peliti grigie, brune bituminose e biosiltiti a diatomee, fittamente laminate depositate in ambiente marino soggetto a variazioni di ossigenazione e a fasi di anossia.

Gruppo della Gessoso Solfifera

La successiva crisi di salinità ha portato al depositarsi, in questo comparto dell'Appennino, della Formazione della Vena del Gesso (VGS). Si tratta di banchi di gesso selenitico, e microcristallino, gessoareniti, gessoruditi e subordinati peliti e calcari, depositati in ambiente evaporitico di laguna e di 'sabka' in contesto tettonicamente attivo (come evidenziato dalla presenza di detriti gessosi). Questa unità, spessa sino ad un paio di centinaia di metri, rappresenta un contrafforte morfologico lineare e continuo tra il Torrente Sellustra e il Fiume Lamone lungo oltre 22 km, interrotto per un breve tratto da dislocazioni tettoniche a sud-est di Brisighella.

Successivamente alla crisi di salinità, si sono instaurate condizioni di lago-mare e laguna che hanno portato alla deposizione della Formazione a Colombacci (FCO): una successione spessa la massimo poche decine di metri di prevalenti argille e argille marnose grigio verdi contenenti sottilissime alternanze siltose o sabbiose. In questa zona mancano i livelli a calcari micritici grigio-chiari (colombacci) che danno il nome alla formazione. La formazione è attribuita alla parte terminale del Messiniano (Krijnsman et al., 1999).

Successione post-evaporitica del margine padano-adriatico

Un contatto paraconcordante separa la FCO dalla molto spessa successione argillosa (parecchie centinaia di metri) costituita da unità di piattaforma e scarpata continentale del Pliocene inferiore, le Marne di Cella (CEA), e del Pliocene inferiore-Pleistocene inferiore, le Argille Azzurre (FAA). Per la durata di tutto il Pliocene si mantengono condizioni di sedimentazione bacinale, nel Pliocene medio localmente si instaurano condizioni euxiniche. Con il Pleistocene inferiore si osserva un passaggio ad ambienti litorali. Le CEA sono marne e marne argillose grigio chiaro di ambiente ben ossigenato di piattaforma prossima alla scarpata continentale. Le FAA sono argille e argille marnose grigio-azzurre con rari strati arenacei. L'ambiente di sedimentazione è di scarpata continentale e piattaforma continentale esterna. Le FAA sono affioranti nella zona in esame in forme calanchive.

Le unità marine più alte e più recenti del margine appenninico sono le Sabbie di Imola (IMO), un corpo sabbioso tabulare di poche decine di metri che, per quanto riguarda la zona in esame, affiora sulle colline prossime a Castelbolognese e poggia con contatto discordante ed erosivo sulla FAA (Amorosi et al., 1998a). Le IMO sono cronologicamente attribuibili alla parte inferiore del Pleistocene medio (Ioniano; Amorosi et al., 1998a); sono costituite da sabbie gialle e ghiaie di spiaggia e subordinatamente da peliti di piana alluvionale e laguna.

Le unità marine più alte e più recenti del margine appenninico sono le Sabbie di Imola (IMO). Per quanto riguarda la zona in esame, esse affiorano sulle colline prossime a Castelbolognese e poggiano con contatto discordante ed erosivo sulla FAA (Amorosi et al., 1998a). Le IMO sono cronologicamente attribuibili alla parte inferiore del Pleistocene medio (Ioniano; Amorosi et al., 1998a); sono costituite da sabbie gialle e ghiaie di spiaggia e subordinatamente da peliti di piana alluvionale e laguna.

3.4 Coperture alluvionali quaternarie

La successione marina è troncata al tetto da depositi ghiaiosi e sabbiosi alluvionali del Supersintema Emiliano-Romagnolo (Pleistocene medio – Olocene), corrispondenti al ciclo Qc di Ricci Lucchi et al. (1982; Pleistocene medio-Olocene).

Il Supersintema Emiliano-Romagnolo è un'unità stratigrafica costituita da depositi quaternari continentali affioranti nei settori intravallivi, al margine appenninico padano e in corrispondenza della Pianura Padana. Essi sono correlabili nel sottosuolo della pianura emiliano-romagnola con depositi alluvionali, deltizi, litorali e marini organizzati in successioni cicliche. Il Supersintema Emiliano-Romagnolo comprende un Sintema Emiliano Romagnolo inferiore (AEI, Pleistocene medio) e un Sintema Emiliano Romagnolo superiore (AES). I depositi di AEI sono stati individuati esclusivamente nel sottosuolo della pianura. Nella zona in esame affiorano solo i depositi di AES.

Lo spessore del Sintema Emiliano-Romagnolo superiore varia da poche decine di metri in prossimità del margine appenninico a un massimo di 210 m nel sottosuolo di Borgo Cotignola. Nei settori intravallivi e di margine appenninico, l'unità AES ha uno spessore di alcuni metri ed è costituita da depositi terrazzati di piana alluvionale intravalliva che poggiano in discordanza su depositi marini antichi o su AEI. Si tratta di ghiaie e sabbie di conoide e di canale fluviale e argille, limi di piana inondabile. I lembi di successione affioranti nei tratti intravallivi appartengono a un intervallo temporale molto ampio che si estende dal Pleistocene medio all'Attuale e mostrano una ridotta variabilità litologica e di facies. Si tratta infatti di prevalenti ghiaie di terrazzo alluvionale. Al contrario i depositi in pianura sono attribuibili prevalentemente all'Olocene e presentano maggiore variabilità di facies (di ambiente alluvionale). Si riportano di seguito le facies osservate e la rispettiva distribuzione:

- le *facies ghiaiose* affiorano nei settori più interni (aree di terrazzo fluviale, conoidi alluvionali e allo sbocco delle aste fluviali), mentre sono ben sviluppate nel sottosuolo: organizzate in corpi amalgamati nastriformi e tabulari (riempimenti di canale) oppure in complessi coalescenti (conoide);
- le *facies sabbiose e limose di canale, argine e rotta fluviale* affiorano in terrazzi intravallivi, lungo l'asse delle valli e nel settore di pianura in prossimità dei corsi fluviali;
- i *Limi e le argille di piana inondabile* sono stati riscontrate anche in corrispondenza dei terrazzi fluviali, ma tendono a essere maggiormente sviluppate, in termini di spessore ed estensione areale, nelle zone di pianura nei settori laterali alle aste fluviali.

AES è a sua volta suddivisa in subsintemi: unità di rango inferiore riconosciute in particolare nelle zone intravallive e che sono risultate correlabili su più aste fluviali. Nei settori interfluviali (settori di margine appenninico compresi tra aste fluviali contigue), dove le scarpate di erosione fluviale non sono facilmente riconoscibili, i terreni sono in alcuni casi genericamente attribuiti all'unità AES.

I vari subsintemi presentano una geometria cuneiforme con spessori che variano, come già accennato, da pochi metri nei settori montani a decine di metri verso il limite con la pianura. La base di questi terreni è generalmente inconforme su depositi marini antichi, mentre il limite superiore corrisponde alla superficie topografica.

Nella zona oggetto di studio sono stati distinti i seguenti subsintemi, dal più antico alla più recente età deposizionale (per la descrizione di dettaglio si rimanda alle note illustrative del progetto CARG - Fogli 238-289):

- Subsistema di Liano (AES4). Questa unità, ove affiorante, forma terrazzi con età attribuibile al Pleistocene medio e, per quel che riguarda la zona oggetto di studio, essi sono stati cartografati in destra e sinistra idrografica del Fiume Lamone;
- Subsistema di Torre Stagni (AES5). Questi sedimenti, quando affioranti, costituiscono terrazzi del Pleistocene medio e sono stati identificati lungo gli spartiacque tra il torrente Senio e il Fiume Lamone e tra Lamone e torrente Marzeno;
- Subsistema di Bazzano (AES6). Questa unità costituisce spessori significativi di sedimenti alluvionali terrazzati affioranti (osservati in particolare lungo le valli del Senio e del Lamone) che testimoniano una fase di aggradazione fluviale prolungata correlabile a un episodio trasgressivo presumibilmente riferibile al Tirreniano (parte alta del Pleistocene medio). Nella zona oggetto di studio, AES6 affiora allo sbocco delle valli del Senio e del Lamone, mentre in pianura non è affiorante perché è erosa o sepolta dal successivo Subsistema di Villa Verucchio;
- Subsistema di Villa Verucchio (AES7). Questi terreni affiorano a quote topografiche relativamente modeste sotto forma di terrazzi intravallivi e allo sbocco delle valli. Il centro dell'abitato di Casola Valsenio, ad esempio, è impostato su un largo terrazzo attribuibile a tale subsistema. Nel tratto della valle del Senio compreso tra Borgo Rivola e Cuffiano, il terrazzo AES7 è ben sviluppato sulla destra idrografica del torrente e si estende anche lungo la valle del Sintria. Da Brisighella fino a Faenza, AES7 è continuo su entrambi i fianchi della valle del Lamone. L'età di tale subsistema è stata attribuita al Pleistocene superiore;
- Subsistema di Ravenna (AES8). Questo subsistema rappresenta l'elemento sommitale di AES. Il tetto di tale unità coincide in parte con la superficie topografica e, in alcune zone, con la base di una unità di rango inferiore denominata Unità di Modena (AES8a). AES8 affiora in fasce strette prossime alle aste fluviali intravallive e su aree progressivamente più ampie allo sbocco delle valli verso la pianura. Ad esso è stata attribuita un'età compresa tra il Pleistocene superiore e l'Attuale;
- Unità di Modena (AES8a). Si tratta di terreni che poggiano con una superficie inconforme sulla AES8, formati da sedimenti alluvionali molto recenti di epoca post-romana caratterizzati da morfologie deposizionali originarie (IV-VI sec. d.C.- Attuale). La deposizione di AES8a segna l'instaurarsi di una fase di deterioramento climatico avvenuta tra il IV-VI sec. d.C. che ha portato l'alluvionamento di gran parte della pianura (Veggiani, 1994). AES8a affiora solo nei settori corrispondenti agli assi degli attuali canali.

3.5 Aspetti geomorfologici

Per quanto riguarda gli aspetti più propriamente geomorfologici, lo studio di microzonazione sismica si è riferito alle analisi territoriali riportate nel Quadro Conoscitivo

del PSC dei Comuni dell'Unione della Romagna Faentina. La figura 3.4 propone la cartografia geomorfologica di sintesi del territorio dell'Unione (S. Marabini & A. Poggiali, 2009).

Si rammenta che per le aree di pendio della porzione montana, collinare e per il settore di fondovalle, la cartografia è essenzialmente derivata dalla Cartografia Geologica in formato digitale, fornita dal SGSS della Regione Emilia Romagna. Per l'area di pianura, invece, la carta geomorfologica elaborata per il PSC è stata originalmente costruita sulla base di un microrilievo della superficie naturale prodotto tramite informatizzazione di migliaia di punti quotati selezionati sulla Cartografia CTR. In tal modo, sono state distinte originalmente le principali unità morfologiche alluvionali, quali paleodossi, dossi attuali, aree di interdosso, etc. In sintesi, la carta geomorfologica di sintesi del territorio dell'Unione riporta i seguenti elementi geomorfologici principali:

- frane attive → depositi gravitativi con evidenze di movimenti in atto o recenti, costituiti da litotipi eterogenei, raramente monogenici, ed eterometrici, più o meno caotici (la tessitura dei depositi è condizionata dalla litologia del substrato e dal tipo di movimento prevalente). La maggior parte di questi è di tipo complesso ed è il risultato di più tipi di movimento sovrapposti nello spazio e nel tempo (tipicamente scorrimenti/colamenti). La tessitura prevalente risulta costituita da clasti di dimensioni variabili immersi in una abbondante matrice pelitica e/o sabbiosa;
- frane quiescenti o stabilizzate: depositi gravitativi senza evidenze di movimenti in atto o recenti, ma in condizioni di possibile riattivazione (quiescenti), oppure in situazioni in cui le potenziali cause di innesco o di riattivazione si sono esaurite a causa del modellamento morfologico (stabilizzate – es. paleofrane);
- depositi di versante, comprendenti:
 - *deposito di versante s.l.* → costituiti da litotipi eterogenei ed eterometrici più o meno caotici. Frequentemente l'accumulo si presenta con una tessitura costituita da clasti di dimensioni variabili immersi e sostenuti da una matrice pelitica e/o sabbiosa (che può essere alterata per ossidazione e pedogenesi), a luoghi stratificato e/o cementato. La genesi può essere dubitativamente gravitativa, da ruscellamento superficiale e/o da soliflusso;
 - *deposito eluvio-colluviale* → coltre di materiale detritico, generalmente fine (sabbie, limi e peliti) prodotto da alterazione "in situ" o selezionato dall'azione mista delle acque di ruscellamento e della gravità, con a luoghi clasti a spigoli vivi o leggermente arrotondati;
 - *detrito di falda* → accumulo detritico costituito da materiale eterogeneo ed eterometrico, generalmente a quote elevate o molto elevate, con frammenti litoidi di dimensioni variabili tra qualche cm³ e decine di m³, privo di matrice o in matrice

sabbioso-pelitica alterata e pedogenizzata, di origine gravitativa frequentemente alla base di scarpate e lungo i versanti più acclivi;

- depositi di conoide intravallive → costituite da depositi alluvionali, da ghiaiosi a fini, a forma di ventaglio aperto verso valle, in corrispondenza dello sbocco di valli e vallecole trasversali ai corsi d'acqua principali ove la diminuzione di pendenza provoca la sedimentazione del materiale trasportato dall'acqua. Essi sono soggetti ad evoluzione dovuta alla dinamica torrentizia o attualmente non soggetti ad evoluzione;

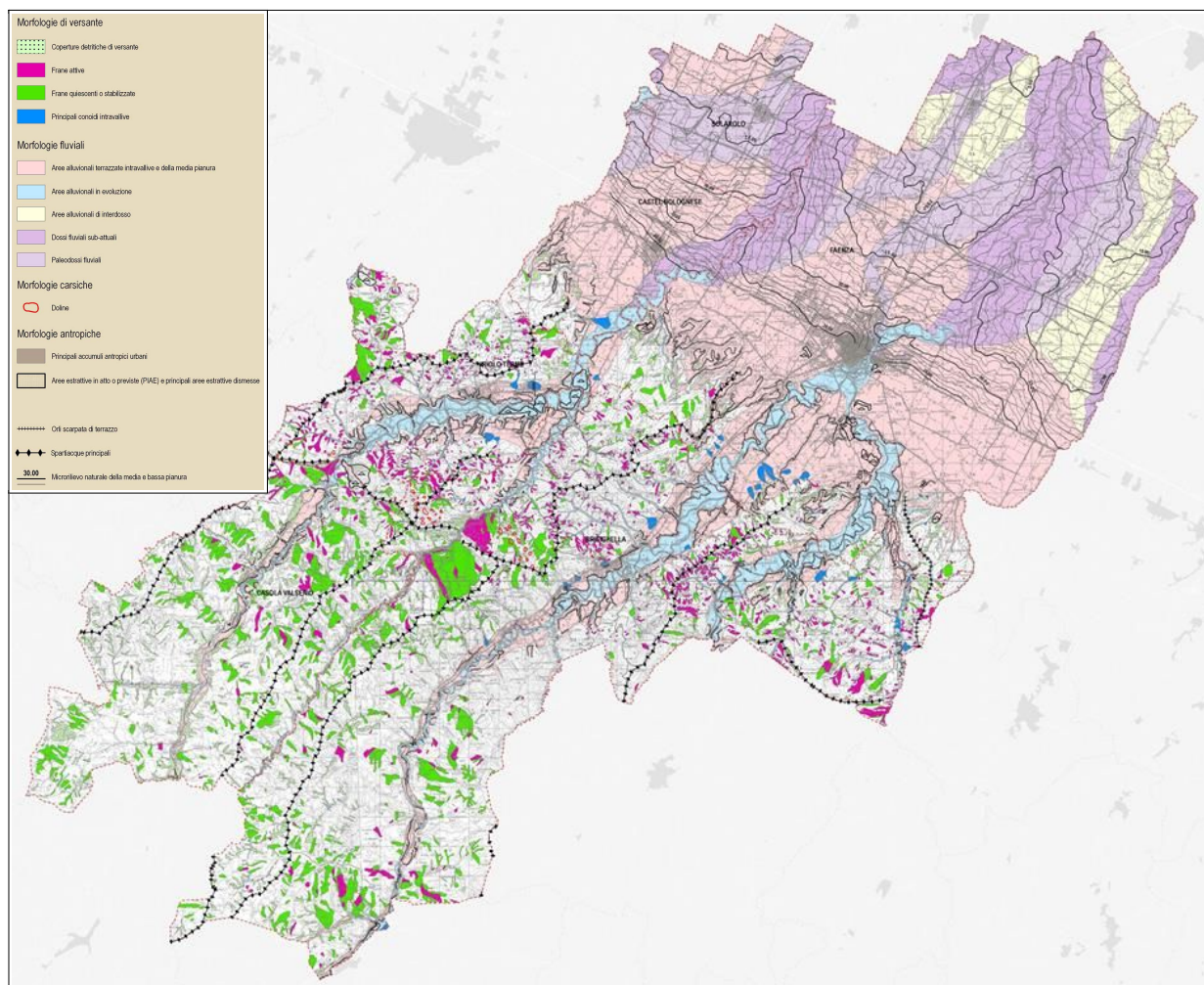


Figura 3.4 – Stralcio della Carta Geomorfologica alla scala 1:50.000 (da: Quadro Conoscitivo PSC Unione della Romagna Faentina, 2009).

- doline → depressioni morfologiche di aspetto imbutiforme, prodotte dalla dissoluzione della roccia solubile ad opera delle acque di precipitazione meteorica;
- morfologie fluviali così distinte:
le piane più o meno attive di fondo valle prossime agli alvei, costituite dai depositi in evoluzione e dalle superfici idrogeologicamente connesse con l'alveo stesso (aree golenali ed ex-golenali);

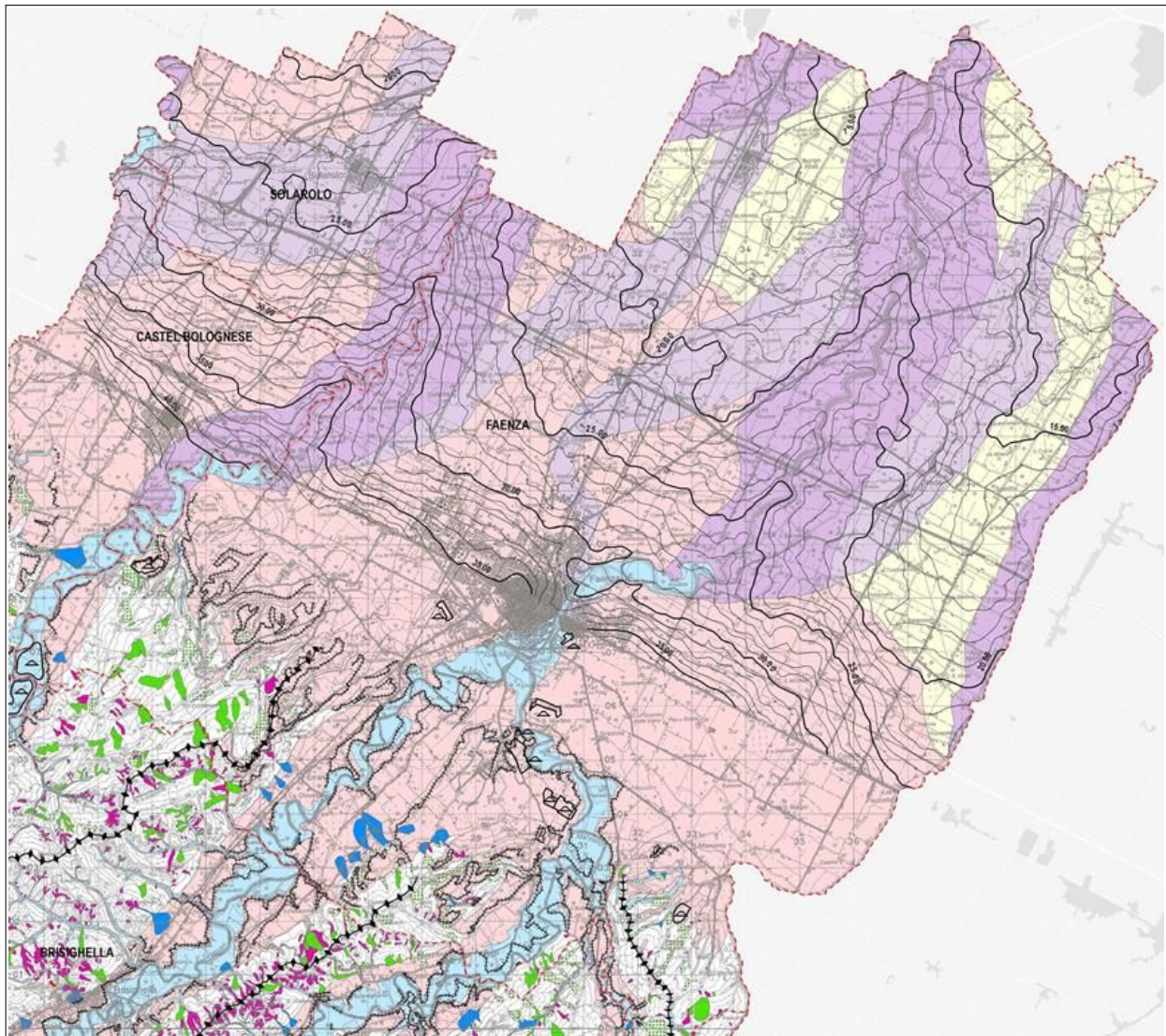


Figura 3.5 – Stralcio di maggior dettaglio della Carta Geomorfologica alla scala 1:50.000: territorio comunale di Castel Bolognese, Faenza e Solarolo, (da Quadro Conoscitivo PSC Unione della Romagna Faentina, 2009).

- le superfici alluvionali terrazzate del settore vallivo, dell'alta pianura e di un ambito della media pianura, cartografate con la medesima campitura in quanto accomunate dal fatto di essere costituite da depositi non attivi;
le unità morfostratigrafiche recenti della bassa pianura, la cui morfologia è evidenziata dal loro microrilievo naturale, le quali sono state distinte in "paleodossi fluviali" (ovvero argini naturali di tracciati fluviali estinti), "dossi fluviali attuali" (ovvero argini naturali costruiti dai corsi d'acqua attuali prima della loro arginatura artificiale (a partire dal XVIII secolo) e "aree di interdosso".

La figura 3.5 riporta uno stralcio di maggior dettaglio della carta geomorfologica per quanto riguarda il territorio comunale di Castel Bolognese, Faenza e Solarolo.

4 DATI GEOTECNICI E GEOFISICI

4.1 Le indagini di repertorio

Il presente lavoro è supportato dai risultati delle indagini geognostiche e geofisiche in situ, sia pregresse che di nuova realizzazione. Occorre precisare che le indagini geognostiche e geofisiche raccolte e realizzate a supporto dello studio di livello 2 risultano già archiviate nella banca dati geografica informatizzata secondo gli standard indicati dalla CTMS. Risultano già raccolte e sistematizzate, nelle suddette banche dati, un repertorio di indagini messi a disposizione dal SGSS della Regione Emilia-Romagna e dagli uffici tecnici comunali e dell'Unione.

In tabella 4.1 sono riportati i numeri, distinti per tipologia, relativi a tutte le indagini geognostiche e geofisiche (pregresse e HVSR di nuova realizzazione) archiviate per ciascun Comune (MS livello 2).

Nelle quattro banche dati sono presenti esclusivamente indagini che ricadono all'interno del territorio di ciascun comune e non sono stati inseriti dati di aree limitrofe comunque tenuti in considerazione dal presente studio.

	Brisighella	Casola Valsenio	Castel Bolognese	Riolo Terme	Totale
CPT	14	18	25	11	68
CPTE	-	-	4	-	4
CPTU	-	-	5	-	5
PENETROMETRIE DINAMICHE	12	14	81	61	168
POZZI PER ACQUA	-	-	77		77
SONDAGGI A CAROTAGGIO CONTINUO	5	-	3	13	21
SONDAGGI A DISTRUZIONE	-	1	13	12	26
Trincea o pozzetto esplorativo	4	5	-	1	10
MASW	4	2	3	6	15
HVSR	20	10	8	13	51
Totale	59	50	219	117	445

Tabella 4.1 – Totale delle indagini archiviate nella banca dati prodotta per il prededente studio della MS di livello 2, distinte per tipologia, raccolte e utilizzate per il presente studio.

Disporre di un archivio informatizzato presenta innumerevoli vantaggi rispetto alla semplice catalogazione cartacea, tra questi la rapida accessibilità, il confronto immediato dei dati inseriti e la possibilità di un continuo aggiornamento. Inoltre la struttura della banca dati consente di associare al dato geografico (punto di indagine) e a quello iconografico (rapporto di prova in pdf), degli attributi alfanumerici (alcuni inseriti anche con giudizio esperto) che permettono di accedere interattivamente ai dati sintetici più importanti (profondità raggiunta, livello della falda misurato, quota del tetto delle ghiaie e del primo orizzonte sabbioso, presenza o meno di uno spessore significativo di terreni compressibili

ecc.). La presenza di tali campi informativi ha permesso di realizzare delle carte tematiche di lavoro: specifiche ed efficaci rappresentazioni di sintesi che hanno consentito di ottenere un quadro immediato delle caratteristiche dei terreni studiati, alle diverse scale.

Relativamente alla qualità dei dati, è chiaramente emerso che, data l'eterogeneità degli archivi, non sempre indagini della stessa tipologia possono essere ritenute allo stesso modo attendibili. Per quanto possibile è stata quindi fatta una prima valutazione speditiva sull'affidabilità dei dati raccolti, tenendone opportunamente conto in sede di elaborazione e di studio. Alcune di queste valutazioni sono richiamate nei successivi capitoli.

Dall'analisi della distribuzione delle verticali delle numerose indagini geognostiche pregresse e dei dati ad esse associati, si è potuto però osservare che porzioni del territorio dell'Unione non presentano una adeguata copertura di indagini per numero e qualità del dato. Nelle aree collinari e montane dell'Unione in particolare sono infatti assai diffuse prove penetrometriche dinamiche leggere, i cui risultati sono spesso poco utili per gli scopi del presente lavoro per cui forniscono solo indicazioni parziali e spesso assai dubbie.

Anche per questa ragione, l'attuale lavoro ha consentito prima di tutto di recuperare e archiviare ulteriori indagini geognostiche (penetrometrie CPT e DPSH; sondaggi a carotaggio continuo; ecc.), messe a disposizione dagli Scriventi e in particolare dal geol. Marabini e dal geol. Righini). Nella tabella 4.2 sono riportati i numeri e le tipologie delle indagini acquisite per questo studio (comprese anche quelle di nuova esecuzione) e archiviate per ciascun Comune, per un totale di 438 prove integrative.

	Brisighella		Casola Valsenio		Castel Bolognese		Riolo Terme		Totale
CPT	22	2	21	...	16	...	33	...	94
CPTU	...	...	...	...	...	5	...	...	5
PENETROMETRIE DINAMICHE	46	9	23	5	4	...	42	5	134
SONDAGGI A CAROTAGGIO CONTINUO	50	1	22	2	...	1	4	1	81
Trincea o pozzetto esplorativo	14	...	4	...	...	...	...	...	18
Tomografie elettriche	...	...	...	6	...	...	2	...	8
MASW	...	4	5	2	1	2	3	2	19
HVSR	1	13	3	9	2	17	4	10	59
ESAC-SPAC	...	...	...	...	...	1	...	...	1
Sismica a rifrazione	...	3	2	3	...	...	...	2	10
Coni Sismici	...	...	...	...	...	2	...	...	2
DOWN-HOLE	...	2	1	2	...	1	...	1	7
Totale	133	34	81	29	23	29	88	21	438

Tabella 4.2 – Totale delle indagini integrative (di repertorio – in nero – e di nuova esecuzione – in blu) archiviate nella banca dati per gli approfondimenti della MS di livello 3, distinte per tipologia, raccolte e utilizzate per il presente studio.

Per quanto riguarda le indagini geofisiche volte a misurare direttamente la velocità delle onde di taglio nei primi 30 metri (Vs30), sono risultate disponibili quasi solo indagini

MASW eseguite all'epoca dello studio di microzonazione del 2009, che restituiscono valori di VS che, come vedremo in seguito, appaiono verosimilmente sovrastimate, anche sulla base di esperienze in contesti simili in aree diverse.

Al fine di integrare i dati geognostici e geofisici disponibili e provare quindi a fare fronte alle criticità evidenziate, l'adeguamento dello studio di MS di livello 2 (geol. G. Tarabusi, 2014) ha consentito di realizzare una campagna di 42 misure di rumore ambientale (microtremore) a stazione singola distribuite nei quattro comuni. Per gli approfondimenti di livello 3, come vedremo, sono state inoltre raccolte e/o eseguite ulteriori 59 registrazioni HVSR. Tutti i rapporti di prova di tali indagini di nuova realizzazione sono raccolti nell'allegato 2.

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

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

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

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

Per le registrazioni sono stati usati tromografi digitali TROMINO. L'acquisizione dei dati è stata effettuata con frequenza di campionamento di 128 Hz con un tempo di singola registrazione pari a 14 minuti, comunque sufficienti per indagare le frequenze di interesse del presente studio secondo quanto previsto dai criteri Sesame (AA.VV., 2005).

4.2 La banca dati delle indagini

La banca dati delle indagini è stata realizzata, per ciascun comune, in formato geodatabase, secondo le specifiche previste dagli Standard MS 3.0 (Commissione tecnica per la microzonazione sismica, 2013). La figura 4.1 ne schematizza la struttura.

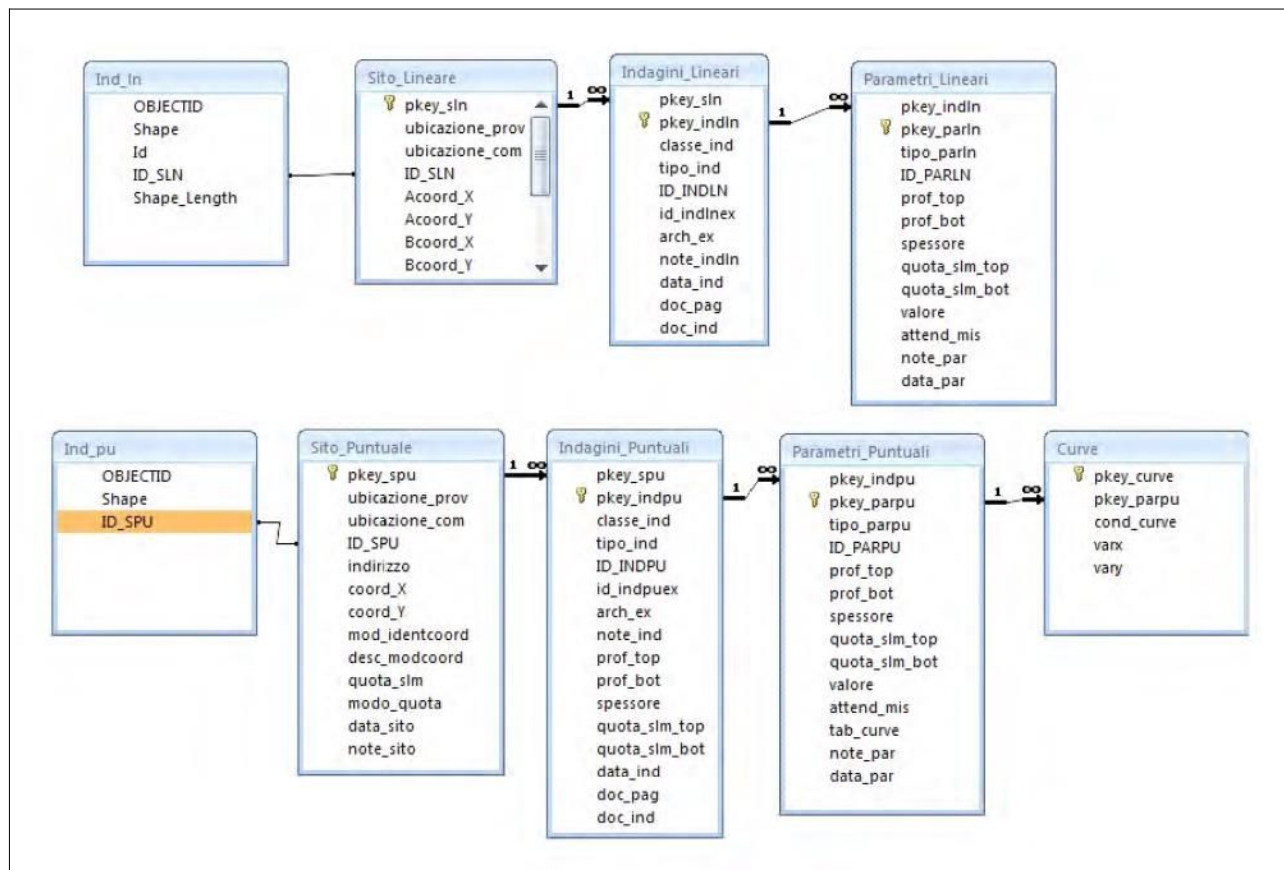


Figura 4.1 – Struttura della banca dati delle indagini che evidenzia le relazioni tra gli archivi geografici puntuali (Ind_pu) e lineari (Ind_In) e le tabelle che archiviano i dati alfanumerici legati a siti, indagini e parametri delle indagini.

4.3 Le indagini eseguite per gli approfondimenti di livello 3

4.3.1 Indagini geognostiche e geofisiche

Per i Comuni situati nel contesto montano/collinare (Brisighella; Casola Valsenio; Riolo Terme), un numero consistente di indagini sono state realizzate in settori di territorio urbanizzato ancora ritenuti carenti di informazioni sismostratigrafiche essenziali (spessori delle coperture; Vs equivalenti; ecc.).

Per quanto riguarda Brisighella, le **prove penetrometriche dinamiche superpesanti DPSH** e le **penetrometrie meccaniche statiche CPT** eseguite per questo studio (con **registrazioni HVSR** spesso accoppiate ad esse), sono state prevalentemente realizzate nelle frazioni (foto 4.1). Presso S. Martino in Gattara, S. Cassiano, La strada e Fognano sono stati destinati anche gli ulteriori quattro **stendimenti sismici MASW**, realizzati con

strumentazione in dotazione al Raggruppamento (sismografo digitale a 24 bit ABEM RAS-24, con configurazione a 24 geofoni verticali e frequenza propria pari a 4,5 Hz).

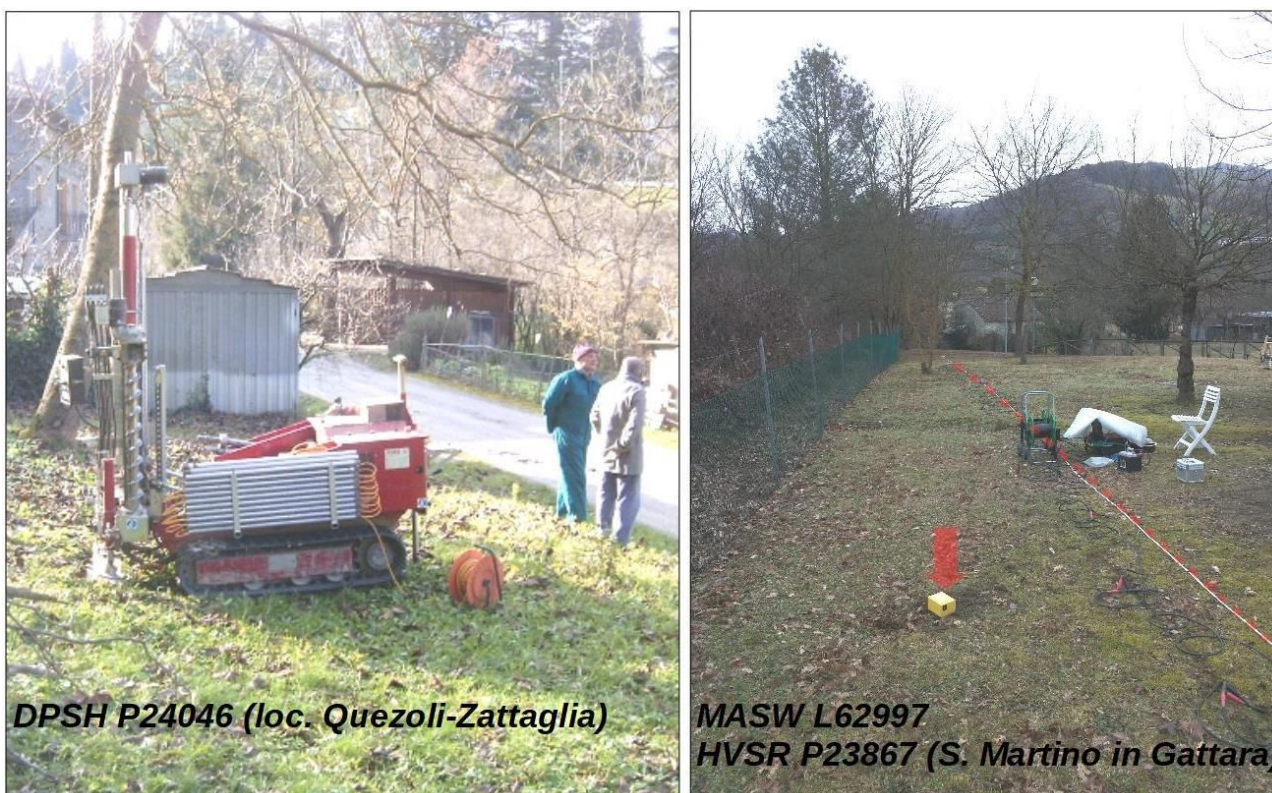


Foto 4.1 – Alcune indagini integrative effettuate nelle frazioni di Brisighella

I sondaggi di repertorio, eseguiti nel centro di Brisighella e recuperati per questo studio (figura 4.2), hanno evidenziato come il nucleo storico del capoluogo risulti insediato su una conoide di detriti di falda e di depositi colluviali, con spessori anche superiori a 20 metri. L'assenza di dati sismostratigrafici diretti ha dunque fortemente raccomandato l'esecuzione ulteriori indagini in questo settore caratterizzato, tra l'altro, da un'edificazione vetusta e molto vulnerabile in caso di evento sismico.

Nel centro storico di Brisighella e in particolare nell'area cortiliza del “Palazzo Lega” è stato dunque eseguito un ulteriore **sondaggio a carotaggio continuo** spinto fino a -30 metri di profondità. Questa nuova terebrazione ha consentito il **prelievo di campioni “indisturbati”**, che sono stati sottoposti ad analisi di **classificazione geotecnica** e a specifiche prove dinamiche (**prove di “colonna risonante”**) effettuate nei laboratori ISMGEO. Nel sondaggio, come vedremo, è stata realizzata un'ulteriore prova sismica in foro, tipo **“Down-Hole”**, per la determinazione delle velocità di propagazione delle onde sismiche (V_p e V_s) nei sedimenti attraversati (foto 4.2). Un'ulteriore prova “Down-Hole” è stata eseguita nella periferia NE del Capoluogo, nel sondaggio a carotaggio continuo già realizzato a cura del geol. S. Marabini, a supporto delle analisi geologiche per la costruzione del supermercato di via Bacello. Quest'ultima terebrazione, approfondita fino a

30 metri, ha investigato anche il substrato pliocenico delle Argille Azzurre (FAA) e risultava già predisposta per l'esecuzione di prove D-H.

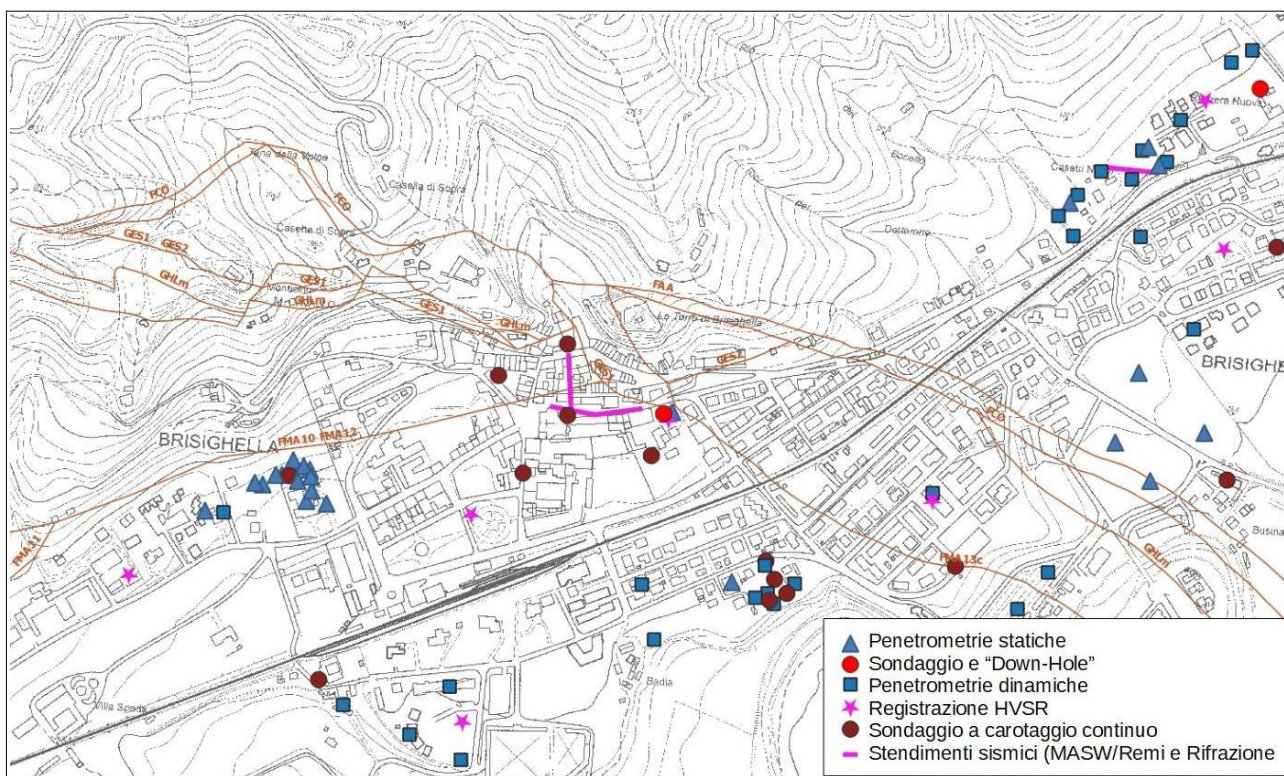


Figura 4.2 – Localizzazione delle indagini geognostiche/geofisiche (di repertorio e di nuova esecuzione) disponibili per l'insediato storico di Brisighella



Foto 4.2 – Esecuzione delle prove sismiche in foro "Down-Hole" nel Capoluogo.

Nel centro storico di Brisighella si sono eseguiti anche due **stendimenti sismici a rifrazione** con strumentazione di acquisizione dati a 24 canali (figura 4.3 e foto 4.3). Le interdistanze variabili tra i geofoni (tra 5 m e 3 m) hanno permesso di ampliare gli stendimenti rispettivamente fino a 118,5 metri (eseguito lungo via Fossa) e fino a 72 metri (lungo via Recuperati) al fine ricavare la migliore ricostruzione tridimensionale dei depositi

di conoide e del substrato roccioso sepolto. Un'ulteriore stendimento è stato eseguito nella frazione Fognano: la prova ha permesso di verificare la continuità degli spessori dei depositi alluvionali terrazzati del F. Lamone in senso trasversale al corso d'acqua stesso.

Il sondaggio è stato eseguito dalla società SOGEO di Lugo, mentre le prove D-H e gli stendimenti a rifrazione sono stati eseguiti dalla società Elletipi S.r.l. di Ferrara.



Figura 4.3 – Localizzazione degli stendimenti sismici a rifrazione realizzati nel Capoluogo (foto aerea: “Google Earth”)



Rifrazione L63001 (Capoluogo, via Fossa)

Rifrazione L63002 (Capoluogo, via Recuperati)

Foto 4.3 – Esecuzione degli stendimenti sismici a rifrazione nel Capoluogo.

4.3.2 Indagini di laboratorio

Il sondaggio eseguito nel Capoluogo, presso Palazzo Lega, ha consentito di prelevare quattro campioni indisturbati sui quali sono state eseguite **prove di classificazione getecnica** (contenuto d'acqua; peso di volume; limite liquido e plastico; fuso granulometrico completo). Sono state inoltre eseguite due **prove di taglio diretto** (con determinazione delle resistenze massime e residue) e **due prove triassiali CIU** (consolidata e con fase di taglio non drenata).

È stata inoltre eseguita una **prova dinamica di colonna risonante (RC)** al fine di determinare il modulo di taglio G e lo smorzamento dei terreni al variare delle deformazioni

di taglio imposte. Questa prova è largamente impiegata in tutti i casi in cui i terreni sono sottoposti a sollecitazioni dinamiche (sisma), per le analisi di deformazione dei terreni e di propagazione delle onde. Sono prove particolarmente utili per le analisi numeriche di risposta sismica locale.

Tutte le prove di laboratorio sono state effettuate dalla società ISMGEO di Seriate.

5 MODELLO DEL SOTTOSUOLO

Lo studio di MS di livello 2 (G. Tarabusi, 2015) ha consentito la ricostruzione dei modelli geologici di sottosuolo rappresentativi delle parti di territorio comunale studiato, analizzando i dati di tutte le indagini di repertorio disponibili e i successivi dati ricavati dalle misure di microtremore a stazione singola (HVSR) realizzate per tale lavoro. Per la definizione delle litologie superficiali in ambiti collinari o montani, in cui i dati geognostici risultano in genere piuttosto scarsi ci si è basato su quanto indicato nella Carta Geologica dell'Emilia-Romagna alla scala 1:10.000, in particolare per la redazione della carta geologico-tecnica (paragrafo 7.2). Tuttavia, le ulteriori indagini di repertorio raccolte e le nuove indagini eseguite per questi approfondimenti hanno consentito una ricostruzione delle caratteristiche sismostratigrafiche da ritenersi piuttosto attendibile sia per quanto riguarda le coperture, sia per il sottostante substrato geologico.

In generale la litostratigrafia del sottosuolo desunta dalle indagini conferma l'assetto descritto nell'inquadramento, riportato nel capitolo 3. La carta geologico tecnica (tavola 2 e paragrafo 8.2), riporta le litologie superficiali prevalenti (primi 5-6 metri) e la carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (tavola 4 e paragrafo 8.4), presenta la suddivisione del territorio comunale studiato sulla base delle caratteristiche della successione litostratigrafica nei primi 30 metri circa in collina e montagna e fino ad oltre 100 metri in pianura, schematizzando le conoscenze litostratigrafiche degli ambiti di studio. In sintesi, per il territorio di Brisighella, gli areali studiati sono caratterizzati dalla presenza in superficie di:

- affioramenti di substrato più o meno alterato e costituiti dalla Formazione Marnoso Arenacea (FMA), dalla Formazione della Vena del Gesso (GES) e dalla Formazione delle Argille Azzurre (FAA);
- depositi di ghiaie e sabbie lungo i corsi fluviali principali (ambiente deposizionale di canale fluviale);
- depositi eluvio-colluviali lungo i versanti e di falda detritica o conoide detritica ai piedi degli stessi;

Per quanto riguarda il Capoluogo, i dati geologici e geofisici a disposizione hanno consentito di ricostruire con buona accuratezza gli spessori e più complessivamente le caratteristiche sismostratigrafiche dei depositi di colluviali e di conoide detritica sui quali si insedia il nucleo storico di Brisighella.

Per questo lavoro sono state pertanto elaborate ben cinque nuove sezioni geologiche³ (figura 5.1) sviluppate dal versante sovrastante l'abitato fino al fondovalle. Tre sezioni (3-4-5) interessano il centro storico, e sono state elaborate con particolare attenzione ai fini della ricostruzione della citata conoide detritica (figure 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5).

³ Lo studio di MS di livello 2 riportava due sezioni geologiche di repertorio (sezioni 1-2)

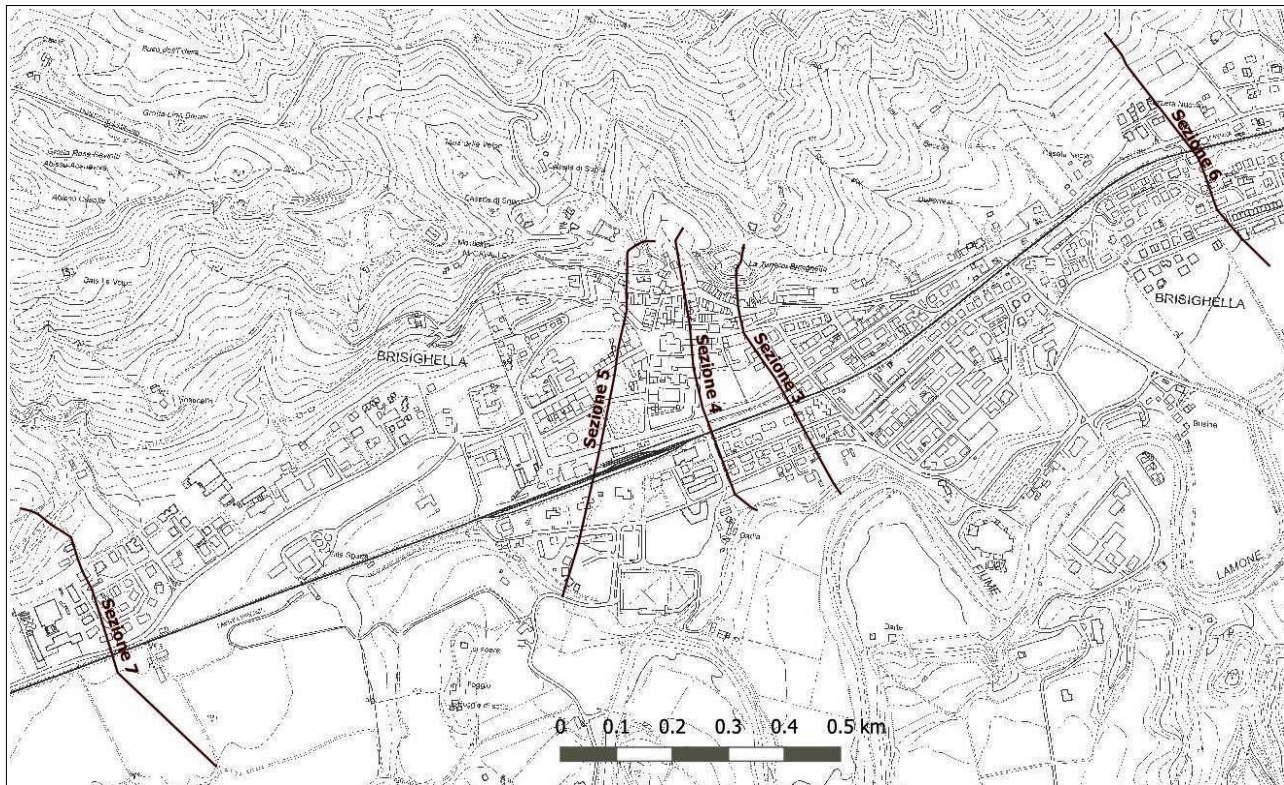


Figura 5.1 – Tracce delle nuove sezioni geologiche elaborate per questo studio

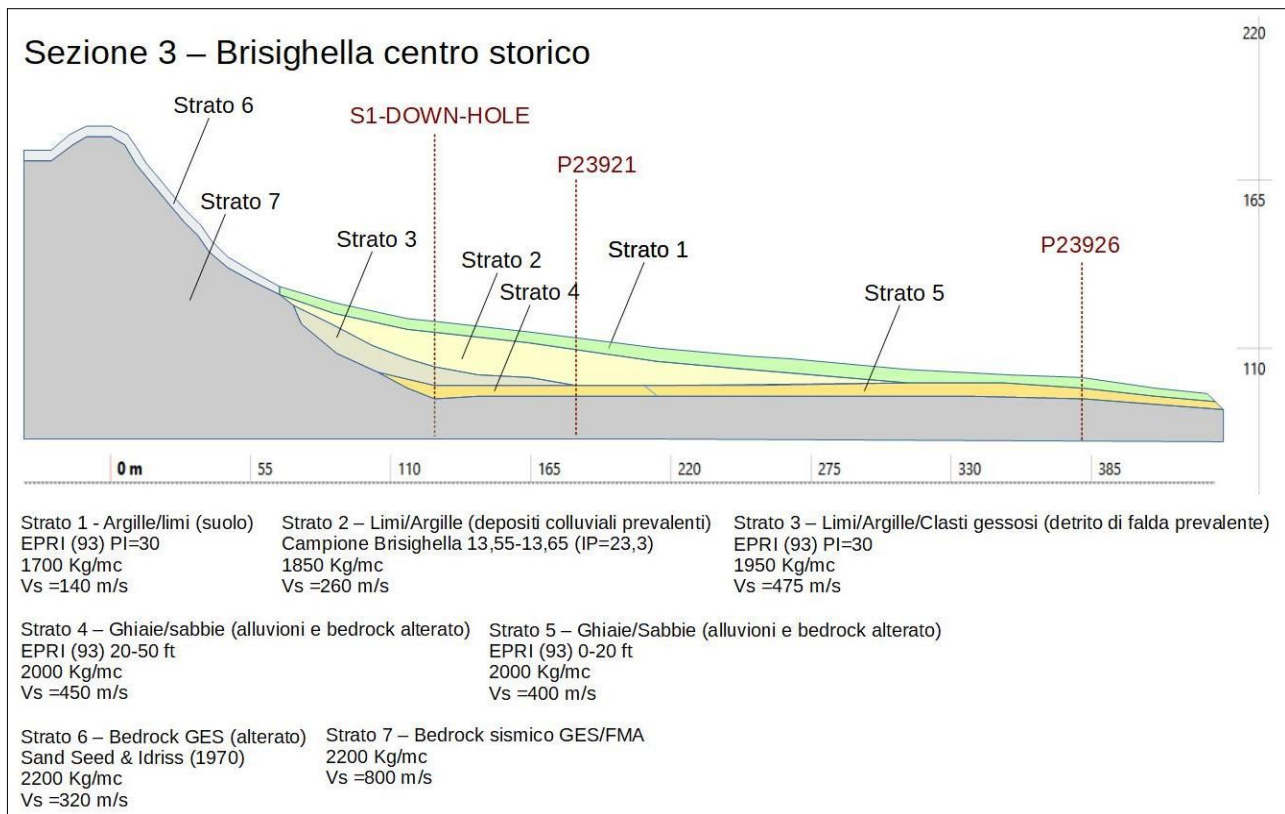


Figura 5.2 – Sezione 3 (Capoluogo – Centro storico)

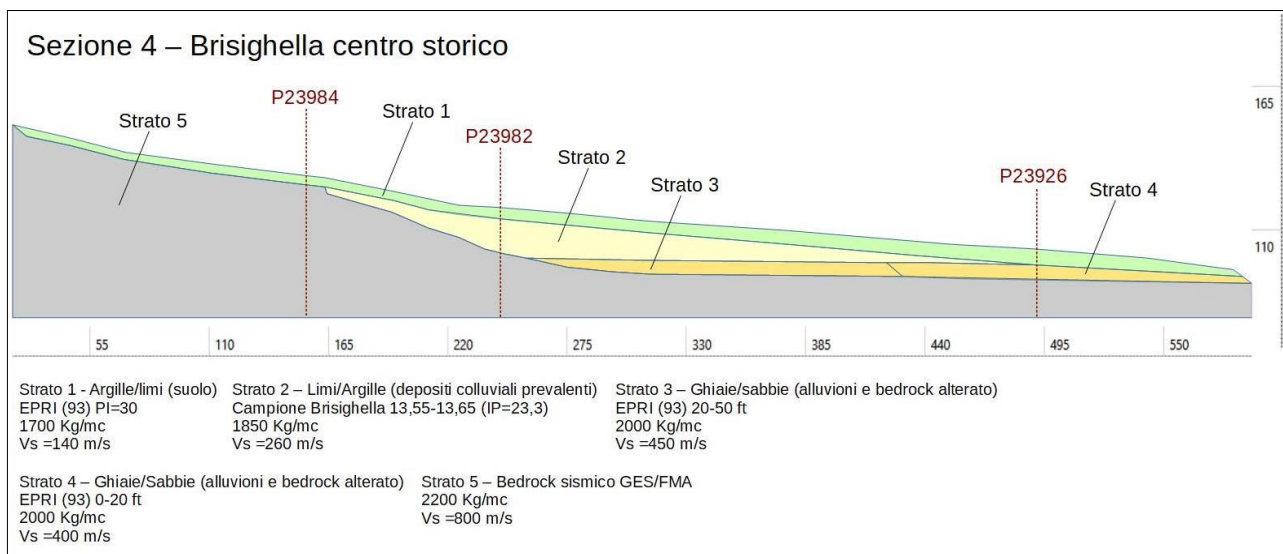


Figura 5.3 – Sezione 4 (Capoluogo – Centro storico)

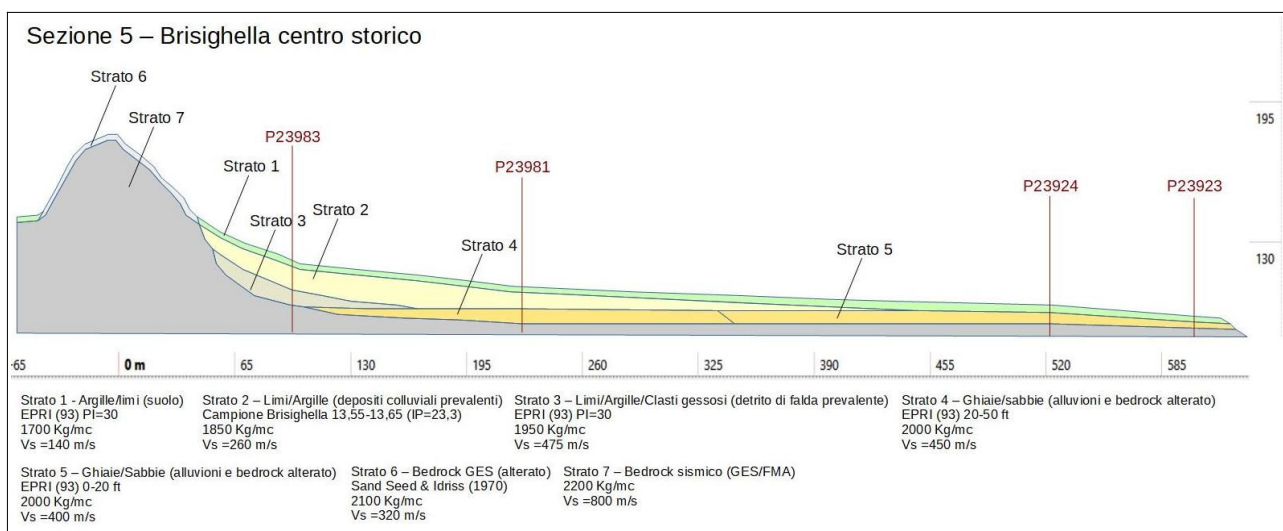


Figura 5.4 – Sezione 5 (Capoluogo – Centro storico)

I dati stratigrafici direttamente desunti dai sondaggi a carotaggio continuo disponibili per il centro storico di Brisighella evidenziano spessori dei depositi colluviali e di conoide detrica certamente significativi (anche oltre 20 metri). Più nel dettaglio, le tessiture risultano prevalentemente fini (limi argillosi con presenza di clasti gessosi molto alterati).

Il sondaggio effettuato nell'area cortiliva del Palazzo Lega ha intercettato il bedrock alterato (FMA) a circa 25 metri, mentre la prova “Down-Hole” (P24062) eseguita nel foro ha consentito di definire le caratteristiche di rigidità dei depositi attraversati fino a circa 30 metri. La figura 5.5 riporta gli esiti di Vp e Vs misurati con la D-H P24062 e lo schema sismostratigrafico desunto. La ricostruzione sismostratigrafica della conoide detritica è stata tuttavia supportata anche dagli esiti delle tomografie a rifrazione realizzate nel centro storico, con risultati che evidenziano il rapido incremento dello spessore dei depositi colluviali/detritici sovrastanti il substrato roccioso (FMA) sismicamente “rigido” (figura 5.6).

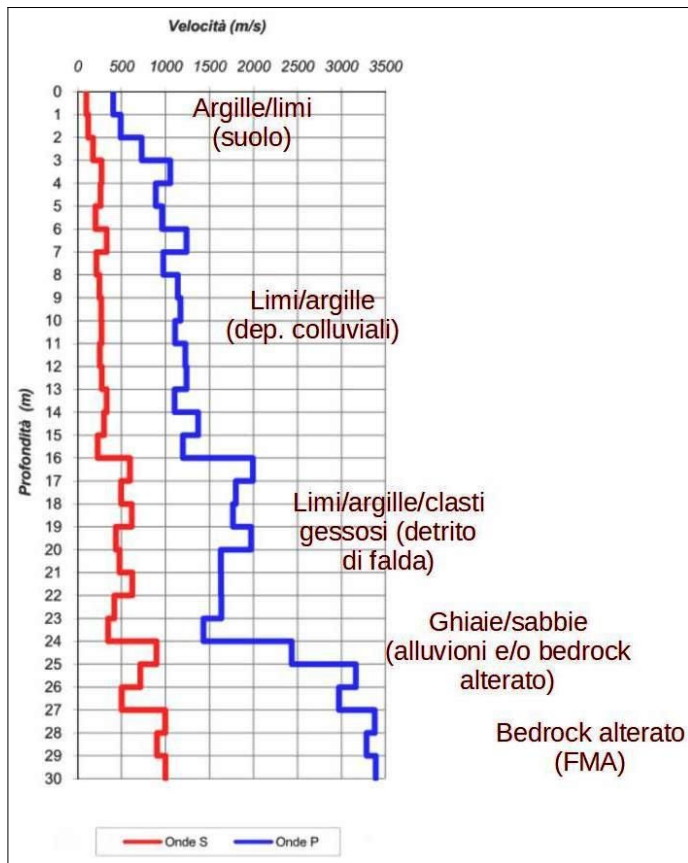


Figura 5.5 – Profili di Vs e Vp ottenuti dalla prova “Down-Hole” nel sondaggio eseguito nel centro storico di Brisighella (Palazzo Lega)

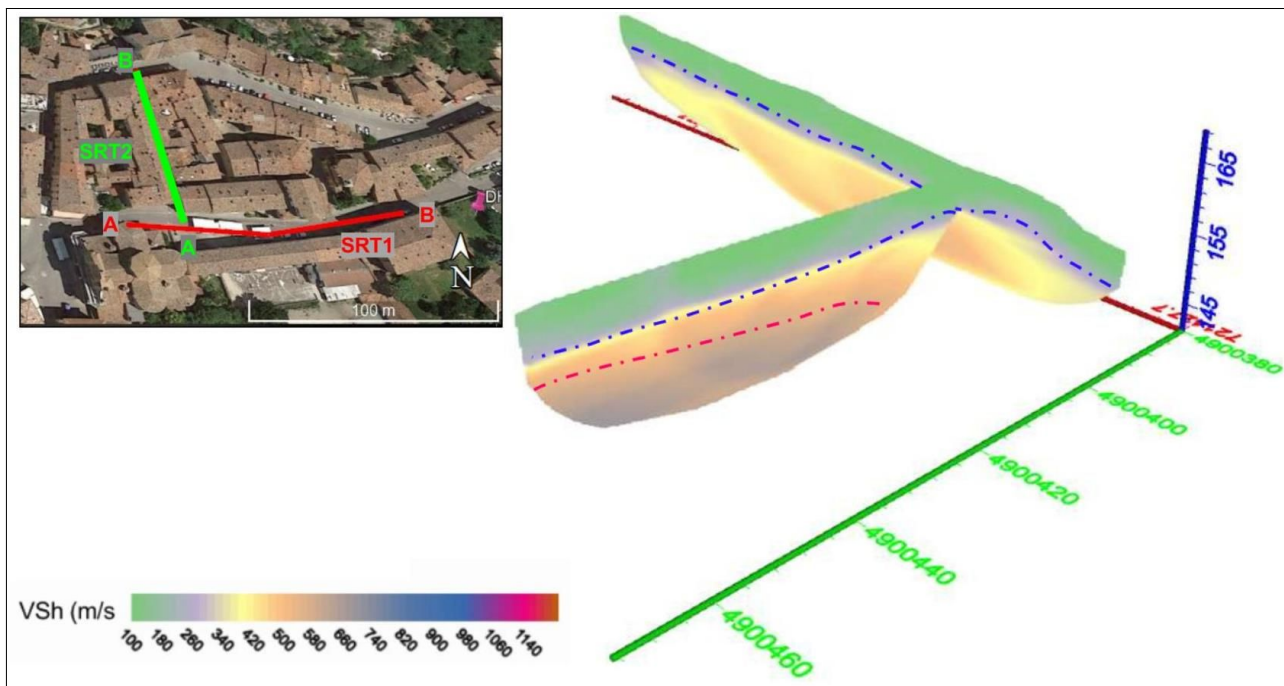


Figura 5.6 – Profili di Vs ricavati dagli stendimenti sismici a rifrazione eseguiti nel centro storico di Brisighella (via Fossa e via Recuparati)

La sezione 6 (figura 5.7), invece, rappresenta uno spaccato di sottosuolo situato più a NE, caratterizzato da un substrato marino costituito in questo caso dalle Argille Azzurre (FAA). La modellazione sismostratigrafica è riferita principalmente agli esiti del sondaggio e della prova “Down-Hole” (P24063) eseguiti in via Bacello (figura 5.8). Tale prova sismica evidenzia la modesta rigidezza ($V_s < 500$ m/s) del substrato marino pelitico, presumibilmente molto alterato e detensionato per spessori ben superiori alla profondità investigata dalla stessa terebrazione (30 metri). Occorre precisare che le indagini a rifrazione effettuate per questo studio nel Comune di Riolo Terme, precisamente nel Capoluogo (fondovalle del Senio), hanno anch'esse evidenziato come il substrato FAA sia caratterizzato da V_s progressivamente in incremento, tuttavia con valori ancora “non rigidi” (V_s fino a circa 600 m/s) fino a profondità di ben oltre 20÷25 metri.

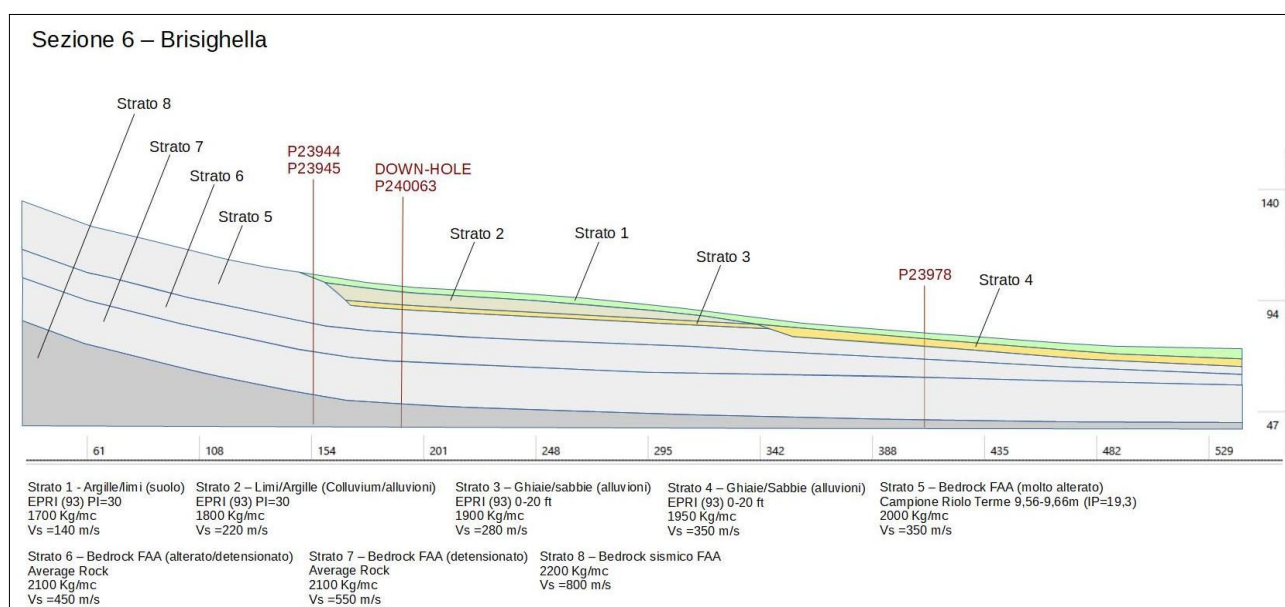


Figura 5.7 – Sezione 6 (Capoluogo)

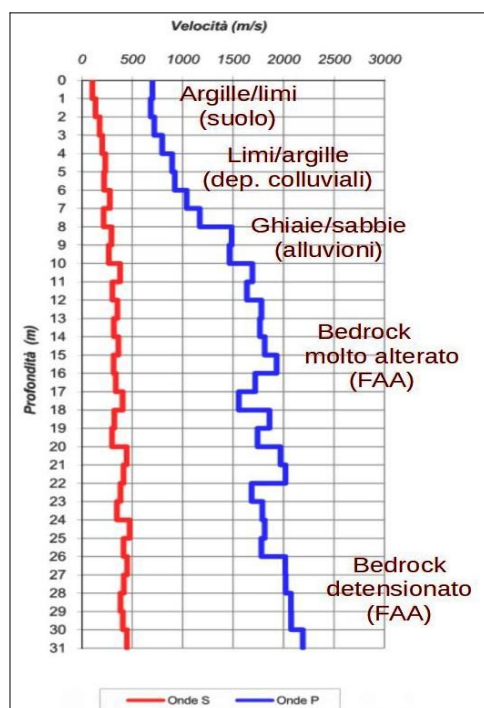


Figura 5.8 – Profili di V_s e V_p ottenuti dalla prova “Down-Hole” nel sondaggio eseguito nel Capoluogo (via Bacello)

La sezione 7 (figura 5.9), infine, interseca il fondovalle urbanizzato del Capoluogo più a ovest rispetto al centro storico. In questo caso il substrato è costituito dalla Formazione Marnoso Arenacea (FMA) e la ricostruzione sismostratigrafica è basata sugli esiti delle indagini geognostiche limitrofe (penetrometrie CPT e dinamiche; sondaggi) che hanno attraversato le coperture colluviali e alluvionali. A ulteriore supporto, le indagini geofisiche disponibili e in particolare il già citato stendimento a rifrazione (figura 5.10) eseguito per questo studio nella limitrofa frazione Fognano, ove si evince il rapido incremento delle Vs al contatto tra coperture alluvionali e il sottostante substrato roccioso FMA “rigido”.

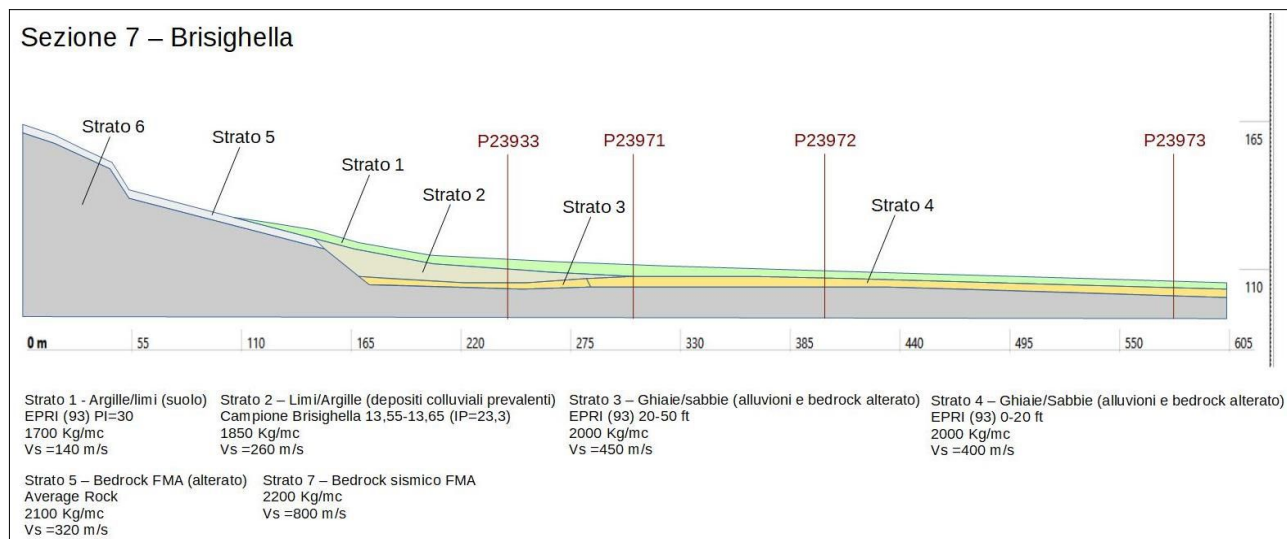


Figura 5.9 – Sezione 7 (Capoluogo)

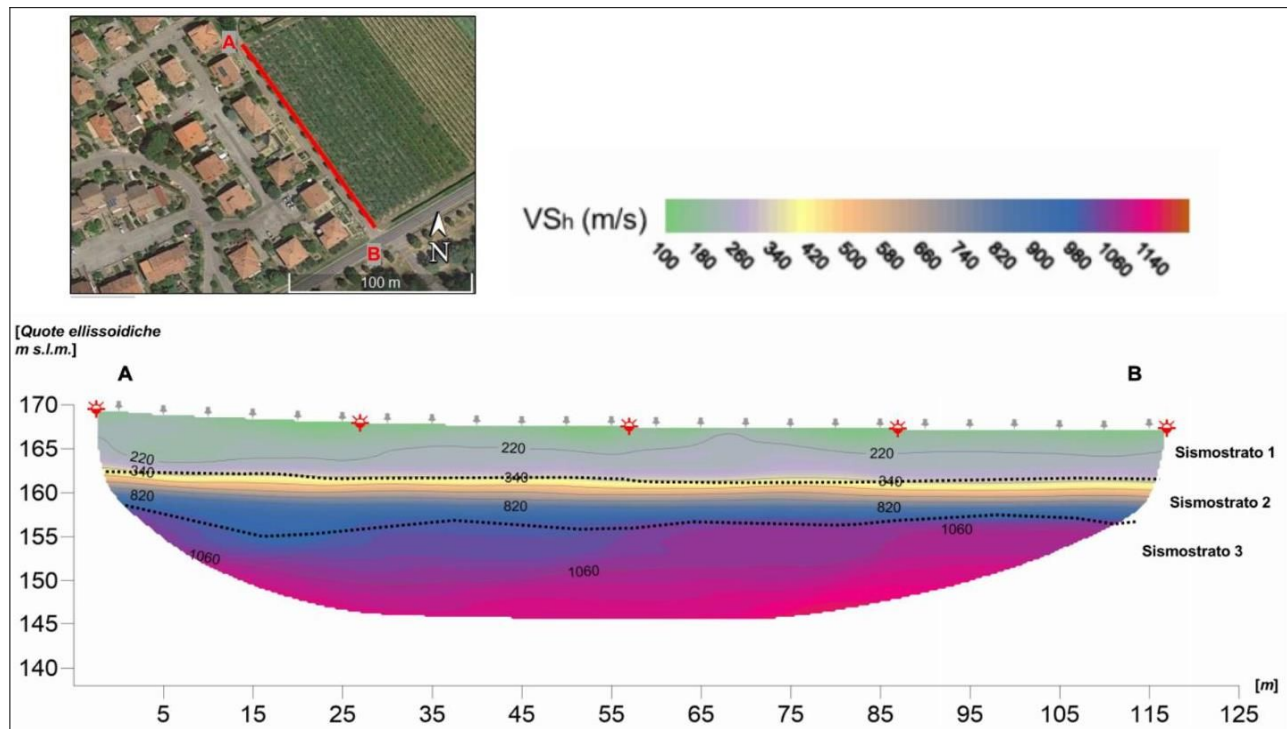


Figura 5.10 – Profili di vs ricavati dallo stendimento sismico a rifrazione eseguito nel fondovalle di Fognano

6 INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE

Nel presente capitolo vengono esaminate le principali scelte effettuate a scopo interpretativo, riprendendo quanto già esposto per delineare la struttura dello studio di MS di livello 2 e proseguendo con l'esposizione del percorso logico seguito per gli ulteriori approfondimenti di livello 3, evidenziandone le ragioni e gli elementi a sostegno, ma cercando anche di valutarne le inevitabili incertezze e le eventuali criticità.

6.1 Frequenza naturale dei terreni (f_0)

A supporto dello studio di MS di livello 2 (Tarabusi, 2015) sono state realizzate 42 misure di rumore ambientale (microtremore a stazione singola) a integrazione di alcune misure pregresse. Per questo studio, sono state recuperate ulteriori registrazioni di repertorio e realizzate nuove prove HVSR, spesso associate alle indagini geognostiche (penetrometrie e sondaggi) e alle altre indagini geosifiche (MASW) eseguite. Alcune registrazioni sono state appositamente eseguite a breve distanza l'una dall'altra con strumenti differenti per verificare la ripetibilità delle misure e la sostanziale coerenza dei dati registrati con i due diversi strumenti. In generale tali misure hanno permesso di accertare la presenza o l'assenza di contrasti di impedenza nei terreni indagati, consentendo la verifica delle determinazioni fatte nello studio del 2009 ed eventualmente di apportare alcuni correttivi.

Negli ambiti collinari, tali misurazioni, correlate con dati stratigrafici o misure di Vs, hanno permesso spesso di associare i picchi principali di H/V alla profondità del contatto tra i depositi terrazzati e di versante con il substrato, in genere sempre alterato nei primi metri. Questo per la ragione principale che l'ampiezza di tali picchi, talvolta assai pronunciata, è direttamente legata alla differenza di velocità degli strati. La carta delle frequenze naturali dei terreni prevista dalla DGR 630/2019 e descritta nel paragrafo 8.3, evidenzia quanto sopra descritto e riporta tutti i punti di misura di rumore ambientale realizzati a supporto del presente studio e di archivio.

6.2 Substrato rigido e coperture

Nel settore montuoso affiora estesamente la Formazione Marnoso-Arenacea (FMA), formazione rocciosa che, a meno di un limitato spessore superficiale di alterazione, può essere assimilata a substrato rigido, con limitati o assenti fenomeni di amplificazione. Anche la Formazione della Vena del Gesso, costituita da gessi e in subordine calcari, può essere assimilata a substrato rigido. Al contrario, nella zona collinare, per la presenza di formazioni prevalentemente pelitiche (Argille a Colombacci, Marne di Cella, Argille Azzurre) o comunque non rigide (Sabbie di Imola) sono sempre attesi effetti di amplificazione anche in presenza di limitati spessori di coperture, poiché tali successioni, sebbene costituiscano il substrato, sono tutte caratterizzate da velocità di propagazione delle onde di taglio S relativamente basse (in genere Vs compresa tra 400 e 600 m/s, anche per alcune decine di metri) (Marabini e Poggiali, 2009).

Il confronto fra i risultati della campagna di misure di microtremore descritti nel paragrafo precedente e i dati derivati dalle indagini geognostiche e geofisiche eseguite entro gli ambiti di studio hanno spesso permesso di correlare le frequenze naturali dei terreni misurate con i dati stratigrafici a conferma di quanto sopra descritto.

Per quanto riguarda gli ambiti collinari e montani, i picchi che si riscontrano a frequenza variabile da circa 2 fino a 17 Hz sono stati in genere ben correlati al contrasto di impedenza presente tra substrato (più o meno alterato) e coperture. Tale contrasto è funzione della differenza di velocità delle onde di taglio S tra i depositi superficiali e il substrato: ad esempio risulta più marcato (picchi a maggiore ampiezza) quando il substrato è rappresentato dalla Formazione Marnoso Arenacea o dalla Formazione della Vena del Gesso (V_s prossima a 800 m/s, bedrock) e più sfumato (picchi a minore ampiezza) quando è rappresentato da unità meno rigide come ad esempio la Formazione delle Argille Azzurre (V_s tra 400 e 600 m/s, pseudo-bedrock).

Per questa ulteriore fase di studio, il piano delle indagini è stato pensato per recepire ulteriori informazioni sulle caratteristiche sismostratigrafiche del bedrock e in particolare sui fronti di alterazione che possono condizionare la risposta sismica locale. Il substrato delle Argille Azzurre, ad esempio, è stato investigato da una prova sismica in foro "Down-Hole", che ha chiaramente confermato la presenza di spessori alterati/detensionati e una complessiva modesta rigidezza ($V_s < 500$ m/s) per spessori ben superiori alla profondità investigata dalla stessa terebrazione (30 metri).

Anche il bedrock marnoso-arenaceo è stato ulteriormente investigato, confermando il maggior grado di rigidezza di questo substrato marino. Le indagini eseguite per questo studio hanno tuttavia fornito dati fondamentali per la caratterizzazione sismostratigrafica delle coperture e in particolare dei depositi colluviali e detritici che caratterizzano ampie porzioni di fondovalle. Più in particolare, il centro storico del Capoluogo è stato specificamente investigato, come descritto nel capitolo 5, per consentire la modellazione sismostratigrafica dei depositi di conoide detritica, indispensabile per un'analisi accurata della risposta sismica locale.

6.3 Ulteriori considerazioni sugli approfondimenti di livello 3

La prevalenza di territorio urbanizzato del Comune di Brisighella coincide con ampi settori di fondovalle terrazzato del fiume Lamone. I dati geognostici e geofisici disponibili hanno consentito una sufficiente ricostruzione sismostratigrafica del sottosuolo interessato, come già detto costituito da substrato roccioso più o meno alterato e sovrastato da spessori di coperture alluvionali per lo più modeste. Le ulteriori indagini di raccolte ed eseguite per questo studio hanno tuttavia evidenziato come a ridosso dei versanti, i depositi colluviali e detritici costituiscano le coperture con spessori più significativi e relativamente variabili, inoltre caratterizzati da un modesto grado di rigidezza. Per questo motivo, gli

approfondimenti sismici di livello 3 hanno permesso di verificare per l'importante areale Capoluogo il contributo della risposta sismica locale fornito sia dai depositi prevalentemente riconducibili alla conoide detritica, sia il contributo fornito dai depositi a ridosso del versante. Le analisi di RSL si sono basate esclusivamente su modellazioni bidimensionali per appurare l'entità delle differenze laterali dell'amplificazione.

Questo studio ha permesso un ulteriore aggiornamento delle "zone di attenzione per instabilità di versante" presenti all'interno del territorio indagato. Per quanto riguarda Brisighella, i dissesti di versante interferenti con le aree di studio sono riconducibili ad alcuni crolli, scorrimenti e frane classificate complesse. Lo studio, in particolare, ha rettificato alcuni refusi e aggiornato gli elementi cartografici come desunto dall'Inventario del dissesto predisposto dal SGSS regionale. Non si è tuttavia reputato utile effettuare specifici approfondimenti sulla stabilità in quanto tali zone interessano settori relativamente limitati degli areali studiati e/o condizioni di interferenza da ritenersi non significative. Si tratta, inoltre di dissesti che risultano già interessati da interventi di messa in sicurezza. Nel Capoluogo, ad esempio, la parete a tergo dell'abitato storico con substrato roccioso costituito da Gessi in affioramento, è stata storicamente coinvolta da distacchi e crolli, con successivi rilievi di monitoraggio e controllo ed interventi di disaggio e di consolidamento.

7 METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI

Il fine ultimo di uno studio di microzonazione sismica è quello di pervenire ad una suddivisione del territorio indagato in zone “stabili”, zone “suscettibili di amplificazioni locali”, a loro volta suddivise in aree a diverso grado di amplificazione, e zone “instabili”. Per il Comune di Brisighella, lo studio ha consentito un ulteriore un aggiornamento delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS) già individuate con la MS di livello 1 e 2 (Tarabusi, 2015). Le nuove indagini eseguite hanno permesso di espletare locali approfondimenti di terzo livello in merito agli aspetti di risposta sismica locale. I paragrafi del presente capitolo illustrano i risultati dello studio e le metodologie di elaborazione utilizzate per determinare i diversi fattori di amplificazione sul territorio e per identificare le aree instabili.

7.1 Zone suscettibili di amplificazioni locali – fattori di amplificazione semplificati

Per suddividere il territorio in base all'amplificazione attesa, in aree a maggiore e minore pericolosità, devono essere calcolati, nel secondo livello di microzonazione sismica, i fattori di amplificazione, scegliendo se utilizzare gli abachi nazionali degli ICMS (Gruppo di lavoro MS, 2008) o quelli di riferimento regionali. Lo studio di MS di livello 2 (Tarabusi, 2015) ha considerato questi ultimi, in analogia con quanto già realizzato nello studio di microzonazione del 2009 (Marabini, 2009) e poiché si ritiene che, per come sono strutturati, consentano una migliore e più corretta modellazione per lo specifico caso dell'Unione dei Comuni della Romagna Faentina. Per questo ulteriore studio, i fattori di amplificazione semplificati sono stati ulteriormente ricalcolati sulla base degli abachi riportati nella DGR 630/2019. Quest'ultima Deliberazione regionale ha determinato l'aggiornamento dei precedenti indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna (DAL 112/2007 e DGR2193/2015).

I fattori di amplificazione indicati nella DGR regionale n. 630/2019 sono calcolati per un tempo di ritorno dell'evento sismico pari a $T_r = 475$ (con smorzamento $\zeta = 5\%$) e si riferiscono a:

FA PGA → rapporto tra la massima ampiezza dell'accelerazione ricavata alla superficie del deposito e ricavata sull'affioramento “rigido” (PGA/PGA0). Il fattore di amplificazione dipende dalla frequenza di eccitazione armonica, dal fattore di smorzamento D e dal rapporto tra l'impedenza sismica, prodotto tra densità-velocità, della roccia base e quella del deposito;

FA SA – Rapporto dell'intensità spettrale in accelerazione ricavata alla superficie del deposito e ricavata sull'affioramento “rigido”. I fattori di amplificazione calcolati si riferiscono ai quattro seguenti intervalli di integrazione del periodo proprio T:

SA1 → 0,1s-0,5s [FA0105]

SA2 → 0,4s-0,8s [FA0408]

SA3 → 0,7s-1,1s [FA0411]

SA4 → 0,5s-1,5s [FA0515] solo per le aree di pianura/costa

FA SI - Intensità spettrale di Housner → indicatore della pericolosità sismica, definito come l'area sottesa dello spettro di risposta di pseudovelocità per determinati periodi dello scuotimento. Nel nostro caso, si devono determinare i fattori di amplificazione per i tre seguenti intervalli di integrazione del periodo proprio T:

SI1 → 0,1s-0,5s [FH0105]

SI2 → 0,5s-1,0s [FH0510]

SI3 → 0,5s-1,5s [FH0515] solo per le aree di pianura/costa

La prima scelta da fare, per poter determinare i fattori di amplificazione secondo i criteri regionali, è quella relativa a quali abachi utilizzare. Per quanto riguarda il Comune di Brisighella, sulla base di quanto riportato nei precedenti capitoli 5 e 6 e in particolare per le caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo ritenute importanti dal punto di vista dell'influenza sul moto sismico in superficie, il territorio studiato è attribuibile ai seguenti abachi rappresentativi della stima della risposta sismica locale semplificata:

A2.1.1 - "Appennino" con coperture direttamente poggianti su substrato rigido (V_s substrato ≥ 800 m/s)

Utilizzato nelle aree montane e collinari in cui il substrato delle coperture, individuato alla profondità massima di poche decine di metri, è costituito dalla Formazione Marnoso arenacea o dalla Formazione della Vena del Gesso

A2.1.1 - "Appennino" con coperture su substrato non rigido (V_s substrato < 800 m/s)

Utilizzato nel settore collinare, dove il substrato è costituito da successioni prevalentemente pelitiche (es. Formazione delle Argille Azzurre).

È opportuno sottolineare come, in ragione della diversa distribuzione e qualità dei dati disponibili e delle inevitabili incertezze dei metodi utilizzati in questo genere di valutazioni, non siano tanto importanti i valori assoluti dei fattori di amplificazione ottenuti, quanto piuttosto quelli relativi ricavati dal confronto dei diversi valori numerici, che permettono di individuare le aree a maggiore o minore pericolosità relativa.

Occorre infine precisare che lo studio di MS di livello 2 aveva individuato due specifiche condizioni di amplificazione topografica (pendii con inclinazione media superiore a 15° e altezza maggiore di 30 metri) nell'areale Capoluogo, e calcolato fattori di amplificazione topografica F_t secondo la metodologia indicata nella DAL 112/2007 (paragrafo A2.2). Per questo studio, tali effetti riconducibili alla morfologia sono stati ricalcolati attraverso le modellazioni numeriche bidimensionali di RSL.

7.2 Zone suscettibili di amplificazioni locali – modelli numerici bidimensionali della RSL

I dati geognostici ulteriormente recepiti con questo studio hanno permesso di delimitare con un maggior dettaglio la struttura deposizionale di conoide detritica e gli spessori dei depositi colluviali sui quali si insedia il nucleo storico di Brisighella. Le indagini e in particolare i sondaggi ora disponibili hanno confermato spessori di depositi colluviali e detritici fino a circa 25 metri (cfr. capitolo 5), mentre le ulteriori indagini geofisiche (“Down-Hole”; tomografie sismiche a rifrazione; ecc.) hanno consentito la ricostruzione sismostratigrafica del sottosuolo fino al substrato marino rigido.

Si è dunque proceduto con l'elaborazione di cinque analisi numeriche della risposta sismica locale di tipo bidimensionale per valutare gli effetti di amplificazione nelle evidenti condizioni di variabilità delle condizioni di contorno (morfologia di superficie; stratigrafia e morfologia sepolta). Tali analisi sono state condotte su altrettante sezioni sismostratigrafiche bidimensionali (figura 7.1) già illustrate nel capitolo 5. Si è utilizzato il codice di calcolo LSR2D⁴, che consente di effettuare un'analisi di risposta sismica locale di tipo bidimensionale, lineare equivalente, con il metodo agli elementi finiti.

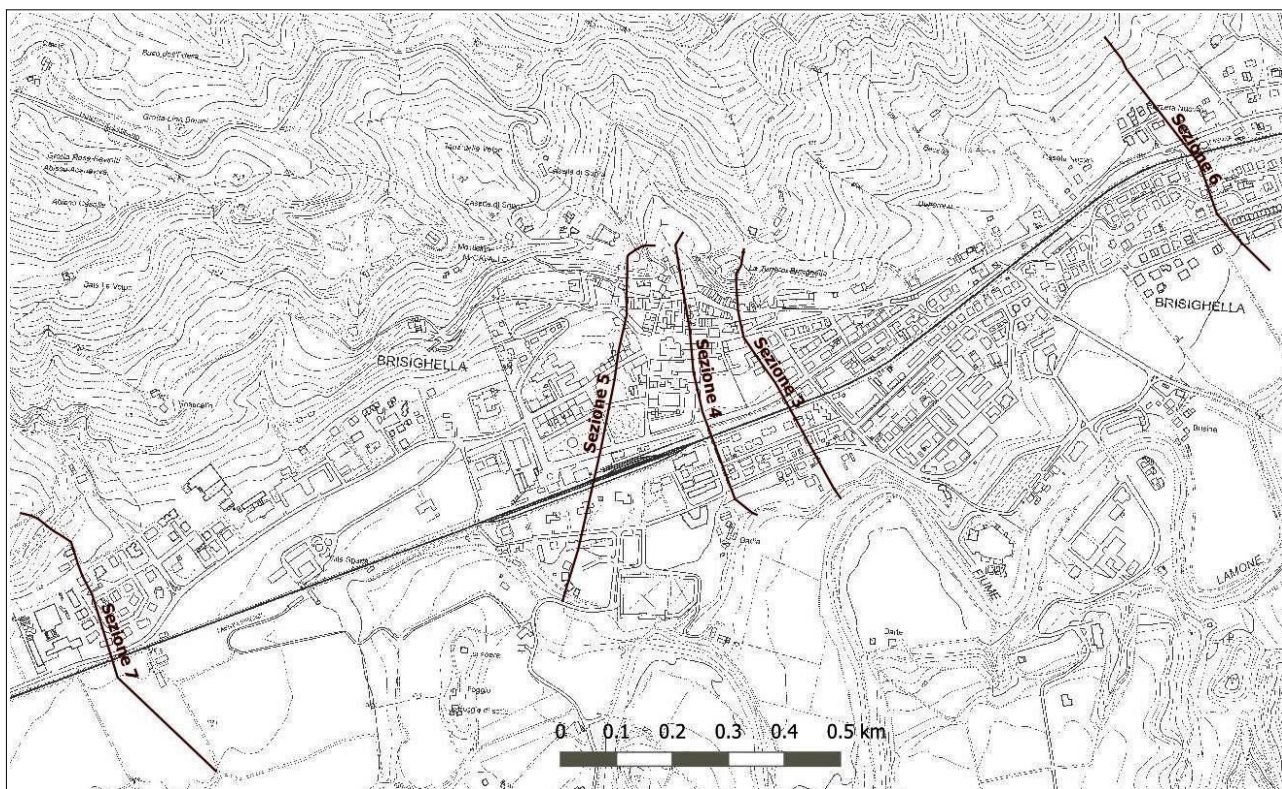


Figura 7.1 – Tracce dei modelli sismostratigrafici 2D implementati nelle analisi numeriche della RSL.

Si rammenta che il modello lineare equivalente studia il comportamento tra tensione e deformazione del terreno basandosi sul modello di Kelvin-Voigt e la strategia implementata nel processamento di calcolo consiste sostanzialmente nel fare riferimento

⁴ Codice di calcolo bidimensionale prodotto da STACEC Srl

alle soluzioni visco-elastiche lineari per la propagazione delle onde sismiche adeguando in modo iterativo i parametri costitutivi in funzione del livello deformativo indotto dal moto sismico nel terreno. La risposta non lineare del terreno tramite il modello viscoelastico lineare equivalente viene riassunta attraverso le curve di riduzione del modulo di taglio e di incremento del rapporto di smorzamento. Ciò rappresenta un adeguato compromesso tra semplificazione delle analisi ed accuratezza dei risultati.

L'approccio utilizzato dal software LSR2D, per la soluzione visco-elastica lineare all'interno della modalità di calcolo iterativa, utilizza il metodo degli elementi finiti (FEM). In particolare, gli strati definiti nei modelli sismostratigrafici sono stati discretizzati dal software (in modalità semiautomatica) in "mesh" di elementi finiti piani di forma triangolare, consentendo un'efficace modellazione delle variazioni geometriche così come delle irregolarità della superficie topografica e dei contatti stratigrafici (figura 7.2).

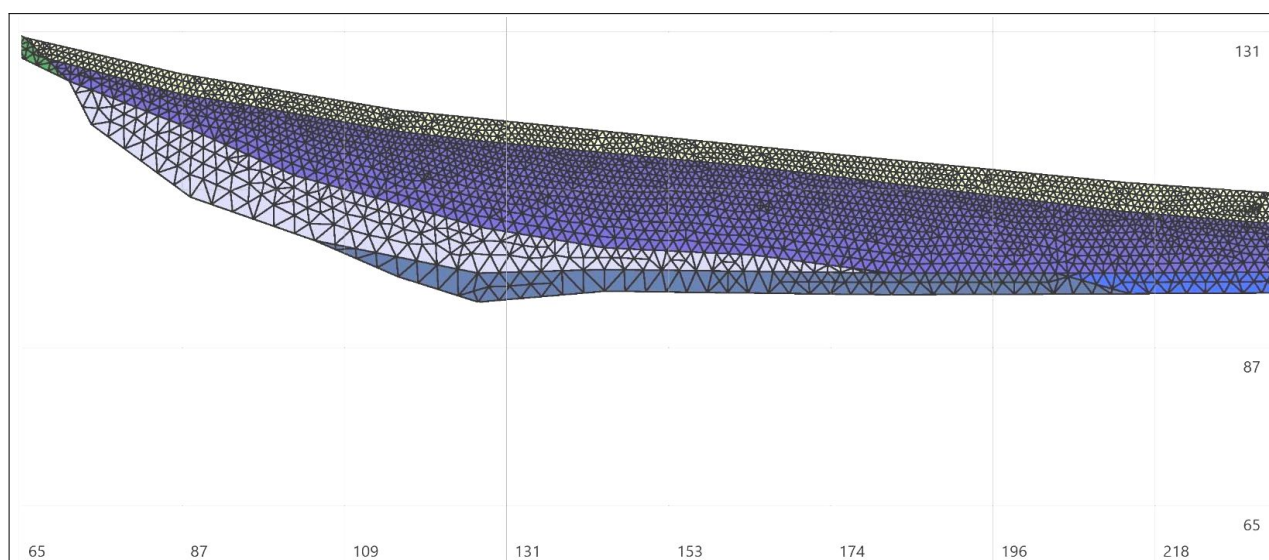


Figura 7.2 – Mesh generate attraverso il codice di calcolo LSR2D (riproduzione parziale del modello “Sezione 3” di Brisighella).

Il software LSR2D consente di gestire le condizioni al contorno imposte sui modelli e in particolare si sono imposte condizioni di free field ai lati delle sezioni mediante vincoli cinematici che impediscono gli spostamenti verticali dei nodi di bordo e smorzatori viscosi alla base del modello, in modo da tenere conto della presenza del substrato sottostante.

Il software LSR2D è in grado di eseguire una sequenza di analisi lineari complete, con l'aggiornamento successivo dei parametri di rigidità e smorzamento in funzione delle caratteristiche della colonna litologica. Il risultato della procedura iterativa di calcolo della RSL è altro che la storia temporale di accelerazione, velocità e spostamento di ogni grado di libertà del modello FEM. Il processo di analisi che si è seguito può essere così schematizzato:

- ✓ scelta degli input sismici (accelerogrammi) di riferimento;

- ✓ definizione del modello sismostratigrafico locale;
- ✓ elaborazione della risposta sismica locale (accelerogrammi di output; degli spettri di risposta elastici; fattori di amplificazione)

Gli input sismici di riferimento sono stati selezionati dalla banca dati accelerometrica "European Strong Motion database" (http://www.isesd.hi.is/ESD_Local/frameset.htm, nel seguito citata come ISESD) attraverso una procedura che valuta la similarità tra una forma spettrale di riferimento indicata nella DGR 630/2019 (corrispondente alla forma dello spettro di risposta isoprobabile con il 10% di probabilità di eccedenza in 50 anni e la forma degli spettri di risposta dei segnali contenuti nella banca dati ISESD). Si tratta di tre differenti tipologie di segnale (figura 7.3):

- 1) impulsivo
- 2) con ampio contenuto in frequenze
- 3) con componente predominante alle alte frequenze.

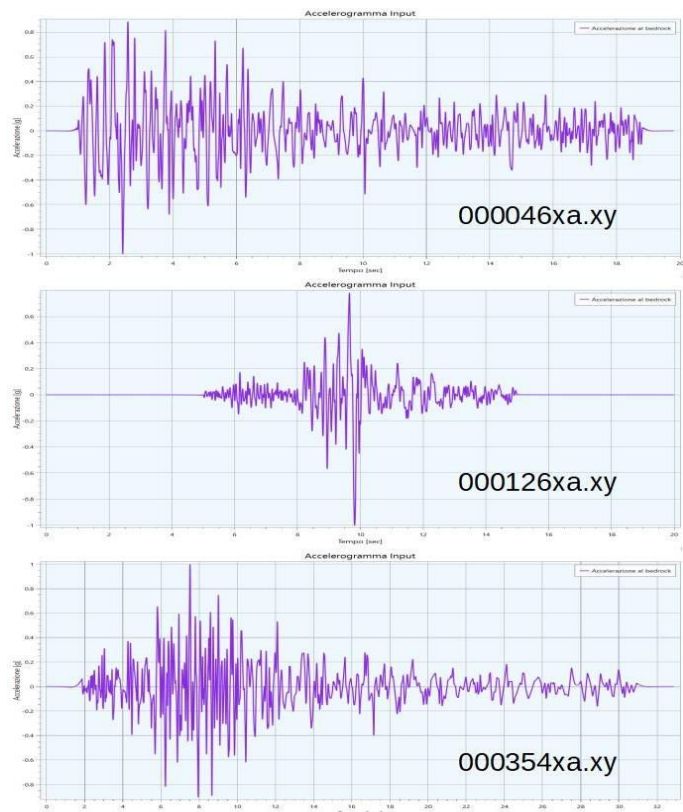


Figura 7.3 – Accelerogrammi di input utilizzati per l'analisi numerica di RSL (DGR 630/2019).

Gli accelerogrammi di input sono scalati moltiplicando le accelerazioni normalizzate dei segnali di riferimento per il valore di a_{refg} riconducibile alla "pericolosità di base" riportata nella griglia di punti INGV. Per i cinque modelli elaborati, la pericolosità di base è pressochè simile e gli accelerogrammi risultano scalati a 0,210 g (sezioni 1-2-3-5) e 0,209 g (sezione 4).

Come già anticipato, i modelli sismostratigrafici locali implementati nell'analisi numerica sono desunti dalle sezioni sismostratigrafiche illustrate nel capitolo 5 e in particolare nelle

figure 5.2-5.3-5.4-5.7-5.9 per ogni strato sono indicati i parametri implementati nel modello sismostratigrafico (litotipo; curve di decadimento del modulo di taglio e damping; densità di massa; Vs).

Si rammenta che il campione indisturbato prelevato nel sondaggio eseguito presso Palazzo Lega e sottoposto a prova di “Colonna Risonante”, ha consentito di ricavare curve di decadimento sito specifiche (figura 7.4), considerate rappresentative per i depositi prevalentemente colluviali dell'area di studio.

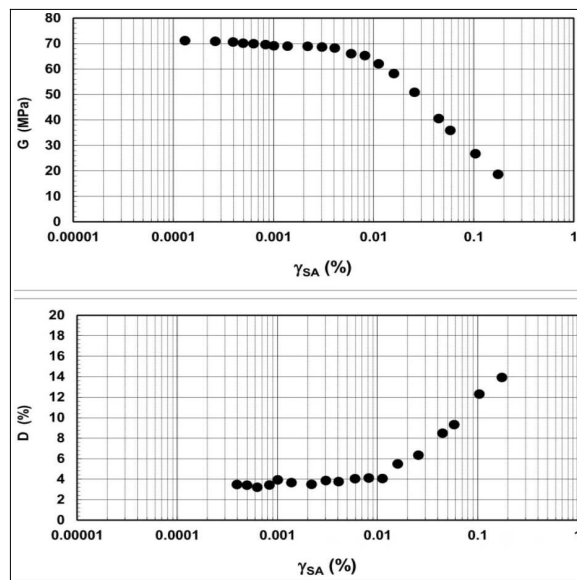


Figura 7.4 – Curve di decadimento ricavate dalla prova di colonna risonante nel campione prelevato alla profondità di 13,55-13,65 metri (sondaggio eseguito presso Palazzo Lega di Brisighella).

La risposta sismica locale è stata analizzata lungo tutto il profilo orografico in termini di storie temporali di velocità e accelerazioni. Nelle figura 7.5 che segue si è riportato, a titolo di esempio, l'output bidimensionale relativo ai massimi valori di accelerazione ricavati per la sezione 3.

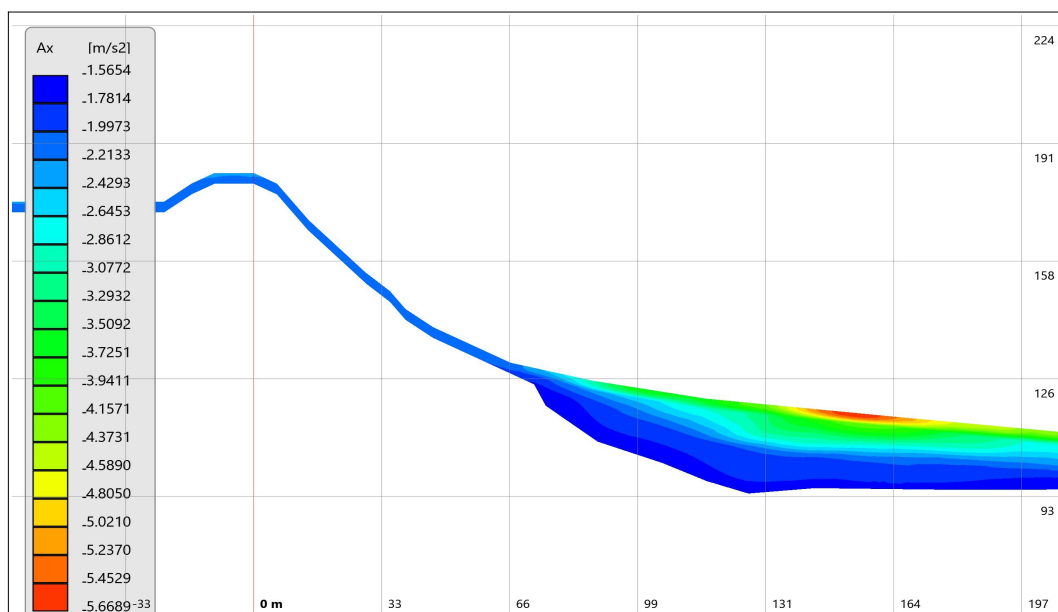


Figura 7.5 – Valori massimi delle accelerazioni orizzontali (sezione 3 Brisighella – elaborazione della RSL media).

Tuttavia, è più interessante monitorare la risposta in superficie in corrispondenza di uno o più punti di controllo in modo da comprendere quelli che sono gli effetti indotti dal sito sull'amplificazione della sorgente sismica. In questo senso, lungo i profili delle cinque sezioni sono stati selezionati punti di controllo sui quali sono state esportate le storie temporali in accelerazione e velocità, gli spettri di risposta e calcolati i fattori di amplificazione (FA).

Si rammenta che i fattori di amplificazione (FA) rappresentano il rapporto fra lo scuotimento sismico valutato per la condizione geolitologica specifica e il corrispondente scuotimento relativo al tetto del bedrock sismicamente rigido. I FA da determinare ai sensi della DGR 630/2019, si riferiscono a una pericolosità che considera un tempo di ritorno del sisma pari a $TR=475$ anni e con smorzamento $\zeta=5\%$. La seguente figura 7.6 riporta, a titolo di esempio, gli esiti di FA ricavati nei punti di controllo relativi alla sezione 5.

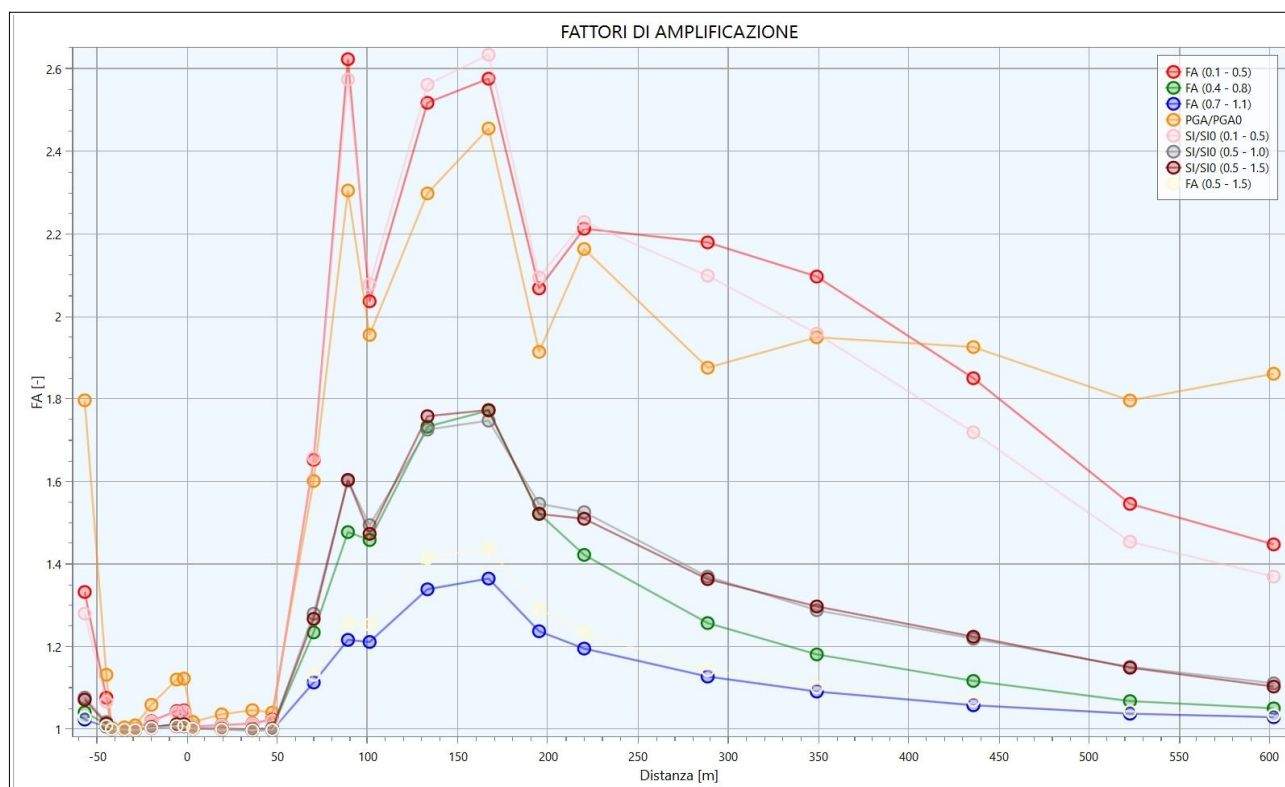


Figura 7.6 – Visualizzazione dei fattori di amplificazione richiesti dalla DGR 630/2019 e calcolati nei punti di controllo selezionati per il modello relativo alla sezione 5 del Capoluogo (valori medi rispetto ai tre input).

Questo studio ha dunque permesso di elaborare cartografie di microzonazione sismica di livello 3 con esiti di amplificazione desunta da modellazione numerica bidimensionale e poi estrapolata/estrapolata a un'ampia porzione dell'areale Capoluogo tenendo conto delle specifiche caratteristiche morfologiche e sismostratigrafiche locali (figura 7.7).

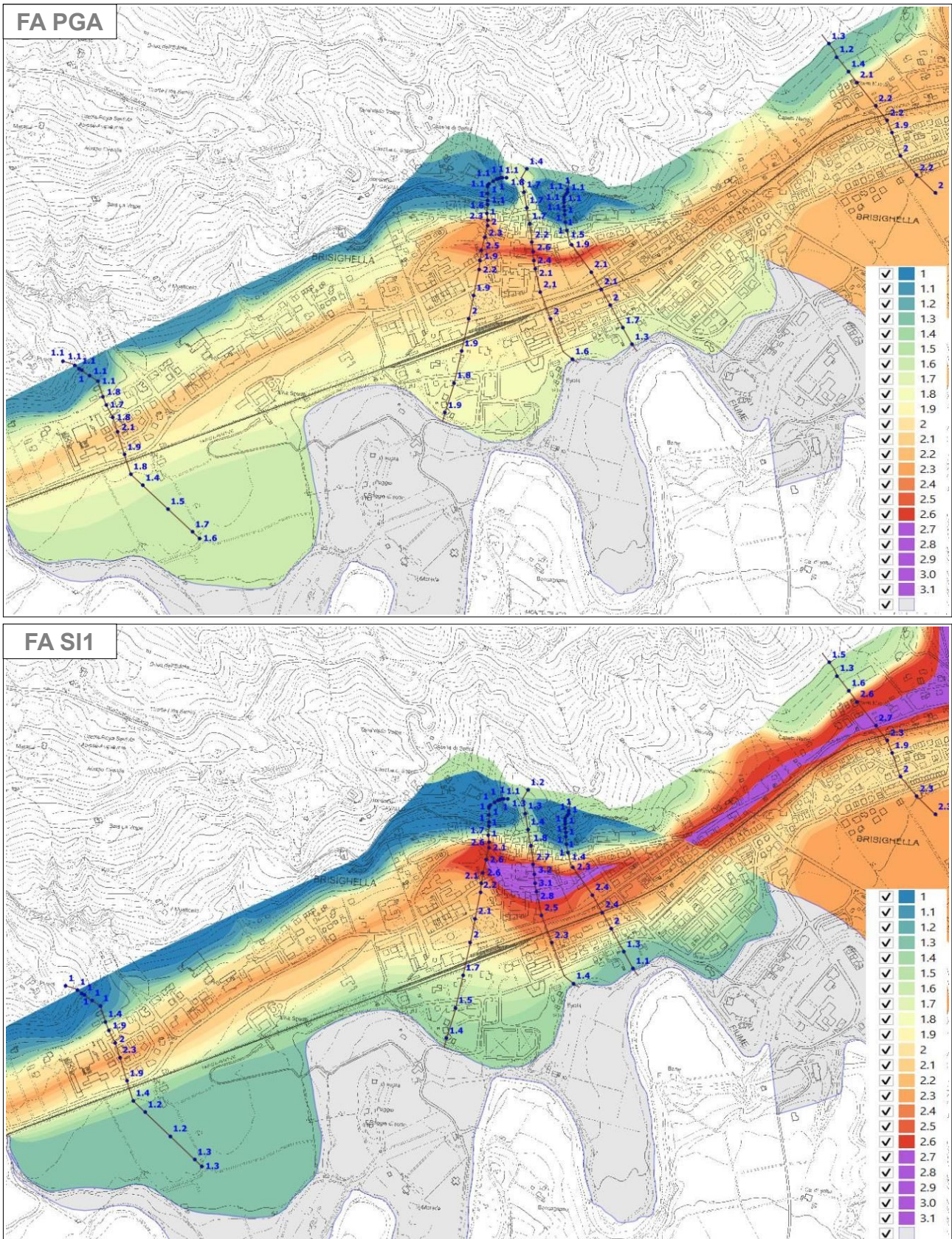


Figura 7.7 – Stralci esemplificativi di restituzione planimetrica delle amplificazioni ricavate dalle simulazioni numeriche bidimensionali di RSL per l'areale Capoluogo.

Sulla base dei risultati delle simulazioni di RSL numeriche, per l'areale studiato si sono prodotte anche le cartografie di MS relative ai fattori di amplificazione SA4 (0,5s-1,5s) e SI3 (0,5s-1,5s).

Le seguenti tabelle 7.1 e 7.2 (rispettivamente riferite al settore centro-occidentale e al settore orientale dell'areale Capoluogo), riportano il confronto diretto tra i fattori di amplificazione sismica (FA) calcolati per le MOPS. In particolare, la comparazione considera sia le amplificazioni calcolate per la microzonazione di livello 2 con approccio semplificato (OCDPC 52/2013; DGR 1919/2013), sia le amplificazioni ricalcolate mediante le modellazioni numeriche di RSL bidimensionali. Occorre evidenziare che il confronto tra MOPS correlabili (raggruppate nella tabella con stesso colore) può risultare di non facile lettura, visto che sia i limiti che le definizioni delle stesse microzone sono state parzialmente modificate a seguito di questo ulteriore studio e che, soprattutto, la variabilità sismostratigrafica implicita nelle analisi di RSL 2D rappresenta un ulteriore elemento di complessità analitica.

MOPS	DESCRIZ. SINTETICA		FA Pga	SI1	SI2
2099	Versante con bedrock FMA/GES	VsH=300m/s	1,2	1,0	1,0
2099	fratturato/alterato H=5m		1,1→1,6	1,0→1,7	1,0→1,3

MOPS	DESCRIZ. SINTETICA		FA Pga	SI1	SI2
2003	Piana terrazzata con successioni fini/ghiaiose	VsH=450m/s	1,6	1,4	1,0
2003	sovastante bedrock FMA/GES rigido H=20m		1,7→2,2	1,3→2,4	1,1→1,6
2004	Conoide detritica sepolta (spessore fino a 25 m)		1,7→2,6	1,5→3,1	1,2→2,1
2002	Piana terrazzata con successioni fini/ghiaiose sovastante bedrock FMA/GES rigido H=10m		1,6→1,8	1,3→1,6	1,1→1,2

MOPS	DESCRIZ. SINTETICA		FA Pga	SI1	SI2
2002	Piana terrazzata con successioni fini/ghiaiose	VsH=300m/s	1,7	1,4	1,0
2002	sovastante bedrock FMA/GES rigido H=10m		1,6→1,8	1,3→1,6	1,1→1,2
2003	Piana terrazzata con successioni fini/ghiaiose sovastante bedrock FMA/GES rigido H=20m		1,6→2,1	1,3→2,4	1,1→1,6

Tabella 7.1 – Confronto tra i fattori di amplificazione calcolati per il Capoluogo (settore centro-occidentale) con approccio semplificato (MS2, in nero) e calcolati con le simulazioni numeriche bidimensionali (MS3, in blu). Si riportano le MOPS di riferimento (in nero le sigle assegnate dalla precedente microzonazione - OCDPC 52/2013; DGR 1919/2013 – e in blu le sigle attribuite a seguito di questo ulteriore aggiornamento).

Per quanto riguarda il settore centro-occidentale del Capoluogo (tabella 7.1), e più in particolare per quanto riguarda i settori di fondovalle terrazzati inclusi nelle MOPS

denominate 2002 e 2003, le analisi numeriche bidimensionali hanno dimostrato una discreta congruenza con i risultati di RSL ricavati con l'approccio semplificato, evidenziando una moderata variabilità laterale della risposta sismica locale per la presenza coperture alluvionali relativamente modeste e omogenee.

Per le porzioni di terrazzo fluviale situate più a ridosso del versante, ancora incluse in parte nella MOPS 2003, ma soprattutto nella MOPS 2004, la modellazione di RSL 2D ha invece evidenziato esiti di amplificazione più significativi e maggiormente variabili, per la presenza di coperture alluvionali e colluviali di maggior spessore e caratterizzate da maggiore variabilità laterale. Questa circostanza, di particolare importanza in quanto l'area corrisponde con l'abitato storico del Capoluogo, è molto riconducibile alla variabilità degli spessori dei depositi che costituiscono la conoide detritica/colluviale (MOPS 2004), nonché alle caratteristiche sismostratigrafiche delle stesse coperture (depositi relativamente "soffici" rispetto al sottostante bedrock), oltre che ad effetti di morfologia sepolta e di focalizzazione delle onde sismiche. Il versante che lo sovrasta è infatti caratterizzato da pendenze anche oltre 40°.

MOPS	DESCRIZ. SINTETICA		FA Pga	SI1	SI2
2007	Piana terrazzata con successioni fini/ghiaiose sovrastante bedrock FAA non rigido H=20m	VsH=300m/s	2,1	2,2	1,7
2011	Versante con bedrock FAA non rigido affiorante		1,3→1,6	1,5→1,9	1,4→1,5
2008	Piana terrazzata con successioni fini/ghiaiose sovrastante bedrock FAA non rigido H=20m		1,7→2,2	2,0→2,7	1,5→1,9

MOPS	DESCRIZ. SINTETICA		FA Pga	SI1	SI2
2004	Piana di fondovalle sovrastante bedrock FAA	VsH=250m/s	2,2	2,2	1,7
2005	non rigido H=15m		2,0→2,2	2,0→2,3	1,5

Tabella 7.2 – Confronto tra i fattori di amplificazione calcolati per il Capoluogo (settore orientale) con approccio semplificato (MS2, in nero) e calcolati con le simulazioni numeriche bidimensionali (MS3, in blu). Si riportano le MOPS di riferimento (in nero le sigle assegnate dalla precedente microzonazione - OCDPC 52/2013; DGR 1919/2013 – e in blu le sigle attribuite a seguito di questo ulteriore aggiornamento).

Per quanto riguarda il settore centro-orientale del Capoluogo (tabella 7.2), si riscontra che anche in questo caso le analisi numeriche di RSL 2D confermano amplificazioni più significative nel settore di terrazzo alluvionale a ridosso del versante (MOPS 2011) e blandamente più cautelative rispetto agli esiti di RSL ricavati con approccio semplificato. Le maggiori amplificazioni appaiono ragionevolmente riconducibili, oltre che agli spessori più consistenti delle coperture (alluvioni e depositi colluviali), anche al grado di alterazione del bedrock pelitico FAA. Non sembrano invece emergere, in questo caso, particolari

effetti sismici riconducibili a condizioni di focalizzazione delle onde sismiche.

Gli spettri e gli accelerogrammi di output vengono allegati in formato numerico (file .txt) alla documentazione secondo gli standard di archiviazione indicati dalla CTMS (v.4.1). In calce alla relazione si allegano, inoltre, le schede riepilogative delle simulazioni di RSL effettuate.

7.3 Zone suscettibili di amplificazioni locali – confronto con modelli numerici 1D

Per questo studio, si sono elaborate alcune simulazioni numeriche monodimensionali di RSL, per consentire ulteriori verifiche in alcuni punti di controllo dei modelli di RSL 2D che hanno riscontrato valori più elevati di amplificazione. In particolare, sono state elaborate tre simulazioni numeriche di RSL 1D, rispettivamente nei punti di controllo n.6, n.14 e n.5 delle sezioni n.4, n.5 e n.6 (figure 7.8 e 7.9).

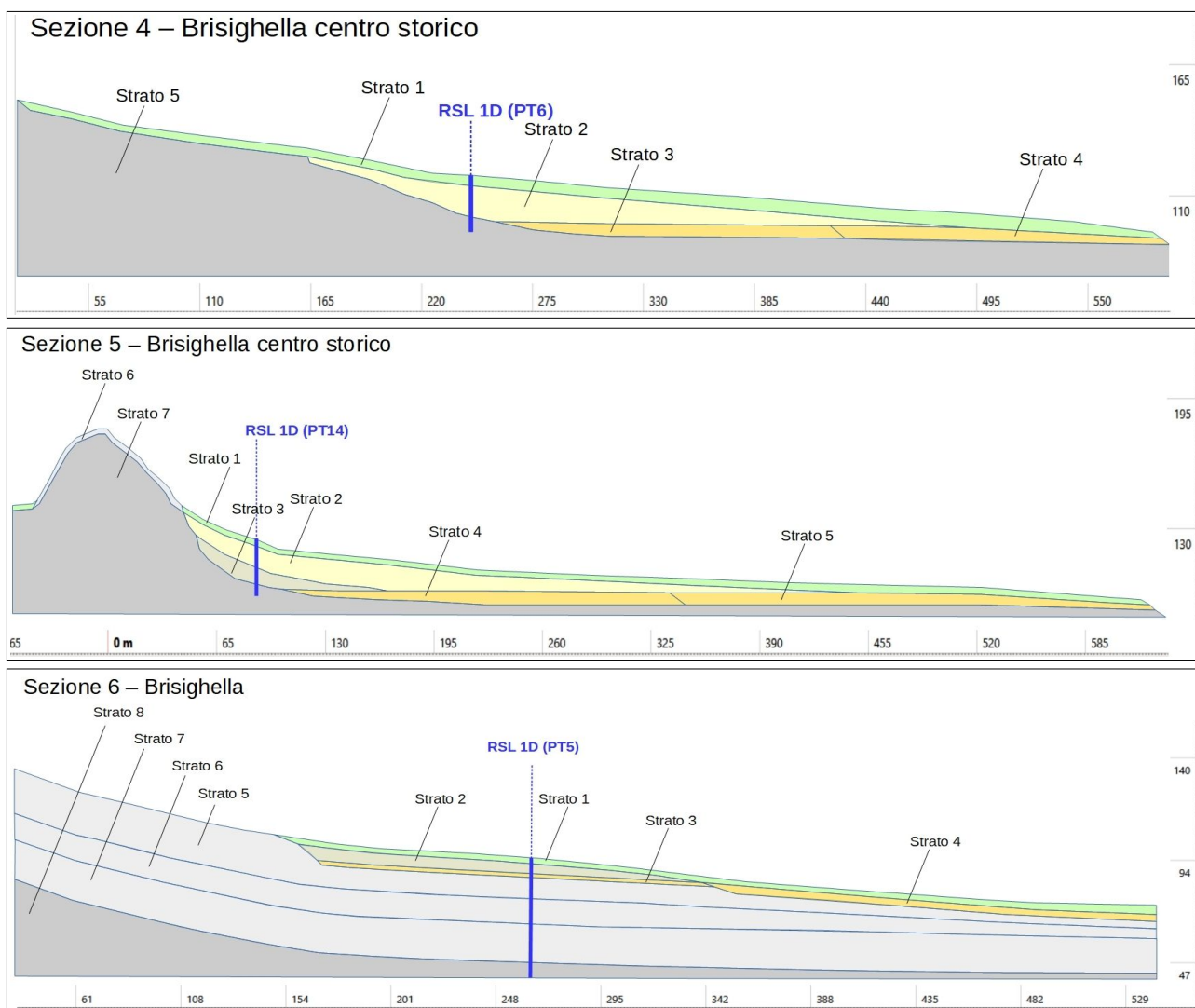


Figura 7.8 – Localizzazione delle tre colonne sismostratigrafiche (punti di controllo) implementate nelle analisi numeriche di RSL 1D del Capoluogo

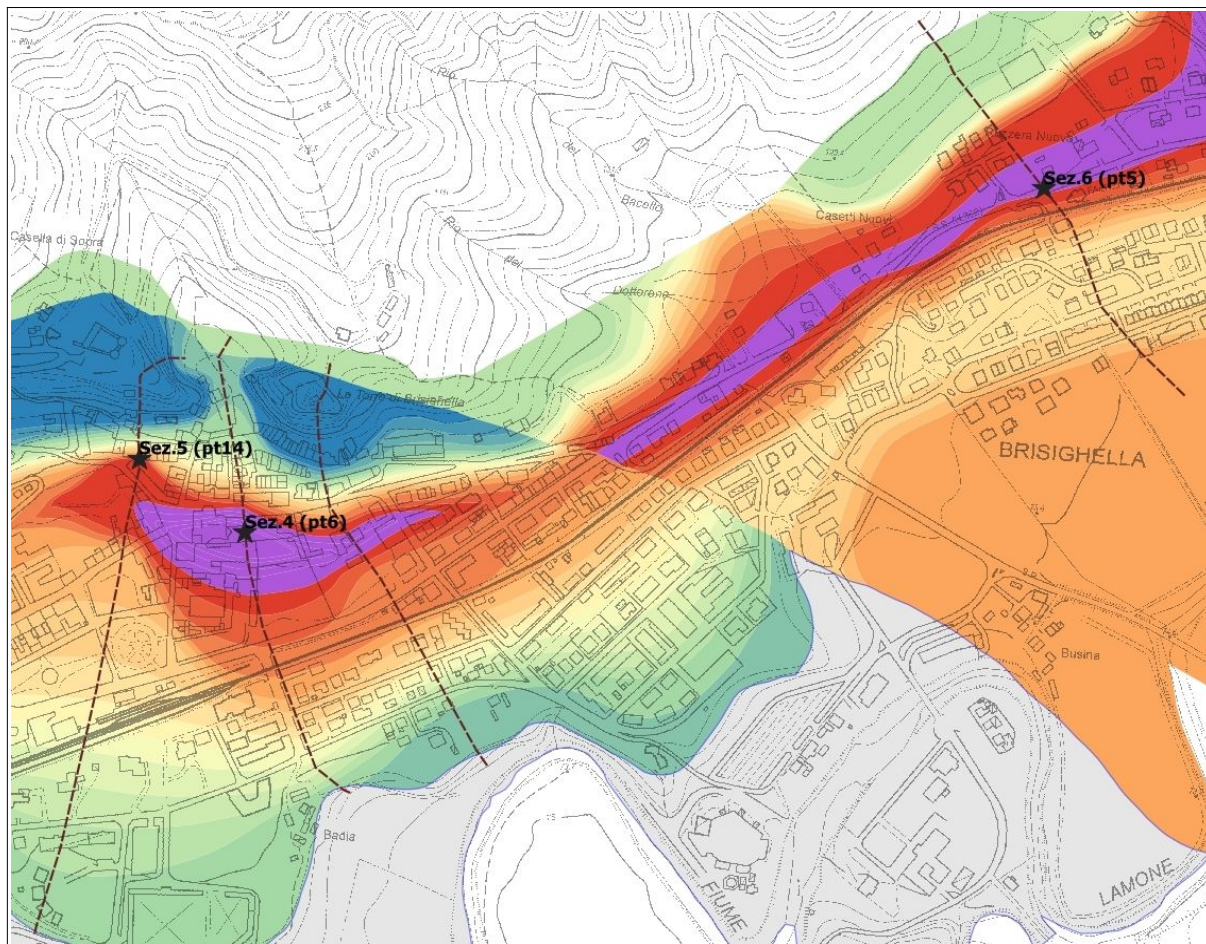


Figura 7.9 – Localizzazione dei punti di controllo di riferimento per le analisi numeriche di RSL 1D del Capoluogo. La figura riporta la restituzione planimetrica estrapolata degli esiti di FA PGA ricavate dalle simulazioni di RSL 2D.

Per le analisi numeriche di RSL si è ancora utilizzato il software LSR2D prodotto da STACEC, in grado di effettuare automaticamente simulazioni di RSL monodimensionali attraverso determinate restrizioni cinematiche da applicare alle colonne sismostratigrafiche di input. Il software effettua una sequenza di analisi lineari complete, con l'aggiornamento successivo dei parametri di rigidità e smorzamento in funzione delle caratteristiche della colonna sismostratigrafica. Il confronto tra le simulazioni di RSL è riportato nella seguente tabella 7.2.

SEZ.4 Punto Controllo n.6	PGA	SA1	SA2	SA3	SA4	SI1	SI2	SI3
RSL Livello 2 DGR 1919/2013	1,6	--	--	--	--	1,4	1,0	--
RSL Livello 3 1D	2,1	2,3	1,9	1,4	1,5	2,4	1,7	1,7
RSL Livello 3 2D	2,6	3,0	2,3	1,6	1,7	3,2	2,1	2,1

Tabella 7.2 – Confronto tra i fattori di amplificazione calcolati con modellazione 1D e 2D. Sono inoltre riportati i FA calcolati con approccio semplificato (abachi DGR 1919/2013). In rosso sono evidenziate le amplificazioni più significativamente alte ricavate con la modellazione 2D.

SEZ.5 Punto Controllo n.14	PGA	SA1	SA2	SA3	SA4	SI1	SI2	SI3
RSL Livello 2 DGR 1919/2013	1,2	--	--	--	--	1,0	1,0	--
RSL Livello 3 1D	2,1	2,5	1,5	1,2	1,3	2,5	1,6	1,6
RSL Livello 3 2D	2,3	2,5	1,5	1,2	1,3	2,6	1,6	1,6
SEZ.6 Punto Controllo n.5	PGA	SA1	SA2	SA3	SA4	SI1	SI2	SI3
RSL Livello 2 DGR 1919/2013	2,2	--	--	--	--	2,1	1,7	--
RSL Livello 3 1D	2,0	2,4	1,9	1,5	1,6	2,4	1,8	1,8
RSL Livello 3 2D	2,2	2,6	2,1	1,5	1,6	2,7	1,9	1,9

Tabella 7.2 (segue) – Confronto tra i fattori di amplificazione calcolati con modellazione 1D e 2D. Sono inoltre riportati i FA calcolati con approccio semplificato (abachi DGR 1919/2013). In rosso sono evidenziate le amplificazioni più significativamente alte ricavate con la modellazione 2D.

In sintesi, i dati evidenziano come le maggiori amplificazioni ricavate dalle simulazioni di RSL bidimensionali in alcuni areali di studio già in precedenza indicati (es. conoide detritica/colluviale; terrazzo di fondovalle a ridosso di versanti più acclivi), risultino più elevate anche rispetto ad esiti ottenuti dall'analisi numerica di RSL monodimensionali. Le differenze più significative si riscontrano, in particolar modo, negli spettri di risposta (in accelerazione e in velocità) ricavati nei bassi intervalli di periodo, cioè fino a circa 0,3 secondi nel settore centro-occidentale del Capoluogo, con bedrock "rigido" FMA/GES (vedi figure 7.9 e 7.10). Anche nel settore centro-orientale, caratterizzato da bedrock "non rigido" FAA, i modelli di RSL 2D ricavano maggiori amplificazioni spettrali (seppure meno marcate) nell'intervallo di periodo compreso tra circa 0,1 s e 0,5 s.

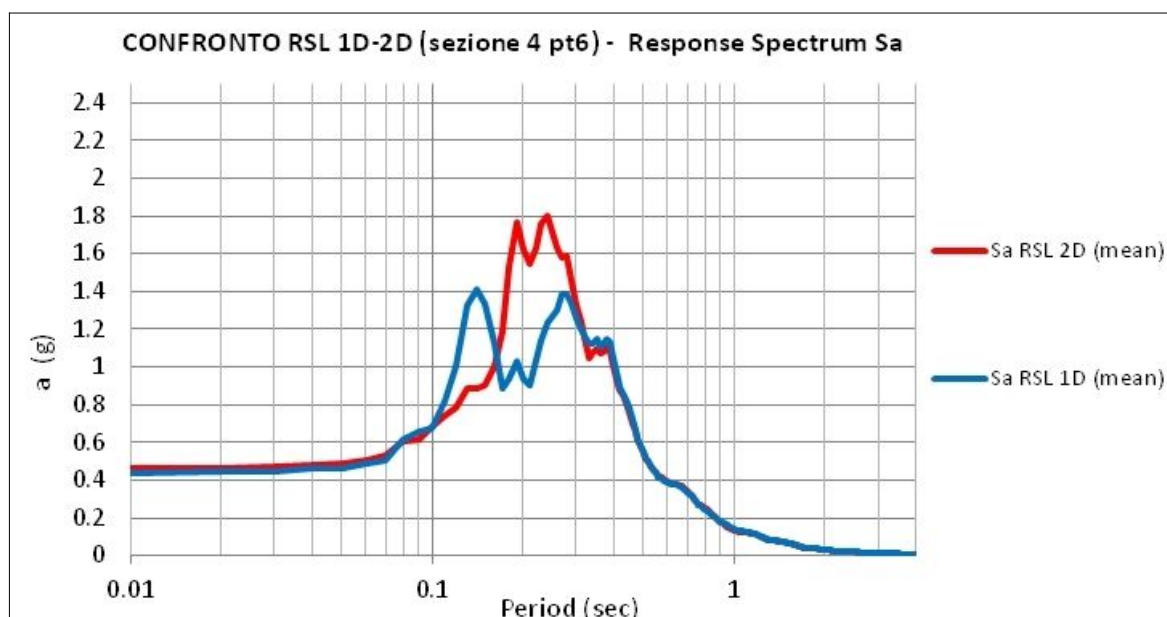


Figura 7.10 – Confronto tra spettri in accelerazione S_a calcolati con modellazione 1D e 2D (sezione 4, punto di controllo 6).

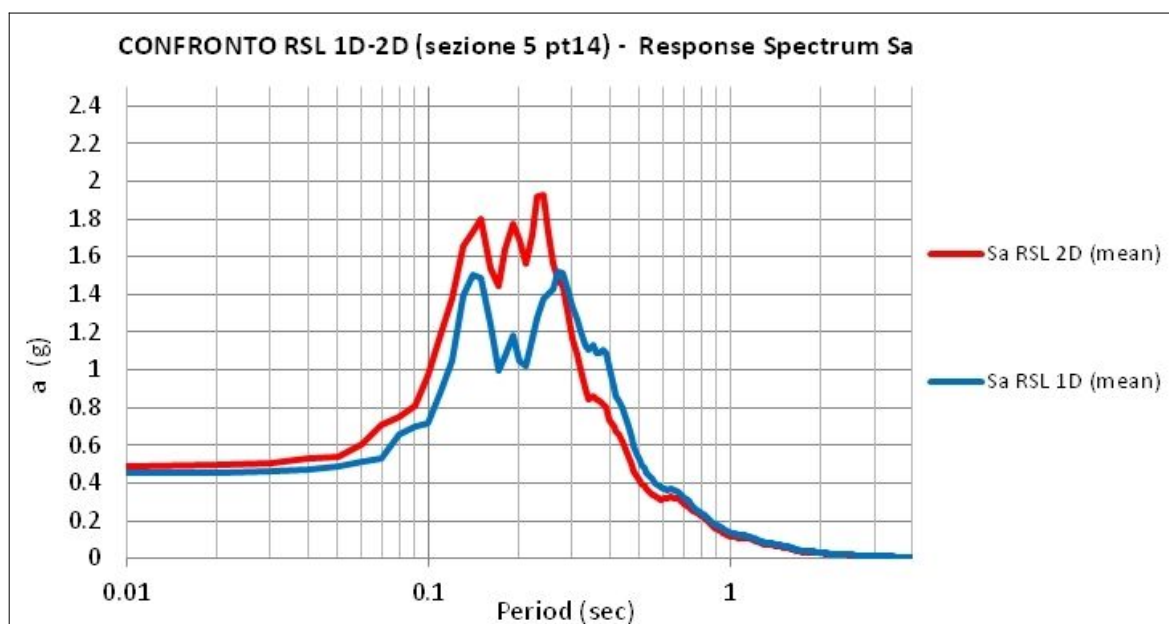


Figura 7.11 – Confronto tra spettri in accelerazione S_a calcolati con modellazione 1D e 2D (sezione 5, punto di controllo 14).

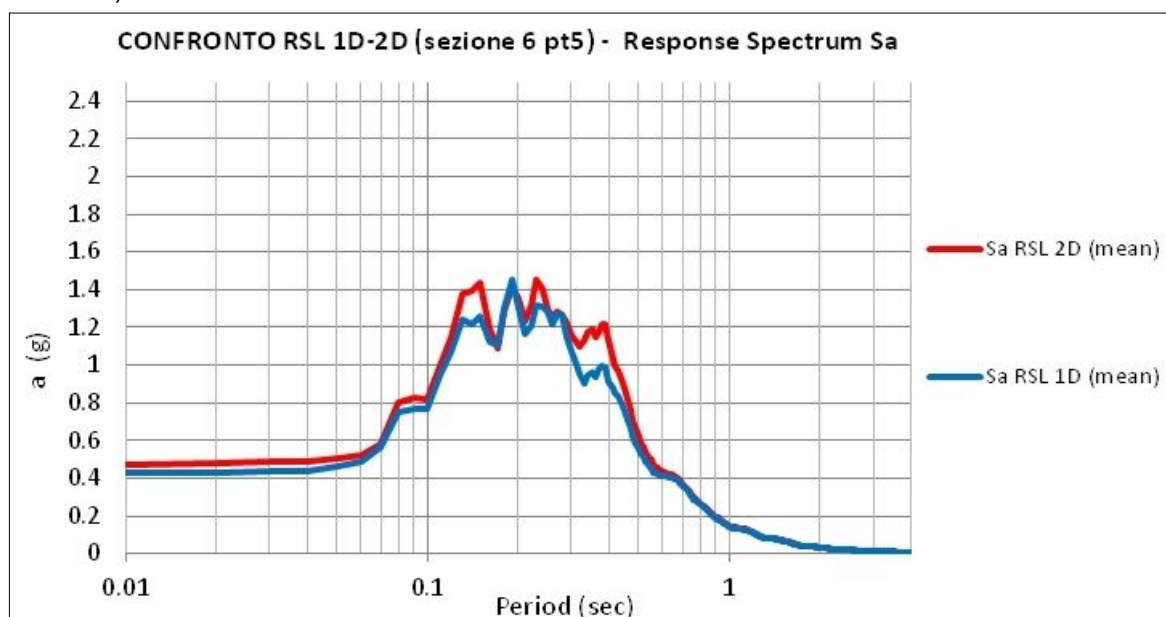


Figura 7.12 – Confronto tra spettri in accelerazione S_a calcolati con modellazione 1D e 2D (sezione 6, punto di controllo 5).

Tali esiti risultano dunque di maggiore significato per edifici di modesta elevazione e/o con periodi propri di vibrazione bassi.

I risultati sono pertanto da considerarsi come un'ulteriore conferma dell'utilità delle elaborazioni di RSL almeno bidimensionali, nei casi contraddistinti da particolari condizioni di morfologia e/o nei casi caratterizzati da evidenti eterogeneità sismostratigrafiche sepolte.

7.4 Elaborazione dei valori di H

Lo studio ha consentito di calcolare i valori di H (Naso⁵ et al., 2019), parametro che esprime lo scuotimento atteso al sito in valore assoluto (accelerazione in cm/s^2), dato dal prodotto del parametro *Acceleration Spectrum Intensity* (ASI), valore integrale dello spettro di riferimento in accelerazione calcolato per gli intervalli di periodi considerati, diviso per ΔT e moltiplicato per il fattore di amplificazione in accelerazione (FA) calcolato per lo stesso intervallo di periodi.

Gli intervalli di periodo considerati sono:

- (1) $0,1\text{s} \leq T \leq 0,5\text{s}$ per gli areali interessati da studi di microzonazione sismica di livello 2
- (2) $0,1\text{s} \leq T \leq 0,5\text{s}$, $0,4\text{s} \leq T \leq 0,8\text{s}$, $0,7\text{s} \leq T \leq 1,1\text{s}$ e $0,5\text{s} \leq T \leq 1,5\text{s}$ per gli areali interessati da studi di microzonazione sismica di livello 3

H viene così calcolato:

$$H = (\text{ASI}/\Delta T) * \text{FA}$$

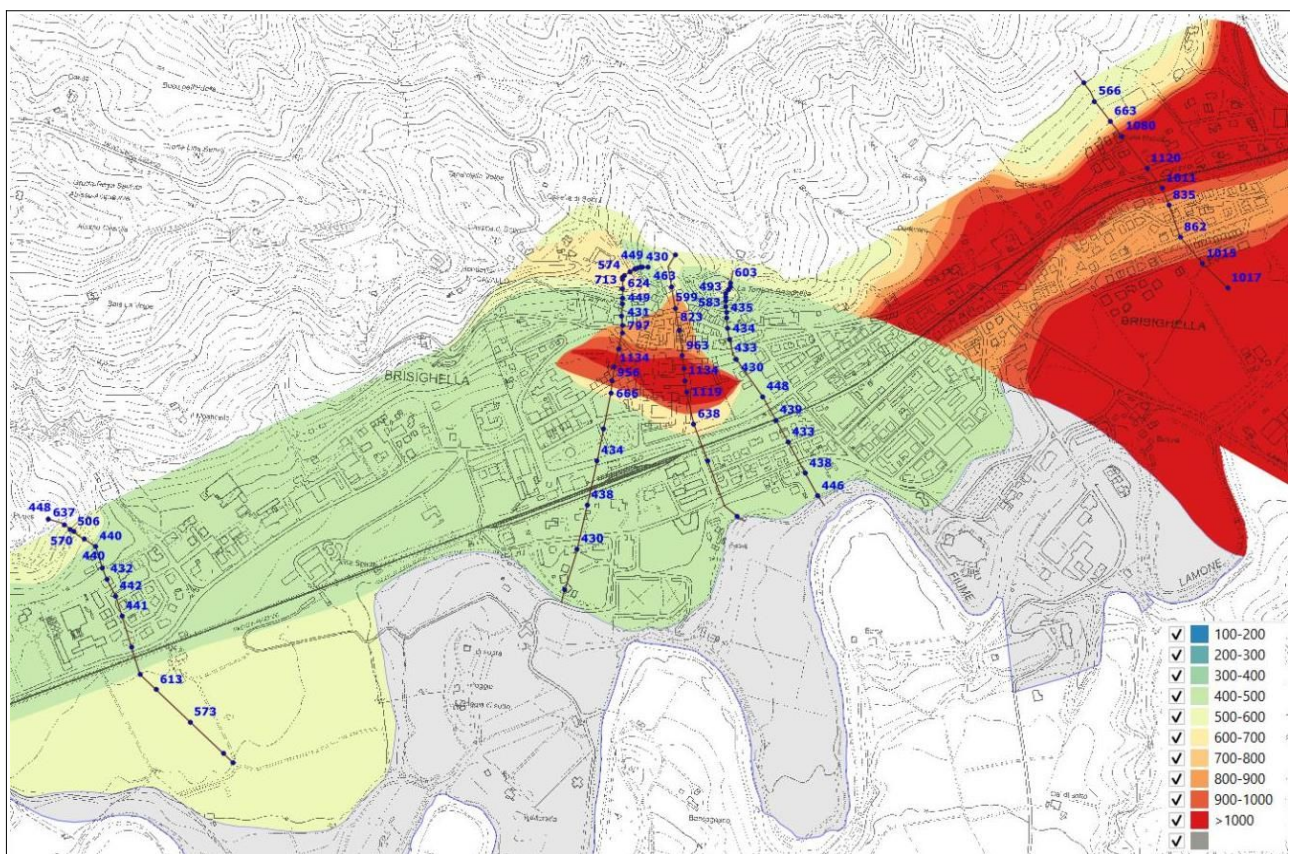


Figura 7.8 – Restituzione planimetrica dei valori di pericolosità H ricavate dalle simulazioni numeriche bidimensionali di RSL per l'areale Capoluogo.

5 "Maps for land management: from geology to seismic hazard" - Maso G.; Martelli L.; Baglione M.; Brammerini F.; Castenetto S.; D'Intinosante V.; Ercolessi G. (2019)

Si precisa che per gli areali interessati da studi di MS di livello 2 i valori di $ASI_{UHS}/\Delta T$ sono già calcolati per ogni punto della griglia INGV (disponibili nella pagina web dedicata agli indirizzi per gli studi di microzonazione sismica a cura del SGSS).

I valori di H sono stati infatti calcolati considerando:

- ✓ il punto centroide per gli areali con esiti di microzonazione sismica di livello 2;
- ✓ per l'areale Capoluogo, gli esiti delle modellazioni numeriche bidimensionali di RSL (figura 7.8), con un'ulteriore elaborazione cartografica attraverso l'analisi di interpolazione/estrapolazione e di normalizzazione dei dati puntuali (punti di controllo).

8 ELABORATI CARTOGRAFICI

Le 14 tavole cartografiche (tabella 1), sono state realizzate secondo gli standard di rappresentazione CTMS (v. 4.1) e in base ai contenuti della DGR 630/2019.

L'estensione e la forma degli ambiti comunali oggetto di studio ha imposto un dettaglio del territorio studiato alla scala 1:10.000, per consentire una rappresentazione entro la dimensione massima di una singola tavola (A0) prevista dalle linee guida della CTMS, ricorrendo alla realizzazione di diversi riquadri cartografici per ogni singola tipologia di tavola.

Per tutte carte realizzate, la base cartografica è costituita dalla Carta Tecnica Regionale in scala 1:10.000.

8.1 Carta delle Indagini (tavola 1)

Lo studio di microzonazione sismica ha consentito di riordinare e selezionare le conoscenze di sottosuolo pregresse, fondate sugli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche di repertorio e sugli esiti delle prove integrative realizzate per questo lavoro.

In questo senso, la "Carta delle Indagini", realizzata alla scala 1:10.000, permette la visione di insieme delle localizzazioni delle prospezioni geologiche e geofisiche realizzate nel territorio comunale, raccolte e archiviate in formato digitale per il presente studio, come riportato nel capitolo 4.

Tutte le indagini sono distinte con le simbologie definite negli Standard CTMS (v. 4.1).

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

8.2 Carta Geologico Tecnica (tavola 2)

La carta geologico-tecnica, realizzata alla scala 1:10.000 è un elaborato differente da una classica carta geologica o litologica, in quanto è finalizzata alla definizione del modello di sottosuolo utile per uno studio di microzonazione sismica. L'elaborazione di questa cartografia si è basata sui seguenti principali criteri:

- classi tessiturali definite secondo gli "standard di microzonazione sismica";
- si è considerata la prevalenza tessitoriale nella "colonna" di sedimenti profonda fino a -6 metri (l'intervallo di sottosuolo che rappresenta il "volume significativo" per la maggior parte dei manufatti riscontrabili nell'area di studio);

Nei paragrafi seguenti vengono descritti i principali elementi rappresentati nella carta geologico-tecnica, generalmente identificati sulla base di quanto indicato nella Carta Geologica dell'Emilia-Romagna alla scala 1:10.000, in particolare nelle aree collinari e montane.

8.2.1 Forme di superficie e sepolte

Le forme di superficie e sepolte, rivestono una certa importanza poiché mettono in evidenza alcune forme che possono influenzare il moto sismico in superficie e che quindi devono essere tenute nella giusta considerazione nelle valutazioni delle fasi successive. Sono presenti forme di "conoide alluvionale", di "falda detritica" e di "orlo di terrazzo fluviale" (10-20 m e >20 metri).

8.2.2 Terreni di copertura

Relativamente alle unità geologico-litotecniche previste dalle linee guida CTMS (v. 4.1) per la carta geologico-tecnica, nel territorio del Comune di Brisighella sono presenti "terreni di copertura" e "substrato geologico rigido o non rigido". Non si rinvenivano unità affioranti ascrivibili a "substrato geologico rigido". Secondo i criteri dettagliati al capitolo 5 per la definizione del modello geologico dell'area, sono state distinte, all'interno dei "terreni di copertura", un certo numero di differenti unità, prodotto della combinazione della litologia (sigla in maiuscolo e colore in carta) e dell'ambiente genetico-deposizionale (sigla in minuscolo) così come previsto dagli Standard della CTMS. Le suddivisioni litologiche con le relative descrizioni, indicate nella legenda delle carte, sono riportate nello schema seguente:

GC	Tessiture prevalenti nei primi metri: ghiaie argillose, miscela di ghiaia, sabbia e argilla. Ambiente deposizionale di falda detritica (fd), argine/barre/canali (es) e terrazzo fluviale (tf).
SM	Tessiture prevalenti nei primi metri: sabbie limose, miscela di sabbia e limo. Ambiente deposizionale di terrazzo fluviale (tf).
ML	Tessiture prevalenti nei primi metri: limi inorganici, sabbie fini limose o argillose e limi argillosi di bassa plasticità. Ambiente deposizionale di terrazzo fluviale (tf), eluvi/colluvi (ec) e conoide alluvionale (ca).
CL	Tessiture prevalenti nei primi metri: argille inorganiche di media-bassa plasticità, argille ghiaiose o sabbiose, argille limose, argille magre. Ambiente deposizionale di terrazzo fluviale (tf).

I colori utilizzati per i diversi terreni di copertura rappresentati sono quelli indicati dagli Standard della CTMS.

8.2.3 Substrato geologico

In tutti e tre i comuni collinari e montani è presente entro gli ambiti di studio, un substrato geologico affiorante o sub-affiorante, che nel caso di Brisighella e Casola Valsenio occupa areali piuttosto estesi. Tali perimetrazioni sono state realizzate sulla base di quanto indicato nella Carta Geologica dell'Emilia-Romagna alla scala 1:10.000, partendo dalle aree in cui non sono indicate coperture, valutando la morfologia dei luoghi e verificando la presenza di affioramenti anche consultando le foto aeree. Le diverse litologie affioranti nei diversi ambiti di studio sono descritte al paragrafo 6.2. In ogni caso per tutte le aree

distinte come substrato è stata indicata, con appositi codici e retini, la presenza di stratificazione e di un certo grado di alterazione/fratturazione.

Per quanto riguarda Brisighella, si segnala come il substrato roccioso FMA, affiorante in tutto il territorio centrale e meridionale, risulti classificato come ALS (alternanza di litotipi stratificato fratturato), mentre il bedrock gessoso GES (che interessa anche una parte centrale dell'areale Capoluogo) è stato classificato LP (lapideo). Nel settore più occidentale del territorio comunale, il substrato roccioso affiorante FAA è invece classificato come COS (coesivo sovraconsolidato stratificato).

8.2.4 Elementi geologici

Sono riportati in carta i sondaggi, sia quelli che non hanno raggiunto il substrato, sia quelli che lo hanno raggiunto, e le tracce delle sezioni geologiche allegate allo studio di microzonazione.

Sondaggi: Sono riportati in carta tutti i sondaggi, a carotaggio continuo e a distruzione di nucleo e i pozzi per acqua considerati utili per lo studio. Quelli che hanno raggiunto il substrato sono rappresentati in verde, con l'indicazione della profondità del substrato, i restanti sono rappresentati in rosso, con l'indicazione della profondità raggiunta.

Tracce di sezione geologica: Vengono riportate le tracce delle sezioni geologiche riportate nell'allegato 1 alla presente relazione. Due sezioni, sono tratte dall'archivio del Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna e caratterizzano il sottosuolo profondo con un dettaglio sufficiente per ciascuno dei contesti stratigrafici che attraversano.

Sono inoltre riportate le tracce delle cinque nuove sezioni elaborate per gli approfondimenti sismici di livello 3 e riferite all'areale Capoluogo. Queste nuove sezioni sono state elaborate sulla base dei dati di sottosuolo (sondaggi e penetrometrie) disponibili e offrono un miglior dettaglio della stratigrafia meno profonda e comunque fino al substrato sismico.

Relativamente ad altri tematismi previsti dalle linee guida per la carta geologico tecnica, si riportano anche gli ulteriori elementi tettonico strutturali superficiali ritenuti significativi per uno studio di microzonazione sismica anche nel territorio più ampio (extraurbano).

8.2.5 Instabilità di versante

Partendo dalle indicazioni presenti nella Carta Geologica dell'Emilia-Romagna alla scala 1:10.000, sono state individuate e verificate sulle fotografie aeree, le aree in cui sono presenti frane attive o quiescenti, distinte e codificate ciascuna sulla base della propria origine (scivolamento, scorrimento, crollo, ecc.).

8.3 Carta delle Frequenze Naturali dei Terreni (tavola 3)

Nelle carte delle frequenze naturali dei terreni non è stato possibile realizzare una affidabile e significativa suddivisione del territorio dei comuni in aree per classi di frequenza. Rispetto alla mappa prodotta per la MS di livello 2, la rappresentazione cartografica è stata rivista e in particolare sono stati riportati i punti di misura di rumore ambientale, con l'indicazione del valore della frequenza di risonanza fondamentale (f_0) registrata. I punti di misura sono inoltre rappresentati con classificazione delle frequenze di risonanza e classificazione della massima intensità H/V registrata. I dati acquisiti attraverso la campagna di misure di microtremore realizzata a supporto del presente studio, correlati coi dati geognostici disponibili, hanno in diversi casi consentito di individuare la profondità del principale contrasto di impedenza in genere posto alla base delle coperture (Castellaro et al., 2005), al tetto di quello che può essere definito il substrato rigido (paragrafo 6.2) e di individuare quindi le caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo importanti dal punto di vista dell'influenza sul moto sismico in superficie, per la definizione dei fattori di amplificazione, in particolare di quelli determinati con approccio semplificato (paragrafo 7.1). Si limitano infine a poche unità le verticali in cui si sono registrati valori del picco di frequenza fondamentale non in linea con le caratteristiche della zona MOPS di appartenenza, probabilmente in ragione di qualche anomalia locale.

Si sottolinea come tale cartografia, non prevista dagli indirizzi e dalle linee guida nazionali, sia invece molto utile per conoscere la frequenza di risonanza dei terreni all'interno degli ambiti di studio. Tale informazione può infatti risultare assai utile per la pianificazione territoriale: come noto da tempo e come recentemente verificato anche a seguito del terremoto de L'Aquila del 2009 e dell'Emilia del 2012, in corrispondenza di picchi significativi di H/V i terreni possono essere soggetti a fenomeni di amplificazione sismica locale (Mucciarelli, 2012). In particolare, gli effetti di sito a carico delle strutture sono tanto più rilevanti quanto più la frequenza di risonanza del suolo è prossima a quella degli edifici. La possibile occorrenza di tale fenomeno, noto come "doppia risonanza", può quindi essere prevista, sulla base delle indicazioni della Carta delle frequenze naturali dei terreni, già in fase di pianificazione territoriale.

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

La carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS), è stata aggiornata per risultare conforme anche con i contenuti della DGR 630/2019. Ciò detto, la cartografia MOPS aggiornata presenta la suddivisione del territorio dei comuni in "Zone suscettibili di amplificazioni locali" e "Zone di attenzione per instabilità", oltre a riportare le stesse "forme di superficie e sepolte" già presenti nella carta geologico tecnica (tavola 2, paragrafo 8.2.1), i punti di misura di rumore ambientale e le tracce delle sezioni topografiche realizzate per determinare i fattori di amplificazione "ft" (queste ultime stralciate per gli ambiti di studio di Brisighella in quanto le modellazioni di RSL bidimensionale hanno

consentito il ricalcolo dell'amplificazione complessiva). Tale carta rappresenta l'elaborato fondamentale della microzonazione sismica di livello 1.

Per quanto riguarda la distinzione delle diverse zone MOPS, si rammenta che, per consentire la stesura di cartografie coerenti tra i Comuni dell'Unione, si sono attribuiti alla medesima zona MOPS ambiti territoriali ricadenti anche in Comuni diversi. È da segnalare, come esempio, l'areale di studio presso la località Marzeno, risultato "diviso" dal limite amministrativo tra il Comune di Faenza e quello di Brisighella.

Zone stabili

1012	Lapideo
1041	Alternanza di litotipi stratificato

Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali


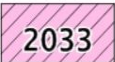
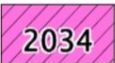


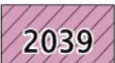
2099	Zona 99 – Substrato geologico affiorante molto fratturato o alterato.
2001	Zona 1 – Piana terrazzata intravalliva o versante con limitate coperture alluvionali e colluviali fini e ghiaiose (AES7, AES8, AES8a) sovrastanti substrato marino "rigido", in parte "detensionato" (Formazione Marnoso-Arenacea). Spessore delle coperture: H=5 m (limitate alluvioni + bedrock alterato).
2002	Zona 2 – Piana terrazzata intravalliva con successioni irregolari alluvionali fini più o meno consistenti e parzialmente ghiaiose (AES7, AES8, AES8a), sovrastanti substrato marino "rigido", in parte "detensionato" (Formazione Marnoso-Arenacea/Formazione della Vena del Gesso). Spessore delle coperture: H=10 m (alluvioni + bedrock alterato).
2003	Zona 3 – Piana terrazzata intravalliva con successioni irregolari alluvionali e colluviali fini più o meno consistenti e parzialmente ghiaiose (AES7, AES8, AES8a), sovrastanti substrato marino "rigido", in parte "detensionato" (Formazione Marnoso-Arenacea). Spessore delle coperture: H=20 m (dep. colluviali/alluvioni + bedrock alterato).
2004	Zona 4 – Conoide prevalentemente detritica sepolta con successioni alluvionali e colluviali fini più o meno consistenti e parzialmente ghiaiose (AES7, AES8, AES8a), sovrastanti substrato marino "rigido", in parte "detensionato" (Formazione Marnoso-Arenacea). Spessore delle coperture: H fino a 25 m (dep. colluviali/detrito/alluvioni + bedrock alterato).
2005	Zona 5 – Piana di fondovalle subattuale (AES8a) sovrastante substrato marino "non rigido" (Argille Azzurre). Spessore coperture: H=15 m (alluvioni + bedrock alterato).
2008	Zona 8 – Piana terrazzata intravalliva con successioni di alluvioni fini più o meno consistenti e parzialmente ghiaiose (AES7, AES8) sovrastante substrato marino "non rigido" (Argille Azzurre). Spessore coperture: H=20 m (alluvioni + bedrock alterato).
2011	Zona 11 – Versante con substrato marino subaffiorante "non rigido" (Argille Azzurre).

La classificazione delle zone MOPS ha seguito, pertanto, una numerazione progressiva unica per tutti i Comuni dell'Unione.

Sulla base delle caratteristiche della successione litostratigrafica, per lo studio di MS di Brisighella si sono distinte: due zone "stabili" (substrato rigido affiorante) e otto zone "stabili suscettibili di amplificazioni", riportate nel precedente schema (con relative descrizioni). Come si può notare, per ciascuna classe è riportato lo spessore delle coperture che è stato considerato nel calcolo dei fattori di amplificazione, comprensivo di un'eventuale porzione di bedrock alterato.

Rispetto alle diverse litologie (superficiali) distinte nella carta geologico-tecnica, estendendo la valutazione a profondità maggiore, si è cercato di arrivare a delle semplificazioni, accorpendo alcune stratigrafie analoghe e cercando di utilizzare un criterio di similarità dal punto di vista della possibile risposta sismica e delle eventuali criticità locali. In conseguenza del lavoro congiunto di revisione delle stratigrafie-tipo dello studio del 2009, si rammenta che i codici attribuiti alle MOPS possono non essere progressivi sul singolo Comune dell'Unione.

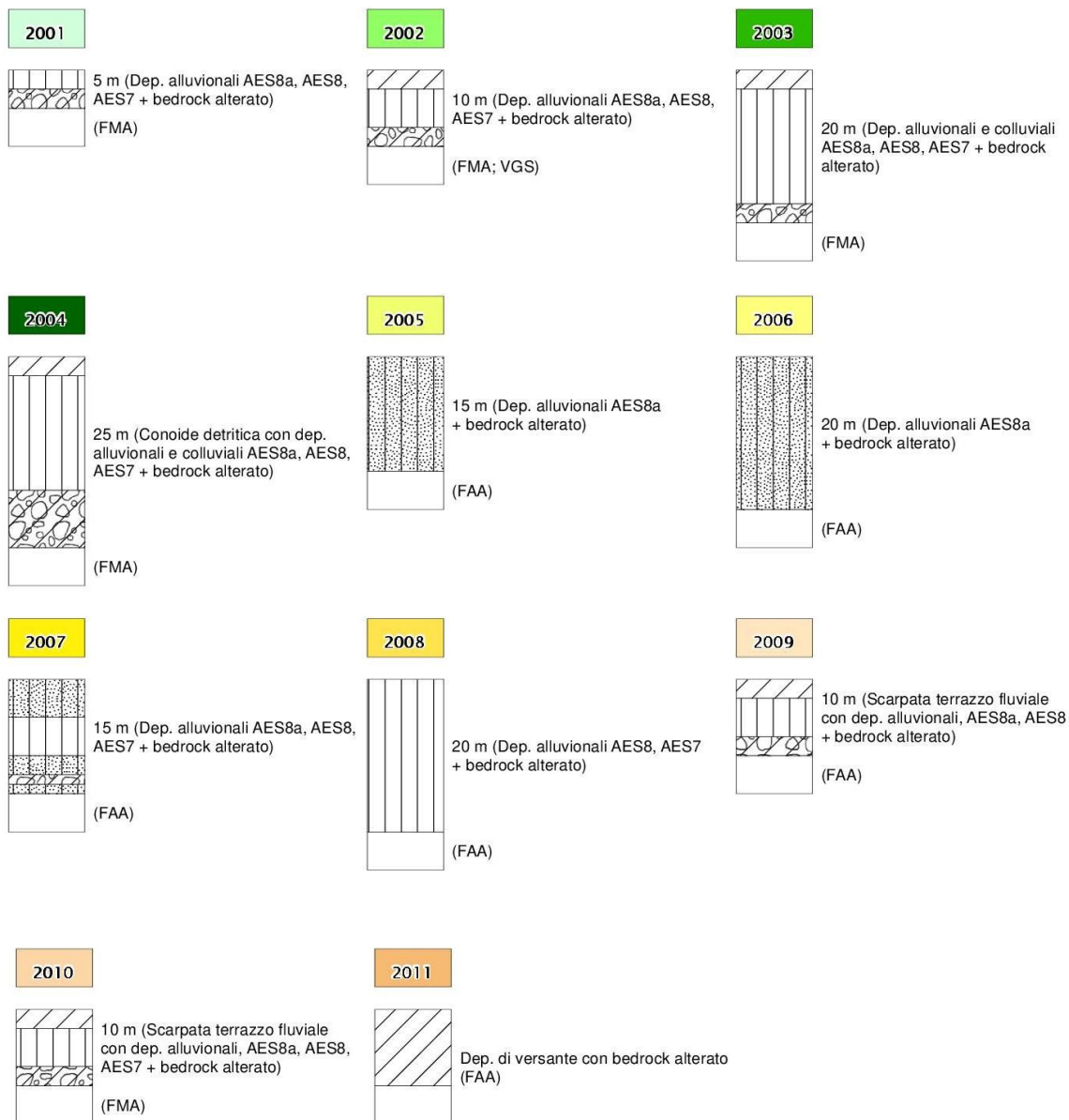
Zone di attenzione per instabilità

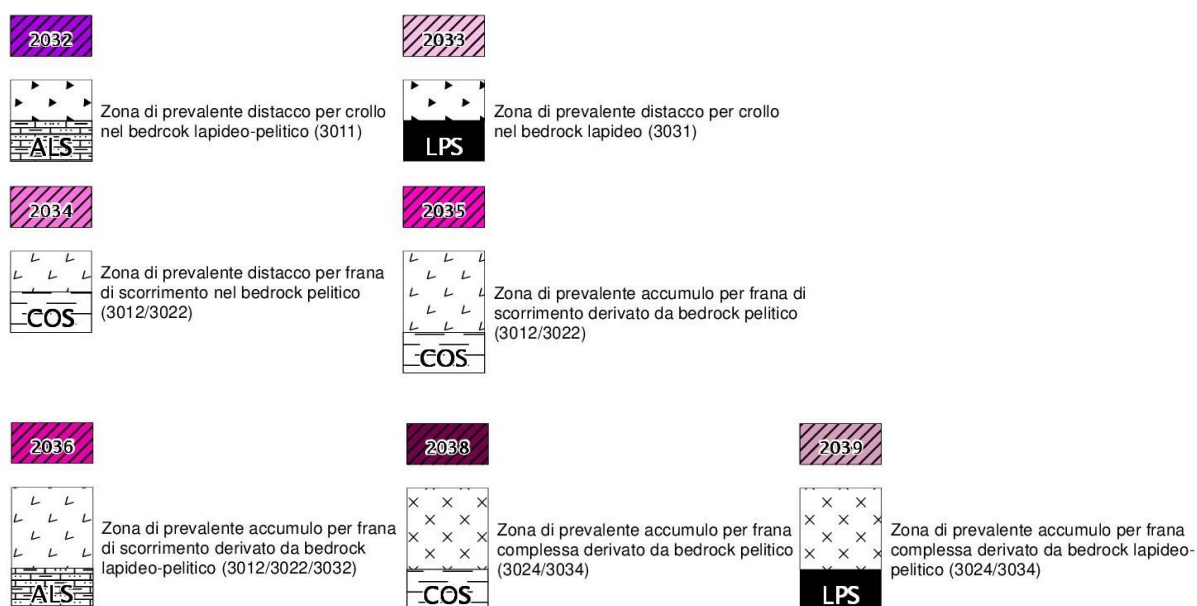
	ZA_FR 32 (3011) – Zona di prevalente distacco per crollo nel bedrock lapideo-pelitico, con spessori medi minori di 3 metri.
	ZA_FR 33 (3031) – Zona di prevalente distacco per crollo nel bedrock lapideo, con spessori medi minori di 3 metri.
	ZA_FR 34 (3012) – Zona di prevalente distacco per frana di scorrimento nel bedrock pelitico, con spessori medi minori di 3 metri.
	ZA_FR 36 (3012) – Zona di prevalente accumulo per frana di scorrimento derivato da bedrock lapideo-pelitico, con spessori medi compresi tra 3 e 10 metri.
	ZA_FR 38 (3024) – Zona di prevalente accumulo per frana complessa derivato da bedrock pelitico, con spessori medi minori di 3 metri.
	ZA_FR 39 (3024) – Zona di prevalente accumulo per frana complessa derivato da bedrock lapideo-pelitico, con spessori medi compresi tra 3 e 10 metri.

Le "Zone di attenzione per instabilità" presenti all'interno del territorio indagato sono riconducibili a instabilità di versante (crolli; scorrimenti; frane complesse). Per quanto riguarda Brisighella, questo studio ha consentito un ulteriore aggiornamento dei dissesti di versante interferenti con le aree di studio, riconducibili ad alcuni crolli, scorrimenti e frane classificate complesse. Lo studio, in particolare, ha rettificato alcuni refusi e aggiornato gli elementi cartografici come desunto dall'Inventario del dissesto predisposto dal SGSS regionale. Non si è reputato utile effettuare specifici approfondimenti sulla stabilità in quanto tali zone interessano settori relativamente limitati degli areali studiati e/o condizioni di interferenza da ritenersi non significative. Si tratta, inoltre, di dissesti che risultano già

interessati da interventi di messa in sicurezza. Nel Capoluogo, ad esempio, la parete a tergo dell'abitato storico con substrato roccioso costituito da Gessi in affioramento, è stata storicamente coinvolta da distacchi e crolli, con successivi rilievi di monitoraggio e controllo ed interventi di disaggancio e di consolidamento.

Qui di seguito vengono riportati gli schemi aggiornati dei rapporti litostratigrafici più significativi per le zone individuate negli studi di MS dei Comuni di Brisighella, Casola Valsenio e Riolo Terme, così come richiesto dagli Standard CTMS:





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

Nella carta della velocità delle onde di taglio realizzata alla scala 1:10.000, sono riportati i punti di misura di V_s di archivio e nuova realizzazione utilizzati per associare alle singole zone MOPS il corretto fattore di amplificazione utilizzando gli abachi. Su ciascun punto è indicato il valore di V_{s30} o V_{sH} , cioè fino al bedrock o pseudo-bedrock sismico (paragrafo 6.3). Si sottolinea che non tutti i valori di velocità sono stati riportati nella carta, ma sono stati esclusi tutti quelli delle indagini che hanno restituito modelli sismo-stratigrafici non coerenti con i dati disponibili o che presentano una evidente sovrastima dei valori di V_s .

In alcuni casi si è preferito infatti utilizzare delle modellazioni fatte sulla base dei risultati delle misure di microtremore e comunque correlate con dati stratigrafici, che per quanto affette da incertezze, possono comunque fornire utili indicazioni (Castellaro et al., 2005). Per Brisighella, si è potuto tuttavia disporre di ulteriori esiti di V_s ricavate in modo diretto da prove sismiche in foro tipo "Down-Hole" (eseguite nel Capoluogo). Per questo studio, sono stati eseguiti tre stendimenti sismici a rifrazione (due eseguiti nel Capoluogo e uno nella frazione Fognano) e ulteriori indagini MASW eseguite prevalentemente nelle frazioni.

Per quanto riguarda l'areale Capoluogo, gli esiti di V_s sono risultati di riferimento per la modellazione della Risposta Sismica Locale nelle MOPS interessate dagli approfondimenti di "livello 3". Negli altri areali di studio i dati di V_s , opportunamente correlati con altri dati

geognostici e geofisici, sono stati associati alle singole zone MOPS per definire il corretto fattore di amplificazione utilizzando gli abachi⁶.

8.6 Carta di microzonazione sismica di livello 3 (tavole da 6 a 13)

Le carte di microzonazione sismica di livello 3, sono state realizzate secondo quanto richiesto nelle linee guida della CTMS (v. 4.1) e conformi anche con i contenuti della DGR 630/2019.

Le cartografie identificano le "Zone stabili", le "Zone suscettibili di instabilità" e le "Zone suscettibili di amplificazioni locali" e rappresentano gli elaborati finali di sintesi del presente studio di microzonazione sismica.

Tali carte aggiungono alle zone MOPS la quantificazione dei seguenti fattori di amplificazione previsti dagli indirizzi regionali (DGR 630/2019):

- ✓ Carta di microzonazione sismica di livello 3 – FA_{PGA} (tavola 6a) → riporta il fattore di amplificazione FA_{PGA} (rapporto tra le massime ampiezze dell'accelerazione orizzontale in superficie e al bedrock sismico (PGA/PGA_0));
- ✓ Carta di microzonazione sismica di livello 3 $FA_{0,1-0,5s}$ (tavole 7a) → riporta il fattore di amplificazione FA_{SA} (rapporto di Intensità di spettrale in accelerazione in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,1 e 0,5 secondi);
- ✓ Carta di microzonazione sismica di livello 3 $FA_{0,4-0,8s}$ (tavole 8a) → riporta il fattore di amplificazione FA_{SA} (rapporto di Intensità di spettrale in accelerazione in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,4 e 0,8 secondi);
- ✓ Carta di microzonazione sismica di livello 3 $FA_{0,7-1,1s}$ (tavole 9a) → riporta il fattore di amplificazione FA_{SA} (rapporto di Intensità di spettrale in accelerazione in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,7 e 1,1 secondi);
- ✓ Carta di microzonazione sismica di livello 3 $FA_{0,5-1,5s}$ (tavole 10a) → riporta il fattore di amplificazione FA_{SA} (rapporto di Intensità di spettrale in accelerazione in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,5 e 1,5 secondi). Solo per gli areali interessati da analisi di RSL numerica;
- ✓ Carta di microzonazione sismica di livello 3 $FH_{0,1-0,5s}$ (tavole 10a) → riporta il fattore di amplificazione FA_{SI} (rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,1 e 0,5 secondi);
- ✓ Carta di microzonazione sismica di livello 3 $FH_{0,5-1,0s}$ (tavole 11a) → riporta il fattore di amplificazione FA_{SI} (rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,5 e 1,0 secondi);

⁶ L'aggiornamento dello Studio di MS dei Comuni di Faenza e Solarolo ha consentito di utilizzare gli abachi riportati nella DGR 630/2019 negli areali interessati esclusivamente da approfondimenti di livello 2

- ✓ Carta di microzonazione sismica di livello 3 $FH_{0,5-1,5s}$ (tavole 13a) → riporta il fattore di amplificazione FA SI (rapporto di Intensità di Housner in superficie e al bedrock sismico per periodo compreso tra 0,5 e 1,0 secondi). Solo per gli areali interessati da analisi di RSL numerica.

8.7 Carta della distribuzione dei valori di H (tavole 14 e 15)

Le mappe di pericolosità sismica denominate <<Carta della distribuzione dei valori di H_{SM} >> e << Carta della distribuzione dei valori di $H_{0,408}$, $H_{0,711}$, $H_{0,515}$ >> sono state elaborate alla scala 1:10.000 per consentire di rappresentare cartograficamente gli esiti di H desunti per i quattro intervalli di periodo considerati.

9 BIBLIOGRAFIA

- AA.VV. (2005) - *Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation*. Deliverable D23.12 of the SESAME project, 62 pp, April 2005. Available at <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.
- Albarelo D. e Castellaro S. (2011) - *Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola*. In AA.VV. (2011) - *Contributi per l'aggiornamento degli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica"*. Supplemento alla rivista *Ingegneria Sismica* Anno XXVIII - n.2.
- Amorosi A., Caporale L., Cibin U., Colalongo M.L., Pasini G., Ricci Lucchi F., Severi P & Vaiani S.C. (1998a) – *The Pleistocene littoral deposits (Imola Sands) of the Northern Apennines foothills*. *Il Giornale di Geologia*, 60, 83-118.
- Amorosi A., Barbieri M., Castorina F., Colalongo M.L., Pasini G. & Vaiani S.C. (1998b) – *Sedimentology, micropaleontology and strontium-isotope dating of a lower-middle Pleistocene marine succession ("Argille Azzurre") in the Romagna Apennines, northern Italy*. *Boll. Soc. Geol. It.*, 117, 789-806.
- Basili R., Valensise G., Vannoli P., Burrato P., Fracassi U., Mariano S., Tiberti M.M. e Boschi E. (2008) - *The Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), version 3: summarizing 20 years of research on Italy's earthquake geology*. *Tectonophysics*.
- Boccaletti M., Coli M., Eva C., Ferrari G., Giglia G., Lazzarotto A., Merlanti F., Nicolich R., Papani G. & Postpischl D. (1985) - *Considerations on the seismotectonics on the Northern Apennines*. *Tectonophysics*, 117, 7-38.
- Boulanger R. W. e Idriss I. M. (2004) - *Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes*. Proc., 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, and 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, D. Doolin et al., ed Stallion Press, Vol. 1, 32-56.
- Boulanger R. W. e Idriss I. M. (2007) – *Evaluation of cyclic softening in silts and clays*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 133(6): 641-52.
- Castellaro S., Mulargia F. e Bianconi L. (2005) - *Passive Seismic Stratigraphy: A new efficient, fast and economic technique*. *Geologia e tecnica ambientale*, 3.
- Castellaro S. e Mulargia F. (2011) - *Seismic soil classification from a different perspective*. Annual meeting of the Seismological Society of America, Memphis (Tennessee, USA), Apr. 13-15.
- Castellaro S. (2012) - *H/V: un contributo oltre Vs30*. In "Tecniche speditive per la stima dell'amplificazione sismica e della dinamica degli edifici" a cura di Mucciarelli M..

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

Commissione tecnica per la microzonazione sismica (2018) - *Microzonazione sismica - Standard di rappresentazione e archiviazione informatica versione 4.1*.

Crespellani, Nardi, Simoncini (1991) – *La liquefazione del terreno in condizioni sismiche*. Zanichelli, Bologna.

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

Elmi, Zecchi (1982) – *Note sulla sismicità dell'appennino emiliano-romagnolo*. In Guida alla geologia del margine appenninico-padano. Società Geologica Italiana – Guide Geologiche regionali, Bologna.

Facciorusso, J., Madiari C., Vannucchi G., Martelli, L. (2012). *Analisi di dettaglio finalizzata alla valutazione della pericolosità di liquefazione: il caso della costa adriatica romagnola*. In: “La microzonazione sismica per la gestione del territorio. L’esperienza della regione Emilia-Romagna”. Regione Emilia-Romagna Eds.

Facciorusso, J., Madiari C., Vannucchi G., (2013). *Confronto tra metodi semplificati di stima del rischio di liquefazione da prove CPT e CPTU*. Università degli Studi di Firenze – Facoltà di Ingegneria – Sezione geotecnica.

Galli P., Castenetto S., Peronace E. (2012) – *Terremoti dell'Emilia – maggio 2012 – Rilievo Macrosismico MCS speditivo – Rapporto finale*. Dipartimento della Protezione Civile – Ufficio Rischio Sismico e Vulcanico.

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

Gruppo di lavoro MS (2008) – *ICMS, Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica*. Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome - Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 3 vol. e Dvd. Disponibili nel sito web del Dipartimento della Protezione Civile, area “Rischio Sismico” all’indirizzo: http://www.protezionecivile.it/cms/view.php?dir_pk=395&cms_pk=15833

Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Comastri A., Tarabusi G., Sgattoni G., Valensise G. (2018) - *CFTI5Med, Catalogo dei Forti Terremoti in Italia (461 a.C.-1997) e nell'area Mediterranea (760 a.C.-1500)*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). doi: <https://doi.org/10.6092/ingv.it-cfti5>.

Guidoboni E., Ferrari G., Tarabusi G., Sgattoni G., Comastri A., Mariotti D., Ciuccarelli C., Bianchi M.G., Valensise G. (2019), *CFTI5Med, the new release of the catalogue of strong earthquakes in Italy and in the Mediterranean area*, Scientific Data 6, Article number: 80 (2019). doi: <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0091-9>

Gruppo di lavoro MPS04 (2004) - *I dati online della pericolosità sismica in Italia*. <http://esse1-gis.mi.ingv.it/>.

ISIDe Working Group (2010) - *Italian Seismological Instrumental and parametric database*. [Online], Available: <http://iside.rm.ingv.it>.

ISPRA, Regione Emilia-Romagna, Università di Bologna (2009a) - *Progetto CARG, Carta geologica Foglio 238 e "Note illustrative della Carta Geologica d'Italia" – Foglio 238*.

ISPRA, Regione Emilia-Romagna, Università di Bologna (2009b) - *Progetto CARG, Carta geologica Foglio 239 e "Note illustrative della Carta Geologica d'Italia" – Foglio 239*.

Krijnsman W., Hilgen F.J., Marabini S. e Vai G.B. (1999) – *New paleomagnetic and cyclostratigraphic age constraints on the Messinian of the Northern Apennines (Vena del Gesso Basin, Italy)*. Mem.Soc. Geol. Ital., 54, 25-33.

Lanzo G. & Silvestri F. (1999) – *Risposta Sismica Locale*. Edizioni Hevelius.

Locati, R. Camassi e M. Stucchi (a cura di), 2015. DBMI15.

Marabini S. e Poggiali A. (2009) - *Microzonazione sismica degli ambiti urbani. Quadro Conoscitivo, allegato 1 del Piano Strutturale Comunale Associato di Faenza, Brisighella, Casola Valsenio, Castel Bolognese, Riolo Terme e Solarolo*. Coordinamento scientifico: Direzione Generale Ambiente e difesa del Suolo e della Costa - Regione Emilia-Romagna.

Martelli L., Calabrese L., Ercolessi G., Severi P., Romani M., Tarabusi G., Pileggi D., Rosselli S., Minarelli L., Pergalani F., Compagnoni M., Vannucchi C., 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. Con il contributo di Manicardi A., Mengoli B., Ugoletti C. e Ricci L. (2013) - *Microzonazione sismica dell'area epicentrale del terremoto della pianura Emiliana del 2012 (Ord. 70/2012)*. Atti del 32° Convegno Nazionale del Gruppo Nazionale di Fisica della Terra Solida, Trieste, ISBN: 978-88-902101-7-4.

Meletti C. e Valensise G. (a cura di) (2004) - *Zonazione sismogenetica ZS9 - App.2 al Rapporto conclusivo*. Gruppo di lavoro per la redazione della mappa di pericolosità sismica (Ordinanza PCM 3274/2003), Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. <http://zonesismiche.mi.ingv.it/documenti/App2.pdf>.

Ministero delle Infrastrutture (2018) – D.M. 17/01/2018 (G.U. n.42 del 20/02/2018 – Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni).

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. Applic., Vol. 60*.

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

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

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

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

Regione Emilia-Romagna (Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli) – CNR, Istituto di Geoscienze e Georisorse sez. Firenze – Università degli Studi di Firenze, DST - INGV, sez. di Bologna (2017) - *Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna ed aree limitrofe - scala 1:250.000.*

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

Regione Emilia Romagna – *Delibera della Giunta Regionale n.2193/2015 - "Art. 16 della L.R. n.20 del 24/3/2000. Approvazione aggiornamento dell'atto di coordinamento tecnico denominato <<Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale ed urbanistica>>, di cui alla deliberazione dell'Assemblea Legislativa 2 maggio 2007, n. 112".*

Regione Emilia Romagna – *Delibera della Giunta Regionale n.630/2019 - "Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R: n.24/2017".*