PROTEZIONE CIVILE
Presidenza del Consiglio dei Ministri
Dipartimento della Protezione Civile

RegioneEmilia-Romagna

CONFERENZA DELLE REGIONI E DELLE PROVINCE AUTONOME

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

MICROZONAZIONE SISMICA

Relazione illustrativa

Regione Emilia-Romagna

Comune di Forlì



Regione	Soggetto realizzatore	Data
Emilia-Romagna	EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY www.engeo.it Direzione tecnica Dott. Geol. Carlo Caleffi Dott. Geol. Francesco Cerutti Collaboratori Dott. Geol. Matteo Baisi Dott. Geol. Matteo Bertolotti Dott. Geol. Alessandro Ferrari Dott.ssa Geol. Melinda Raimondo	Dicembre 2024 MS3

INDICE

1. Introduzione 4
1.1. Motivazione dello studio di terzo livello 5
1.2. Articolazione dello studio 6
2. Definizione della pericolosità di base e degli eventi di riferimento 8
2.1. Sismicità del territorio 8
2.2. Caratteristiche sismotettoniche 14
2.3. Classificazione sismica comunale 24
2.4. Il rischio sismico definito nel PTCP della Provincia di Forlì-Cesena 25
3. Assetto geologico e geomorfologico dell'area 28
3.1. Geologia 28
3.2. Geomorfologia 35
4. Indagini ed analisi 37
4.1. Sondaggio a carotaggio continuo 38
4.2. Analisi di laboratorio 39
4.3. Prove penetrometriche con punta elettrica e piezocono (CPTU) 39
4.4. Prove penetrometriche con piezocono sismico (SCPTU) 39
4.5. Tomografie elettriche ERT 41
4.6. Prova sismica in foro di tipo Down-Hole 45
4.7. Prove sismiche di tipo HVSR 47
4.8. Prove sismiche di tipo MASW-ReMi 50
4.8.1. Strumentazione utilizzata 50
4.8.2. Geometria dello stendimento e modalità di acquisizione 50
4.8.3. Elaborazione congiunta MASW + ReMi + HVSR 52
5. Analisi di risposta sismica locale 55
5.1. Pericolosità sismica di base 57
5.2. Segnali in input 57
5.3. Modello geofisico del sottosuolo 59
5.3.1. Litologia 59
5.3.2. Determinazione della Vs e del bedrock sismico 59
5.3.3. Curva di variazione dello smorzamento (D) e della rigidezza (G/G_0) in funzione della deformazione 61
5.4. Procedura di analisi RSL 64
5.4.1. Metodo lineare equivalente 64
5.4.2. Soluzione alla singola iterazione mediante FEM 66
5.4.3. Smorzamento 67
5.4.4. Procedimento iterativo 68
5.4.5. Interpretazione dei risultati 68
5.5. Analisi dei risultati 68
5.5.1. Spettro di risposta elastico normalizzato 71

5.6. Modelli e risultati della modellazione numerica 72
5.6.1. RSL.1 per il sito "zona Nord" 73
5.6.2. RSL.2 per il sito "Roncadella e Zona Fiera" 76
5.6.3. RSL.3 per il sito "Villafranca" 79
5.6.4. RSL.4 per il sito "La Selva" 82
5.6.5. RSL.5 per il sito "Centro città" 85
5.6.6. RSL.6 per il sito "Quattro e Carpena" 88
5.6.7. RSL.7 per il sito "Villagrappa e San Lorenzo" 91
5.6.8. RSL.8 per il sito "zona Ospedale" 94
5.6.9. RSL.9 per il sito "via Gandhi" 96
5.7. Considerazioni sui risultati delle analisi di terzo livello 99
5.8. Verifiche del rischio di liquefazione 100
5.8.1. Analisi dei risultati 105
6. Criticità del metodo 107
6.1. Considerazioni sul bedrock sismico 108
7. Elaborati cartografici 109
7.1. Carta delle indagini 109
7.2. Carta Geologico-Tecnica per la microzonazione sismica (CGT_MS) 111
7.3. Carta delle frequenze naturali dei terreni 114
7.4. Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS) 121
7.4.1. Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali 121
7.4.2. Zone di attenzione per instabilità 123
7.5. Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs) 124
7.6. Carta di microzonazione sismica 125
7.7. Carta dello scuotimento atteso 126
8. Bibliografia 129
9. Allegati 130

1. INTRODUZIONE

Nella presente Relazione vengono descritte le attività svolte e i risultati ottenuti nel corso dello Studio di microzonazione sismica di terzo livello del Comune di Forlì, effettuato su incarico del Comune di Forlì (cfr. Determinazione n° 1335 del 08/05/2024) e finanziato con contributi di cui alla Determina n. 743 del 17/01/2024 della Regione Emilia-Romagna.

Gli studi di Microzonazione Sismica hanno l'obiettivo di razionalizzare le conoscenze in merito alle alterazioni che lo scuotimento sismico può subire in superficie e di fornire informazioni utili al governo del territorio, alla progettazione, alla pianificazione per l'emergenza e alla ricostruzione post sisma.

La MS consente di suddividere il territorio esaminato in base alla presenza e alla distribuzione dei fenomeni di possibile amplificazione dello scuotimento, legati alle caratteristiche litostratigrafiche e morfologiche delle singole aree considerate, e ai possibili fenomeni di instabilità e deformazione permanente attivati dal sisma. L'insieme di queste conoscenze sul comportamento dei terreni durante un evento sismico e sui possibili effetti indotti dallo scuotimento è un indispensabile strumento di prevenzione e di riduzione del rischio sismico, particolarmente efficace, se realizzato e applicato durante la pianificazione urbanistica, per indirizzare le scelte di trasformazione verso aree a minore pericolosità.

Tutte le attività svolte e in particolare l'elaborazione e la redazione degli elaborati richiesti, sono state effettuate nel rispetto dei seguenti riferimenti tecnici:

- Allegato 2 "Criteri per la realizzazione degli studi di Microzonazione Sismica e Analisi della Condizione Limite per l'Emergenza, di cui all'ordinanza del capo dipartimento della protezione civile n. 978/2023" della deliberazione di Giunta regionale n. 1884 del 06/11/2023 "OCDPC 24 marzo 2023, n. 978 - Attuazione dell'art. 2 comma 1 lett. b). Approvazione elenco degli enti locali destinatari dei contributi per studi di microzonazione sismica e analisi della condizione limite di emergenza" (da qui in avanti "Allegato 2 della delibera regionale");
- "Microzonazione sismica - Standard di rappresentazione e archiviazione informatica" - Versione 4.2, Roma, dicembre 2020 - e approvato nell'ambito dei lavori della Commissione tecnica per la microzonazione sismica, nominata con DPCM 21 aprile 2011 (da qui in avanti "SRAI");
- "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica" approvati dal Dipartimento della Protezione Civile e dalla Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome e successive modifiche e integrazioni (da qui in avanti "ICMS");
- Atto di coordinamento tecnico per gli studi di microzonazione sismica ai sensi della LR 24/2017 approvato con DGR 476/2021[1] e integrato con DGR 564/2021[2] (da qui in avanti "indirizzi regionali").

Tali riferimenti tecnici, negli anni, sono stati soggetti a vari aggiornamenti che hanno comportato profonde modifiche, non solo nella metodologia di archiviazione dei dati e nella rappresentazione grafica dei differenti tematismi, ma anche di natura concettuale.

[1] DGR 476/2021. Deliberazione della Giunta della Regione Emilia-Romagna n. 476 del 12 aprile 2021: Aggiornamento dell'"Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, LR 24/2017)" di cui alla deliberazione della Giunta Regionale 29 aprile 2019, n. 630. BURERT n. 111 del 20/04/2021 – Parte seconda n. 93.

[2] DGR 564/2021. Deliberazione della Giunta della Regione Emilia-Romagna n. 564 del 26 aprile 2021: Integrazione della propria deliberazione n. 476 del 12 aprile 2021 mediante approvazione dell'allegato A, "Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017)". BURERT n. 137 del 12/05/2021 – Parte seconda n. 113.

Per quanto riguarda le aree oggetto di studio, in accordo con l'Amministrazione Comunale, a fronte del secondo livello esteso sull'intero territorio, ci si è concentrati su quello urbanizzato e urbanizzabile, come predisposto per il Piano Urbanistico Generale (P.U.G.) del Comune di Forlì (in corso di assunzione) ai sensi della L.R. 24/2017.

Conseguentemente, lo studio ha interessato sia il centro urbano di Forlì che le principali frazioni, quali: Villafranca-San Martino, Carpena, San Lorenzo in Noceto, Villanova, Roncadello, Carpinello, Quattro, Villagrappa, Pievequinta, La Selva e San Leonardo.

Nel corso dell'incarico sono stati redatti, oltre alla presente relazione, gli elaborati elencali nel capitolo 9.

Essi sono stati predisposti in versione digitale (pdf, con risoluzione 300 dpi).

I dati vengono forniti anche in formato vettoriale (*shapefile*) secondo quanto indicato nel punto "Indicazioni per l'archiviazione informatica, rappresentazione e fornitura dei dati degli studi di microzonazione sismica e dell'analisi della condizione limite per l'emergenza" dell'Allegato 2 della delibera regionale.

Per la loro archiviazione e l'editing dei documenti sono stati seguiti gli standard di riferimento più recenti disponibili nel sito web del Centro per la Microzonazione Sismica e le sue applicazioni: gli SRAI (Standard di Rappresentazione e Archiviazione Informatica), Versione 4.2.

L'inserimento dei dati alfanumerici dei siti, delle indagini e dei relativi parametri è stato effettuato tramite l'utilizzo dell'apposito software: "MS – SoftMS" nella versione 4.2.

1.1. Motivazione dello studio di terzo livello

Il Comune di Forlì è già dotato di uno studio di microzonazione sismica di primo e secondo livello di approfondimento, certificato dalla Regione Emilia-Romagna, in data 06/02/2014, successivamente aggiornato dal dott. geol. Matteo Collareda e dalla dott.ssa geol. Claudia Tommasoli, nel marzo 2024.

Quest'ultimo studio, in estrema sintesi, ha consentito di pervenire alle seguenti principali conclusioni:

1. Il territorio del comune di Forlì si colloca nel margine sudorientale della pianura padana e la natura e lo spessore dei depositi alluvionali che contrassegnano il profilo stratigrafico determinano condizioni di amplificazione dell'accelerazione sismica sia verticale che orizzontale in caso di terremoto.
2. Le indagini geognostiche e geofisiche disponibili e realizzate *ex-novo* per il presente studio di Microzonazione Sismica hanno portato alla suddivisione dell'intero territorio comunale in 10 microzone omogenee in prospettiva sismica.
3. Le indagini geofisiche hanno evidenziato, in termini di frequenze naturali del sottosuolo e di velocità delle onde di taglio nei primi 30 metri di profondità, un modello sismostratigrafico del sottosuolo abbastanza regolare, compatibile con l'assetto tettonico-stratigrafico tipico delle zone pianeggianti caratterizzato da frequenti interdigitazioni tra terreni fini e materiali più grossolani.
4. Per quanto riguarda le frequenze fondamentali del terreno, tramite le rilevazioni dei microtremori sono state riscontrare differenze in termini sia di velocità che di contrasti tra le diverse porzioni del territorio comunale:
    a. nella zona a nord del centro abitato di Forlì, i terreni a bassa velocità delle onde di taglio S, caratterizzati da un lento aumento con la profondità, non hanno evidenziato evidenti contrati di impedenza. Ciò si traduce nell'assenza di amplificazione di risonanza sopra 1÷2 Hz, mentre è ben visibile in tutta l'area un'amplificazione con valori generalmente a 0.8÷1 Hz;
    b. nel settore centrale del territorio comunale, caratterizzato da terreni fini (con spessori medi pari a 5÷30 m) seguiti da terreni granulari più rigidi (sabbie e ghiaie), si rilevano moderate amplificazioni per risonanza delle coperture fini con valori generalmente > 3 Hz.

Amplificazioni a frequenze minori di 1 Hz sono dovute alla risonanza delle coperture sul substrato geologico;

c. nella fascia di raccordo pianura collina, i depositi grossolani prevalentemente ghiaiosi, di diversa origine (terrazzi, conoidi, falde detritiche), determinano picchi alle medio-alte frequenze (< 10 Hz);

d. infine, nelle aree in cui il substrato risulta affiorante (Argille Azzurre e Sabbie di Imola) l'ampiezza dei picchi è modesta con valori generalmente > 2 Hz. Tale substrato non è classificabile come *bedrock* sismico (cfr. paragrafo 6.1) in quanto contraddistinto da valori di Vs di circa 600÷700 m/s.

5. In relazione all'assetto altimetrico e alla morfologia sub-pianeggiante delle aree considerate, non sono possibili effetti di amplificazione locale dovuti all'assetto topografico.
6. In considerazione della presenza diffusa di depositi sabbiosi a partire da pochi metri dal piano campagna, evidenziata dalle indagini geognostiche analizzate, di un livello di falda, durante l'evento sismico, prossimo al piano campagna e della magnitudo massima attesa (Mwmax2 = 6,14), sono possibili fenomeni di liquefazione dei terreni. In particolare, la zona centrale del comune caratterizzata dalla frequente presenza di orizzonti liquefacibili spessi da 0.30÷0.40 a 1.00 m e sottofalda nei primi 5÷10 m, determina fenomeni di liquefazione dei terreni.
7. Per quanto riguarda al punto precedente, le microzone omogenee in prospettiva sismica 2004 e 2005 individuate dal presente studio sono state classificate come Zone di Attenzione per instabilità per possibili fenomeni di liquefazione.

Dunque, scopo di questo lavoro è la valutazione dell'effettivo grado di pericolosità derivante dai fenomeni di liquefazione dei terreni, quantificato tramite l'"Indice Potenziale di Liquefazione" LPI, attribuito a tutte le verticali oggetto di verifica.

Contestualmente, per migliorare il quadro delle conoscenze locali, si è ritenuto opportuno effettuare delle analisi di Risposta Sismica Locale, in corrispondenza di alcune situazioni stratigrafiche tipo, così da verificare la validità del modello interpretativo e consentire di valutare al meglio la vulnerabilità sismica del patrimonio edilizio esistente.

Per quanto non trattato nel presente approfondimento, si rimanda agli elaborati dello studio di secondo livello.

1.2. Articolazione dello studio

Lo studio di microzonazione di terzo livello è stato articolato nelle seguenti fasi:

1. ricerca, acquisizione e analisi critica del patrimonio cartaceo e informativo disponibile, presso l'Ufficio Tecnico del Comune di Forlì;
2. individuazione delle aree rappresentative di una situazione stratigrafica tipo definita nell'analisi precedente;
3. pianificazione e realizzazione della nuova campagna d'indagini che ha previsto:
   - n° 4 prove penetrometriche con piezocono sismico SCPTU, finalizzate all'effettuazione di analisi di Risposta Sismica Locale e alla valutazione del potenziale rischio di liquefazione;
   - n° 20 prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono CPTU, per la valutazione del potenziale rischio di liquefazione;
   - n° 1 sondaggio a carotaggio continuo fino alla profondità di 30 m, con prova sismica Down-Hole in foro per la misura delle Vs e prove di laboratorio in colonna risonante;

- n° 27 prove HVSR per la determinazione della frequenza caratteristica del terreno;
- n° 25 Array sismici MASW+ReMi, per analisi RSL, la stima della velocità delle onde sismiche e il completamento del quadro sismostratigrafico;
- n° 5 profili geoelettrici per migliorare la ricostruzione del modello geologico locale;

4. aggiornamento, con i dati delle nuove indagini e secondo gli indirizzi tecnici e gli standard più recenti, delle seguenti cartografie di primo e secondo livello:
   - Carta delle indagini;
   - Carta Geologico-Tecnica;
   - Carta delle frequenze naturali dei terreni;
   - Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica;
   - Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs);
5. valutazione della risposta sismica locale in n° 9 siti in cui si riteneva di poter disporre di sufficienti dati per la definizione del modello geofisico del sottosuolo. L'elaborazione della RSL è stata realizzata mediante codice di calcolo LSR 2D (*Local Sismic Response 2D*) Ver. 5.2.0 di STACEC;
6. calcolo dei fattori di amplificazione, per i n° 9 siti indagati, per un tempo di ritorno TR=475 anni, con smorzamento ζ=5%, relativi ai seguenti parametri rappresentativi dello scuotimento sismico:
   - FA_{PGA} = PGA/PGA_0, dove PGA_0 è l'accelerazione massima orizzontale a periodo T=0 al suolo di riferimento e PGA e l'accelerazione massima orizzontale a periodo T=0 alla superficie del sito;
   - FA_{SA} = SA/SA_0, dove SA_0 è l'integrale dello spettro di risposta in accelerazione al suolo di riferimento e SA è l'integrale dello spettro di risposta in accelerazione alla superficie del sito per prefissati intervalli di periodi T:
     - SA1 per 0.1s≤T≤0.5s,
     - SA2 per 0.4s≤T≤0.8s,
     - SA3 per 0.7s≤T≤1.1s,
     - SA4 per 0.5s≤T≤1.5s;
   - FH_{SI} = SI/SI_0, dove SI_0 è l'integrale dello spettro di risposta in velocità (Intensità di Housner) al suolo di riferimento e SI l'integrale dello spettro di risposta in velocita (o corrispondente grandezza di Intensità di Housner) alla superficie del sito per prefissati intervalli di periodi T:
     - SI1 per 0.1s≤T≤0.5s,
     - SI2 per 0.5s≤T≤1.0s,
     - SI3 per 0.5s≤T≤1.5s.
7. redazione delle cartografie di microzonazione sismica di livello 3 relative agli 8 parametri indicati al punto precedente, oltre che allo scuotimento in accelerazione (cm/s^2) atteso al sito per gli intervalli di periodi:
   - 0.1s≤T≤0.5s (cfr. Carta di microzonazione sismica - H_{SM}),
   - 0.4s≤T≤0.8s (cfr. Carta di microzonazione sismica - H_{SM} 0.4-0.8 s),
   - 0.7s≤T≤1.1s (cfr. Carta di microzonazione sismica - H_{SM} 0.7-1.1 s),
   - 0.5s≤T≤1.5s (cfr. Carta di microzonazione sismica - H_{SM} 0.5-1.5 s).
8. Verifiche a liquefazione su n° 24 nuove verticali.

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

2.1. Sismicità del territorio

Nella definizione della pericolosità sismica di una determinata area occorre, in primo luogo, definire la pericolosità di base attraverso una corretta analisi della sismicità evidenziando, sia la distribuzione spazio-temporale degli eventi, sia le caratteristiche di intensità degli stessi, seguita da una valutazione della pericolosità locale determinata dagli aspetti geologico-morfologici del territorio.

La storia sismica di Forlì è stata desunta da "DBMI15, database macrosismico italiano"[3], database realizzato dal Gruppo Nazionale per la Difesa dei Terremoti che contiene i dati macrosismici provenienti da studi dello stesso GNDT e di altri enti.

Essa è riassunta in forma grafica nella sottostante figura e in forma tabellare in Tab. 1, dove sono stati elencati gli eventi di maggior intensità al sito (Int.), l'anno, la data (comprendente mese, giorno, ora, minuto e, eventualmente, secondo) in cui si è verificato, la denominazione dell'area epicentrale, il relativo numero di dati di intensità macrosismica (NMDP), l'intensità massima epicentrale in scala MCS (Io) e la magnitudo momento (Mw).

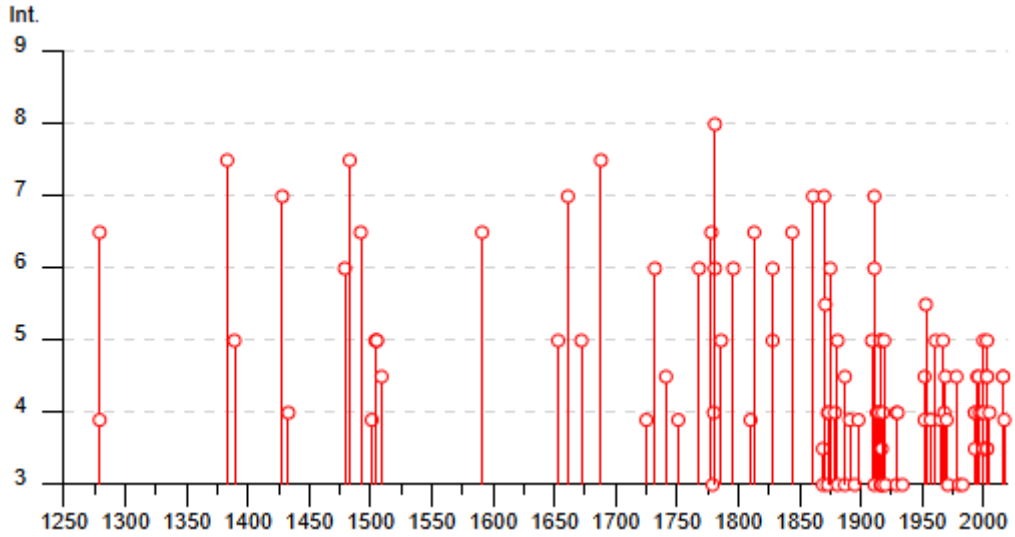


FIG. 1 – EVENTI DI MAGGIORE INTENSITÀ CENSITI NEL COMUNE DI FORLÌ

Int.	*Anno Me Gi Ho Mi Se*	*Area epicentrale*	*NMDP*	*Io*	*Mw*
8	1781 07 17 09 40	Faentino	46	8	5.61
7-8	1383 08 04	Forlì	1	7-8	5.33
7-8	1483 08 11 19 40	Romagna	14	8	5.69
7-8	1688 04 11 12 20	Romagna	39	8-9	5.84

[3] Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Conte S., Rocchetti E. (2016). DBMI15, the 2015 version of the Italian Macroseismic Database. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi:http://doi.org/10.6092/INGV.IT-DBMI15

Int.	*Anno Me Gi Ho Mi Se*	*Area epicentrale*	*NMDP*	*Io*	*Mw*
7	1428 07 03 05	Forlivese	6	7-8	5.47
7	1661 03 22 12 50	Appennino forlivese	79	9	6.05
7	1861 10 16	Romagna	10	6-7	5.13
7	1870 10 30 18 34	Forlivese	41	8	5.61
7	1911 02 19 07 18 3	Forlivese	181	7	5.26
6-7	1279 04 30	Appennino forlivese	5	7-8	5.52
6-7	1492 01	Forlì	1	6-7	4.86
6-7	1591 07 10	Romagna	6	6-7	5.13
6-7	1778 06 11	Forlì	2	5-6	4.40
6-7	1813 09 21 07 45	Romagna	12	7	5.28
6-7	1844 03 10 17 15	Forlivese	2	5-6	4.40
6	1479 10 10 22	Forlì	2	5	4.16
6	1732 08 09	Romagna	3	6	4.63
6	1768 10 19 23	Appennino forlivese	45	9	5.99
6	1781 04 04 21 20	Faentino	96	9-10	6.12
6	1796 10 22 04	Emilia orientale	27	7	5.45
6	1828 10 08 22 30	Romagna	8	5-6	4.57
6	1875 03 17 23 51	Costa romagnola	144	8	5.74
6	1911 03 20 15 47	Forlivese	25	6	5.09
5-6	1871 01 22 21 30	Pianura romagnola	8	6	4.95
5-6	1953 12 14 07 11 0	Appennino forlivese	48	5-6	4.70
5	1389 10 18	Alta Valtiberina	9	9	6.03
5	1504 12 31 04	Bolognese	15	6	5.02
5	1505 01 03 02	Bolognese	31	8	5.62
5	1505 01 20 23 50	Bolognese	11	5-6	4.76
5	1653 08 15	Romagna	3	5-6	4.40
5	1672 04 14 15 45	Riminese	92	8	5.59
5	1786 12 25 01	Riminese	90	8	5.66
5	1828 04 08	Appennino forlivese	3	6	4.63
5	1881 02 02	Russi	13	5-6	4.69
5	1909 01 13 00 45	Emilia-Romagna orientale	867	6-7	5.36
5	1916 05 17 12 50	Riminese	132	6-7	5.82
5	1916 08 16 07 06 1	Riminese	257	8	5.82
5	1919 06 29 15 06 1	Mugello	565	10	6.38
5	1961 05 08 22 45 5	Forlivese	40	5	4.37
5	1967 12 30 04 19	Emilia-Romagna orientale	40	6	5.05
5	2000 05 08 12 29 5	Faentino	126	5	4.67
5	2003 09 14 21 42 5	Appennino bolognese	133	6	5.24
4-5	1509 04 19	Faentino	5	7	5.02
4-5	1741 04 24 09 20	Fabrianese	135	9	6.17
4-5	1887 09 30 15 55	Faenza	10	5	4.12

Int.	*Anno Me Gi Ho Mi Se*	*Area epicentrale*	*NMDP*	*Io*	*Mw*
4-5	1952 07 04 20 35 1	Appennino forlivese	64	7	4.94
4-5	1969 01 10 16 17 3	Pianura Ravennate	22	5	4.38
4-5	1978 12 05 15 39 0	Romagna	34	4-5	4.61
4-5	1995 12 27 23 44 2	Forlivese	37	5	3.97
4-5	1996 10 15 09 55 5	Pianura emiliana	135	7	5.38
4-5	2003 01 26 19 57 0	Appennino forlivese	35	6	4.66
4-5	2003 12 07 10 20 3	Forlivese	165	5	4.18
4-5	2016 08 24 01 36 3	Monti della Laga	221	10	6.18
4-5	2016 10 30 06 40 1	Valnerina	379		6.61
4	1433 05 04 08 05	Bologna	4	6	4.63
4	1780 09 22 13 45	Forlivese	3	4-5	3.93
4	1873 03 12 20 04	Appennino marchigiano	196	8	5.85
4	1874 10 07	Imolese	60	7	4.96
4	1879 04 27 04 06	Appennino tosco-emiliano	20	7	5.03
4	1913 07 21 22 35	Appennino romagnolo	43	5-6	4.79
4	1914 10 27 09 22	Lucchesia	660	7	5.63
4	1915 01 13 06 52 4	Marsica	1041	11	7.08
4	1915 01 13 19 30	Cesenate	5	5	4.38
4	1918 11 10 15 12 2	Appennino forlivese	187	9	5.96
4	1929 04 10 05 44	Bolognese	87	6	5.05
4	1930 10 30 07 13	Senigallia	268	8	5.83
4	1968 01 11 17 08 0	Pianura romagnola	4	4	4.44
4	1993 11 05 02 01 0	Cesenate	10		3.99
4	1993 11 07 23 21 1	Cesenate	36	4-5	3.95
4	1997 09 26 09 40 2	Appennino umbro-marchigiano	869	8-9	5.97
4	1999 01 25 22 45 5	Appennino forlivese	97	5	4.36
4	2000 05 10 16 52 1	Faentino	151	5-6	4.82
4	2005 07 15 15 17 1	Forlivese	173	4-5	4.29
F	1279 04 30 18	Appennino umbro-marchigiano	17	9	6.20
F	1501 06 05 10	Modenese	17	9	6.05
F	1725 10 29 17 40	Appennino tosco-emiliano	28	8	5.67
F	1751 07 27 01	Appennino umbro-marchigiano	66	10	6.38
F	1810 12 25 00 45	Pianura emiliana	33	6	5.06
F	1891 08 01 13 32 2	Lugo	15	4-5	4.36
F	1898 01 16 13 10	Romagna settentrionale	110	6	4.59
F	1952 12 02 06 13 2	Appennino forlivese	53	5	4.42
F	1957 04 17 02 22	Appennino forlivese	14	6	4.68
F	1965 12 18 09 22 2	Pianura romagnola	11	5	4.54
F	1970 09 26 16 42 2	Cesenate	18	4-5	3.93
F	2017 01 18 10 14 0	Aquilano	280		5.70
3-4	1869 06 25 13 58	Appennino bolognese	18	7-8	5.43

Int.	*Anno Me Gi Ho Mi Se*	*Area epicentrale*	*NMDP*	*Io*	*Mw*
3-4	1917 04 26 09 35 5	Alta Valtiberina	134	9-10	5.99
3-4	1993 11 09 13 46 2	Cesenate	28	4-5	3.93
3-4	2000 08 01 02 34 3	Montefeltro	84	5-6	4.27
3-4	2003 01 26 20 15 0	Appennino forlivese	63	5-6	4.50
3-4	2003 01 29 23 50 1	Appennino forlivese	71	4-5	4.06
3	1779 07 14 19 30	Bolognese	17		
3	1869 12 13 02 53	Sassuolo	13	5	4.57
3	1873 06 29 03 58	Alpago Cansiglio	197	9-10	6.29
3	1881 09 28	Cesena	24	6-7	4.71
3	1887 02 23 05 21 5	Liguria occidentale	1511	9	6.27
3	1895 05 18 19 55 1	Fiorentino	401	8	5.50
3	1911 09 13 22 29 0	Chianti	115	7	5.08
3	1916 06 16 01 27	Riminese	17	6	4.82
3	1917 01 08 01 45 5	Appennino forlivese	11	6	4.74
3	1917 12 02 17 39	Appennino forlivese	32	6-7	5.09
3	1920 09 07 05 55 4	Garfagnana	750	10	6.53
3	1929 05 11 19 23	Bolognese	64	6-7	5.29
3	1934 05 28 21 09	Faentino	10	4	3.94
3	1971 07 15 01 33 2	Parmense	228	8	5.51
3	1980 11 23 18 34 5	Irpinia-Basilicata	1394	10	6.81
3	1983 11 09 16 29 5	Parmense	850	6-7	5.04
2-3	1972 10 25 21 56 1	Appennino settentrionale	198	5	4.87
2-3	1984 04 29 05 02 5	Umbria settentrionale	709	7	5.62
2-3	2000 05 06 22 07 0	Faentino	85	5	4.08
2-3	2002 11 02 10 57 4	Ferrarese	79	4	4.21
2	1920 06 08 16 13	Appennino forlivese	19	5-6	4.54
2	1926 01 01 18 04 0	Carniola interna	63	7-8	5.72
2	1956 05 26 18 40	Appennino forlivese	76	7	4.99
2	1956 06 03 01 45 5	Appennino forlivese	62	6	4.51
2	1960 10 29 00 08 3	Mugello	69	7	4.91
NC	1828 10 09 02 20	Oltrepò Pavese	110	8	5.72
NF	1956 04 26 03 00 0	Appennino bolognese	89	6	4.74
NF	1969 08 09 09 20 5	Appennino tosco-romagnolo	33	5	4.20
NF	1986 12 06 17 07 1	Ferrarese	604	6	4.43
NF	2001 11 26 00 56 5	Casentino	211	5-6	4.63

TAB. 1 – EVENTI SISMICI DI MAGGIORE INTENSITÀ I CUI EFFETTI SI SONO RISENTITI A FORLÌ

Dalla lettura dei dati si evidenzia che il massimo evento sismico censito a Forlì si è verificato il 17 luglio 1781 con epicentro nel Faentino e un'intensità dell'VIII grado della scala MCS.

Fatto salvo quanto sopra, si propone di tenere in considerazione anche quanto indicato nel lavoro elaborato per il Dipartimento dalla Protezione Civile, a cura di D. Molin, M. Stucchi e G. Valensise, "Massime intensità

macrosismiche osservate nei comuni italiani", determinate a partire dalla banca dati macrosismici del GNDT e dai dati del Catalogo dei Forti Terremoti in Italia di ING/SGA.

Secondo tale studio, basato in misura prevalente su valori realmente osservati, ma che contiene delle correzioni, per quelle località ove queste si siano rese necessarie, il territorio di Forlì è stato soggetto a terremoti di intensità massima minore o uguale al VIII grado della scala MCS.

Volendo inquadrare la tematica a scala regionale, si può affermare che l'Emilia-Romagna è interessata da una sismicità rilevante, seppur relativamente meno forte di altre aree del territorio nazionale, con terremoti di magnitudo massima di poco superiore a 6 e che hanno causato effetti fino al IX÷X grado di intensità della scala MCS.

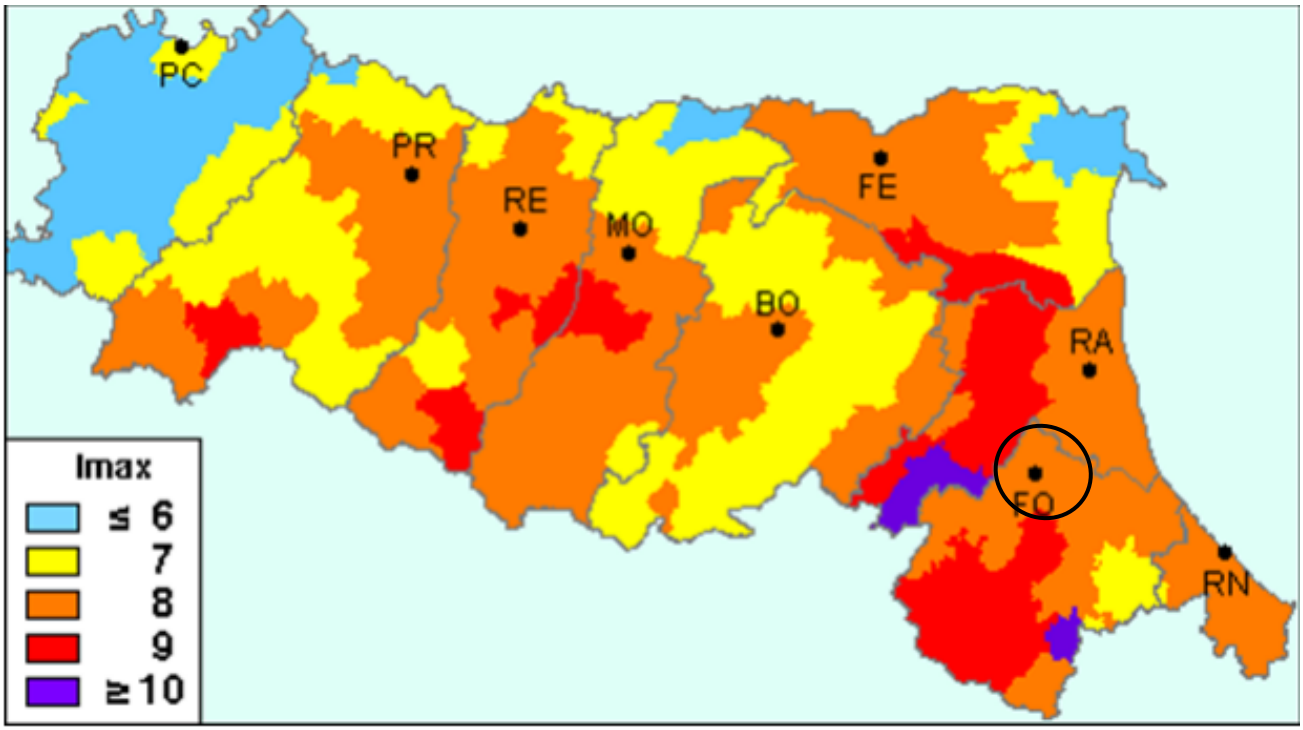


FIG. 2 – CARTA DELLA MASSIMA INTENSITÀ MACROSISMICA IN EMILIA-ROMAGNA

Come si nota dalla Fig. 3, in cui sono rappresentati gli epicentri dei principali terremoti (Mw≥4) che hanno interessato il territorio regionale negli ultimi 1000 anni, gli eventi sismici, soprattutto quelli più forti (indicativamente magnitudo maggiore di 5.5), si concentrano lungo il crinale appenninico, lungo il margine appenninico-padano e in alcuni settori della pianura, in corrispondenza del settore orientale delle Pieghe Emiliane e lungo tutta la dorsale ferrarese; mentre, i terremoti con magnitudo uguale o maggiore di 6 sono pressoché presenti solo in catena.

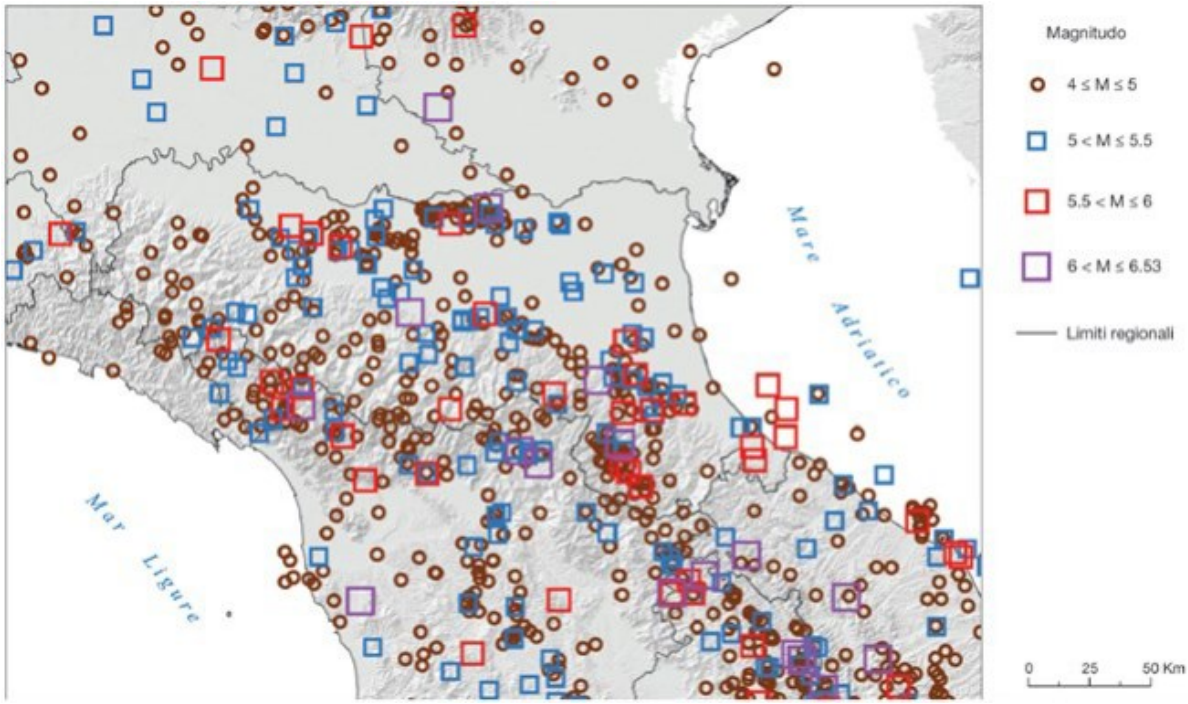


FIG. 3 – EPICENTRI DEI PRINCIPALI TERREMOTI (MW≥4) CHE HANNO INTERESSATO L'EMILIA-ROMAGNA DALL'ANNO 1000 AL 2014 (ROVIDA ET AL., 2016; ISIDE WORKING GROUP, 2015)

La zona del territorio regionale più frequentemente colpita da forti terremoti (magnitudo maggiore di 5.5) è la Romagna, in particolare la pianura meridionale, il settore appenninico e la costa.

L'intero settore appenninico della Regione, inoltre, ha risentito di forti terremoti avvenuti in aree sismogenetiche extraregionali, alcune delle quali capaci di generare terremoti di magnitudo superiore a 6. In particolare, i terremoti che hanno provocato i maggiori effetti lungo il crinale appenninico sono, da NW a SE, quelli della Garfagnana, del Mugello, della Val Tiberina e delle Marche settentrionali.

Altri settori della regione interessati da forti terremoti (magnitudo almeno uguale a 5.5) sono il margine appenninico-padano tra Bologna e Modena, la pianura tra Reggio Emilia e Parma e la zona di pianura in corrispondenza della dorsale sepolta delle Pieghe Ferraresi.

Le zone caratterizzate da minore sismicità, in termini di frequenza e magnitudo dei terremoti, sono il settore ad ovest della valle del Taro, la pianura emiliana occidentale e il delta del Po. Da notare, comunque, che anche nel settore occidentale della catena i terremoti più forti sono localizzati nella zona del margine e del basso Appennino.

Oltre ai principali eventi sopra indicati, occorre tenere presente che la zona settentrionale della pianura emiliana ha risentito anche di alcuni forti terremoti originati dai fronti sud-alpini.

I dati strumentali, relativi ai terremoti dal 1981 in avanti (cfr. Fig. 4), indicano che in Regione la sismicità è per lo più superficiale, con profondità ipocentrali generalmente comprese tra 5 e 15 km e che i terremoti più profondi si concentrano soprattutto nella zona del margine appenninico-padano e del basso e medio Appennino emiliano-romagnolo.

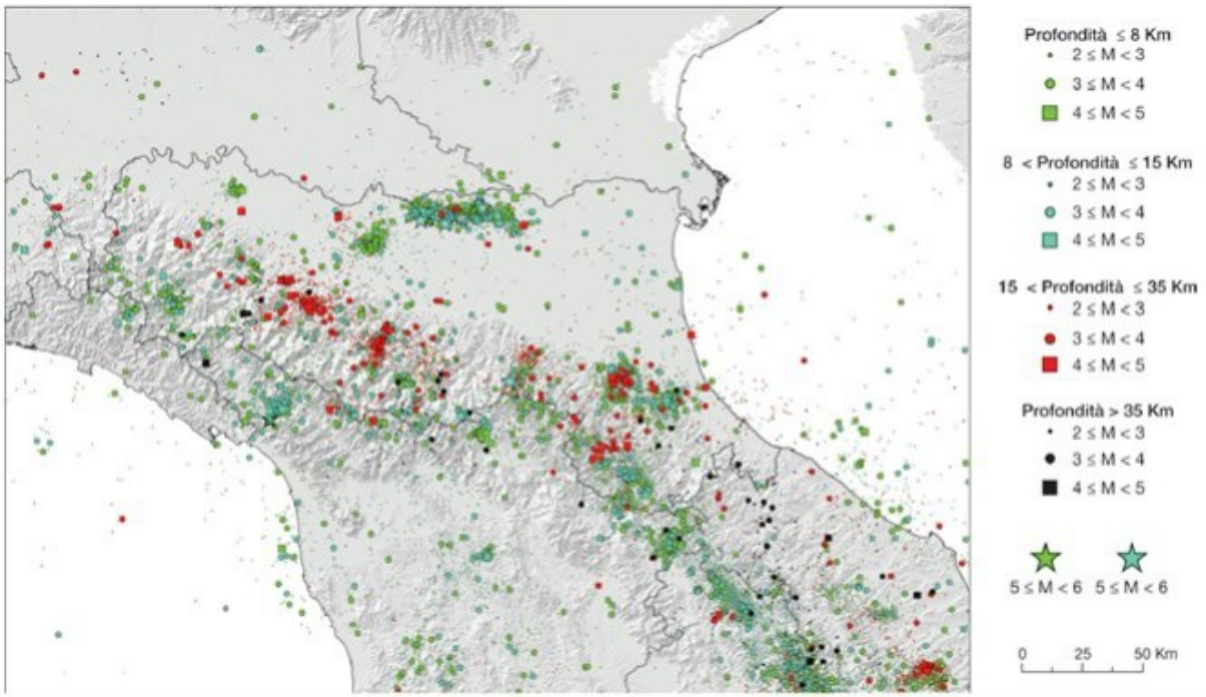


FIG. 4 – MAPPA DEI TERREMOTI STRUMENTALI MW≥2 (ISDE WORKING GROUP, 2015)

2.2. Caratteristiche sismotettoniche

Per avere un quadro degli elementi che concorrono alla pericolosità sismica del territorio comunale di Forlì è necessario fare riferimento agli studi che la Regione Emilia-Romagna ha condotto, a partire dalla fine degli anni '90, principalmente, in collaborazione con il Consiglio Nazionale delle Ricerche, e che hanno consentito di pubblicare la "Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna ed aree limitrofe" (Martelli *et alii*, 2017).

Ai fini della realizzazione di tale cartografia, sono risultate fondamentali l'identificazione e la rappresentazione delle strutture tettoniche attive; dove, per strutture tettoniche attive, in questo caso, si intendono quelle che mostrano chiare evidenze di influenza sull'evoluzione morfologica del paesaggio attuale o hanno deformato orizzonti stratigrafici non più antichi di 450.000 anni, età attribuita al limite inferiore del Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (marker stratigrafico più importante alla scala del territorio d'interesse).

Le strutture che presentano evidenze minori o meno certe di influenza sull'evoluzione morfologica del paesaggio attuale o di deformazione degli orizzonti stratigrafici non più antichi di 450.000 anni sono, invece, definite potenzialmente attive.

Inoltre, strutture attive e potenzialmente attive sono state suddivise in:

- affioranti, ovvero che hanno deformato la superficie topografica o, in pianura, hanno deformato la parte più superficiale del sottosuolo, vale a dire fino a profondità inferiori di 100 m dal piano campagna;
- sepolte, ovvero che mostrano evidenze di attività recenti o in atto (es. associazione con eventi sismici) ma a carico di orizzonti stratigrafici profondi almeno alcune centinaia di metri e non arrivano a deformare i livelli superficiali del sottosuolo (≥ 100 m da p.c.).

In Fig. 5 è riportata una mappa delle principali strutture attive e potenzialmente attive che, nella "Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna ed aree limitrofe", sono rappresentate, per chiarezza d'illustrazione,

in forma sintetica, tracciando le proiezioni in superficie delle intersezioni dei fronti principali delle strutture tettoniche con la base dei depositi pliocenici.

Dall'analisi delle profondità dei terremoti per i quali sono state calcolate soluzioni focali, si evince che meccanismi di tipo estensionale sono frequenti soprattutto nei primi 15÷20 km della zona assiale della catena e del versante ligure-toscano, mentre i meccanismi inversi sono più frequenti nel settore padano-adriatico; in catena i meccanismi di tipo compressivo sono localizzati per lo più a profondità maggiori di 20 km; i meccanismi di tipo trascorrente sembrano più frequenti nella parte occidentale della Regione dove sono stati localizzati anche a profondità elevate.

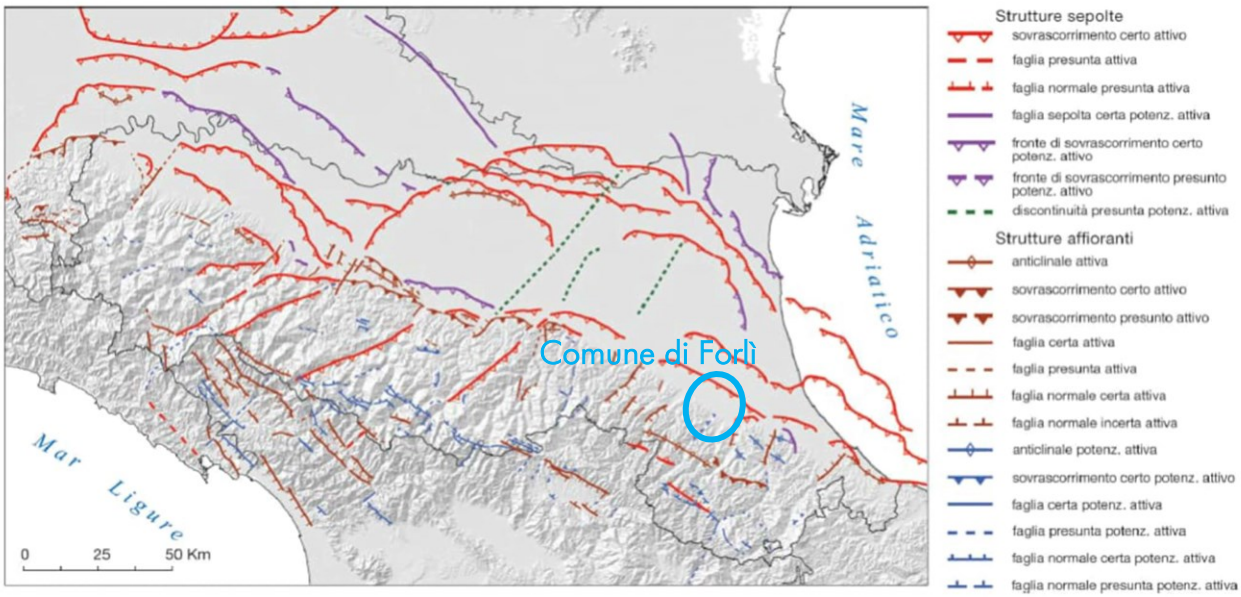


FIG. 5 – MAPPA DI SINTESI DELLE STRUTTURE TETTONICHE ATTIVE E POTENZIALMENTE ATTIVE RIPORTATE NELLA "CARTA SISMOTETTONICA DELLA REGIONE

La rappresentazione di sezioni con ipocentri ricadenti all'intorno di 10 km ha, invece, evidenziato una concentrazione degli ipocentri dei terremoti strumentali che definiscono un'ampia fascia, la quale, dalla zona padano-adriatica, immerge verso sud-ovest, mentre nel versante tirrenico i terremoti sembrano meno concentrati. In alcuni casi queste fasce sembrano essere la prosecuzione in profondità delle strutture attive riconosciute nei primi 10÷15 km; tali fasce potrebbero quindi identificare zone di faglia profonde attive e sismogenetiche.

In Fig. 6 è mostrato il confronto tra le strutture attive e potenzialmente attive riconosciute nella "Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna ed aree limitrofe" e le zone del catalogo DISS 3.2 (versione che sarà superata dal DISS 3.3.0, rilasciata a dicembre 2021, di seguito trattato), il database delle sorgenti sismogenetiche italiane, potenzialmente in grado di generare sismi con magnitudo superiore a M 5.5 nell'area italiana[4].

[4] Basili R., G. Valensise, P. Vannoli, P. Burrato, U. Fracassi, S. Mariano, M.M. Tiberti, E. Boschi (2008), The Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), version 3: summarizing 20 years of research on Italy's earthquake geology, Tectonophysics, doi:10.1016/j.tecto.2007.04.014

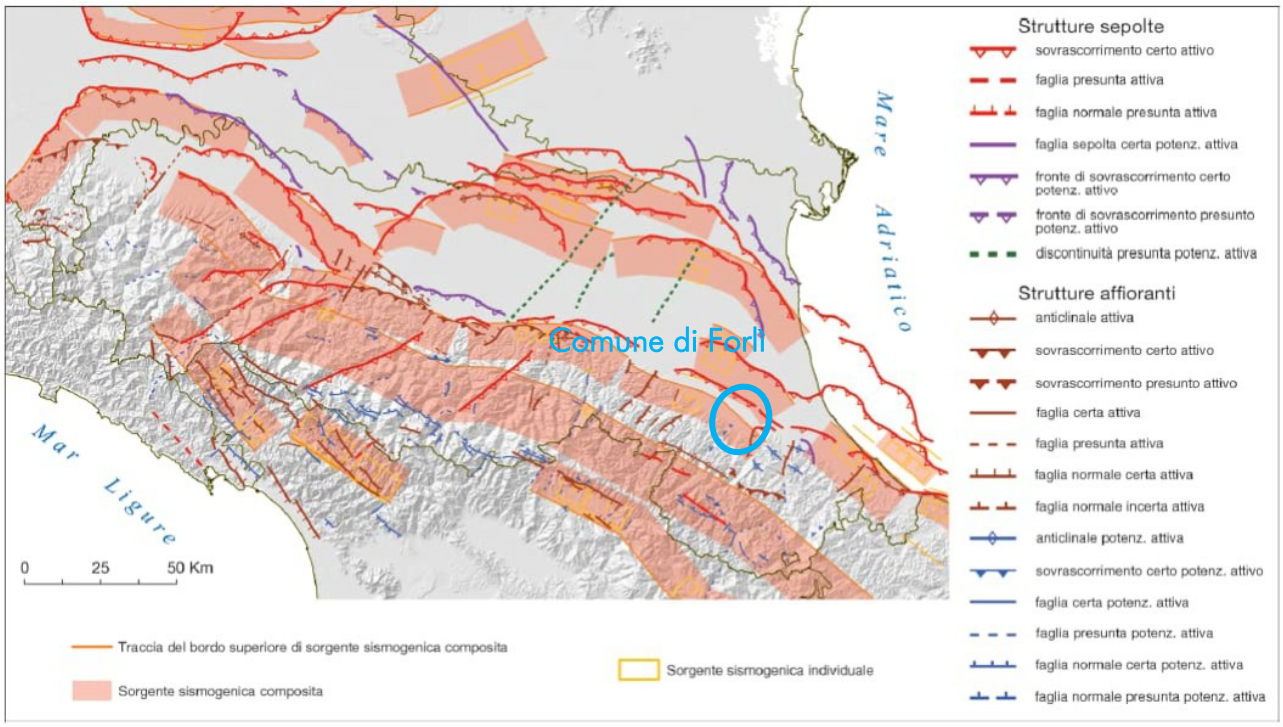


FIG. 6 – MAPPA DI CONFRONTO TRA LE STRUTTURE TETTONICHE ATTIVE E POTENZIALMENTE ATTIVE RIPORTATE NELLA "CARTA SISMOTETTONICA DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA ED AREE LIMITROFE" E LE ZONE SISMOGENETICHE DEL DISS 3.2

A riguardo, è interessante osservare che il Comune di Forlì si colloca al centro tra la sorgente composita ITCS011 "Ascensione – Armaia" e la sorgente composita ITCS001 "Castel San Pietro Terme – Meldola" individuate nel catalogo DISS 3.2, ritenute capaci di generare rispettivamente terremoti di magnitudo pari a 5.8 e 6.0, con meccanismi di *thrust* ad una profondità compresa tra 2 e 10 km e tra 2 e 8 km; *thrust* indicati come attivi (cfr. anche Fig. 7).

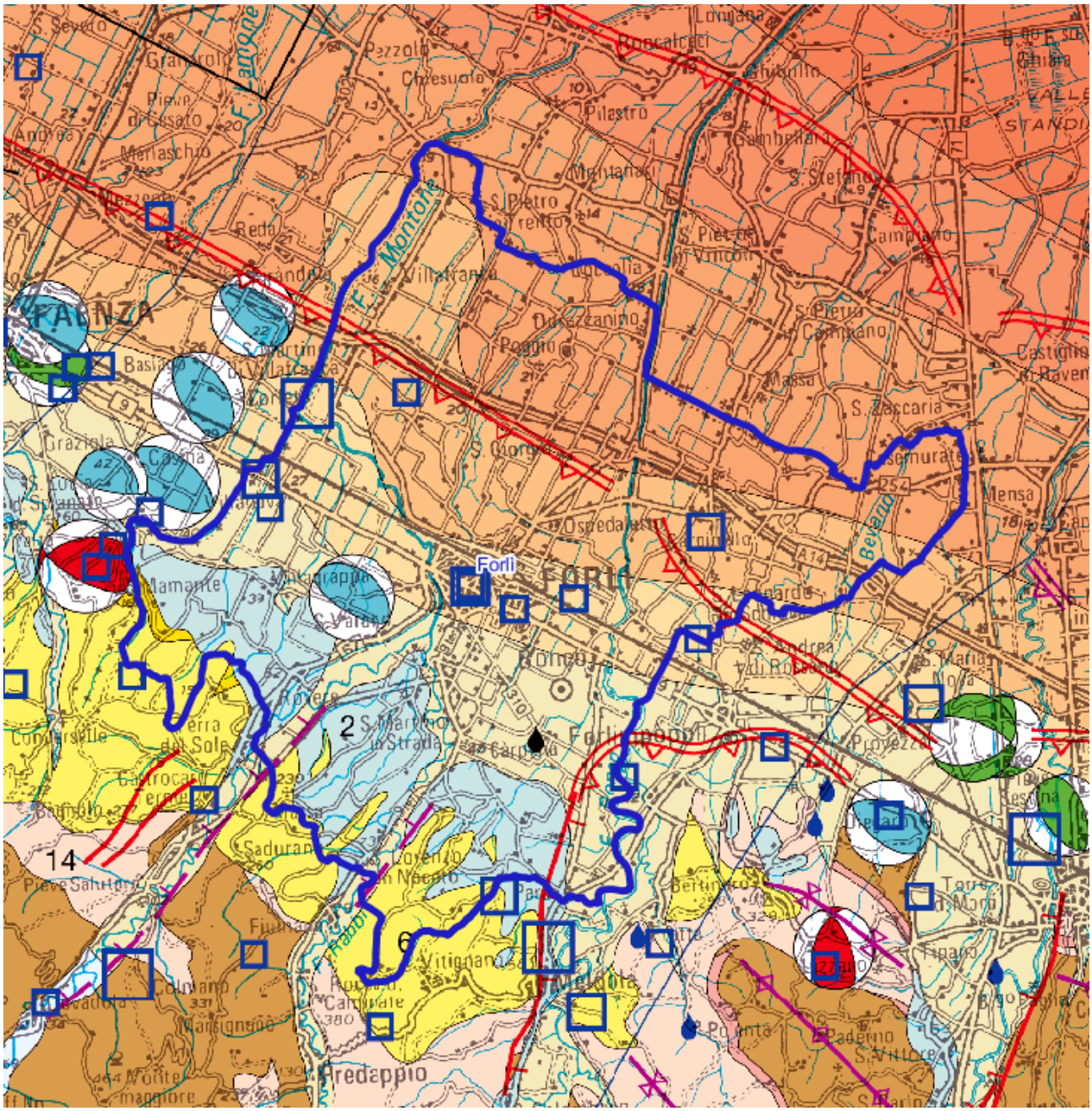


FIG. 7 – STRALCIO DELLA "CARTA SISMOTETTONICA DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA ED AREE LIMITROFE"

Sulla base dei nuovi dati acquisiti per la realizzazione della "Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna e aree limitrofe" è stata proposta, da parte di Martelli *et alii* (2017), anche una nuova zonazione sismogenetica dell'Appennino emiliano-romagnolo e aree limitrofe, al fine di fornire un contributo per l'aggiornamento della mappa di pericolosità sismica nazionale: la MPS16, che andrà a sostituire la MPS04, che, con la zonazione sismogenetica ZS9, rappresenta l'attuale riferimento per il calcolo dell'azione sismica (NTC2008) e la riclassificazione sismica (OPCM 3519/2006).

Secondo questa nuova proposta, in Fig. 8 messa a confronto con le strutture attive e potenzialmente attive riconosciute, il Comune di Forlì ricade in una zona sismogenetica con meccanismi di rottura prevalentemente di tipo normale (*normal fault*).

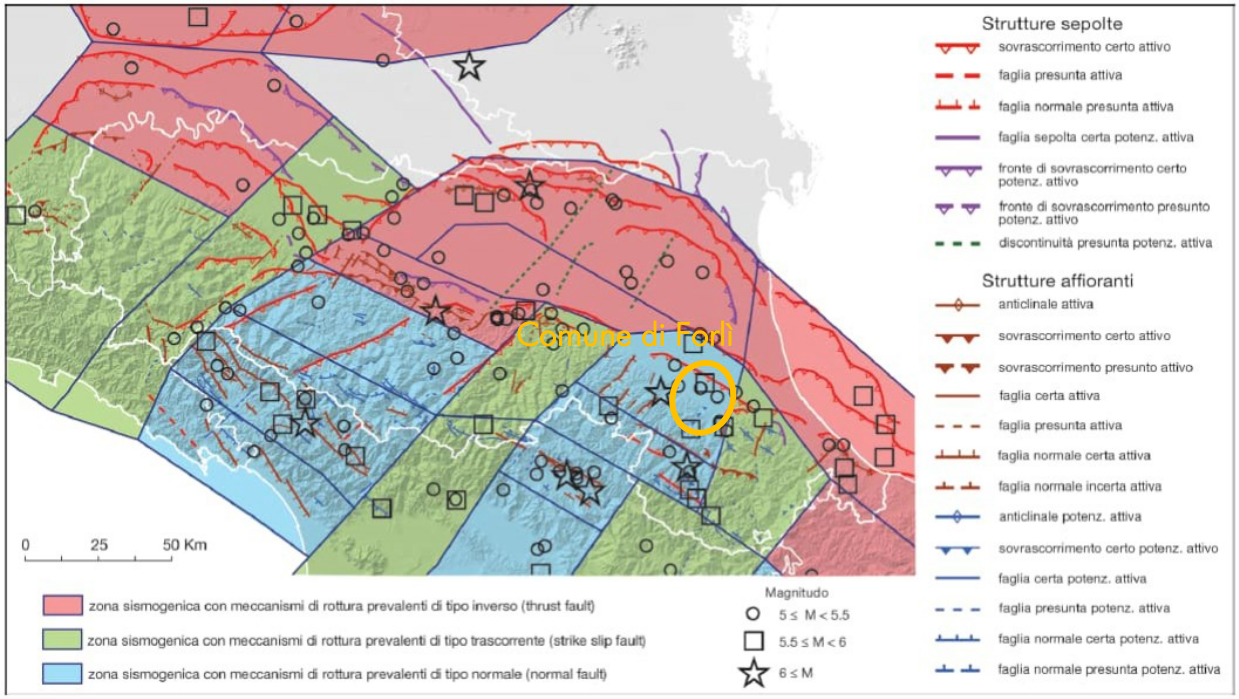


FIG. 8 – MAPPA DI CONFRONTO TRA LE STRUTTURE ATTIVE E POTENZIALMENTE ATTIVE RICONOSCIUTE E LA ZONAZIONE SISMOGENETICA PROPOSTA DA MARTELLI *ET AL.* (2007)

Più precisamente (cfr. Fig. 9), rientra nella Zona 12 – Margine Romagnolo, contraddistinta dalle seguenti caratteristiche sismotettoniche:

- *Orientazione delle principali faglie attive: S/30-45*
- *Geometria principale delle faglie attive: inversa*
- *Profondità ipocentrale: 5-35 km*
- *Magnitudo massima osservata: 6.1*
- *Magnitudo massima calcolata: 6.23 ± 0.24*

e che viene così descritta:

- *Zona caratterizzata da terremoti frequenti, anche di elevata intensità, con evidenze di movimenti prevalentemente compressivi, con direzione di massima compressione (assi P) circa N-S. Profondità degli ipocentri variabili, per lo più comprese tra 5 e 25 km, talora anche maggiori, fino a 35 km, lungo piani immergenti verso sud di 30°-45°. La magnitudo massima storica è M≈6,1. Corrisponde circa alla parte settentrionale della zona 914 della ZS9.*

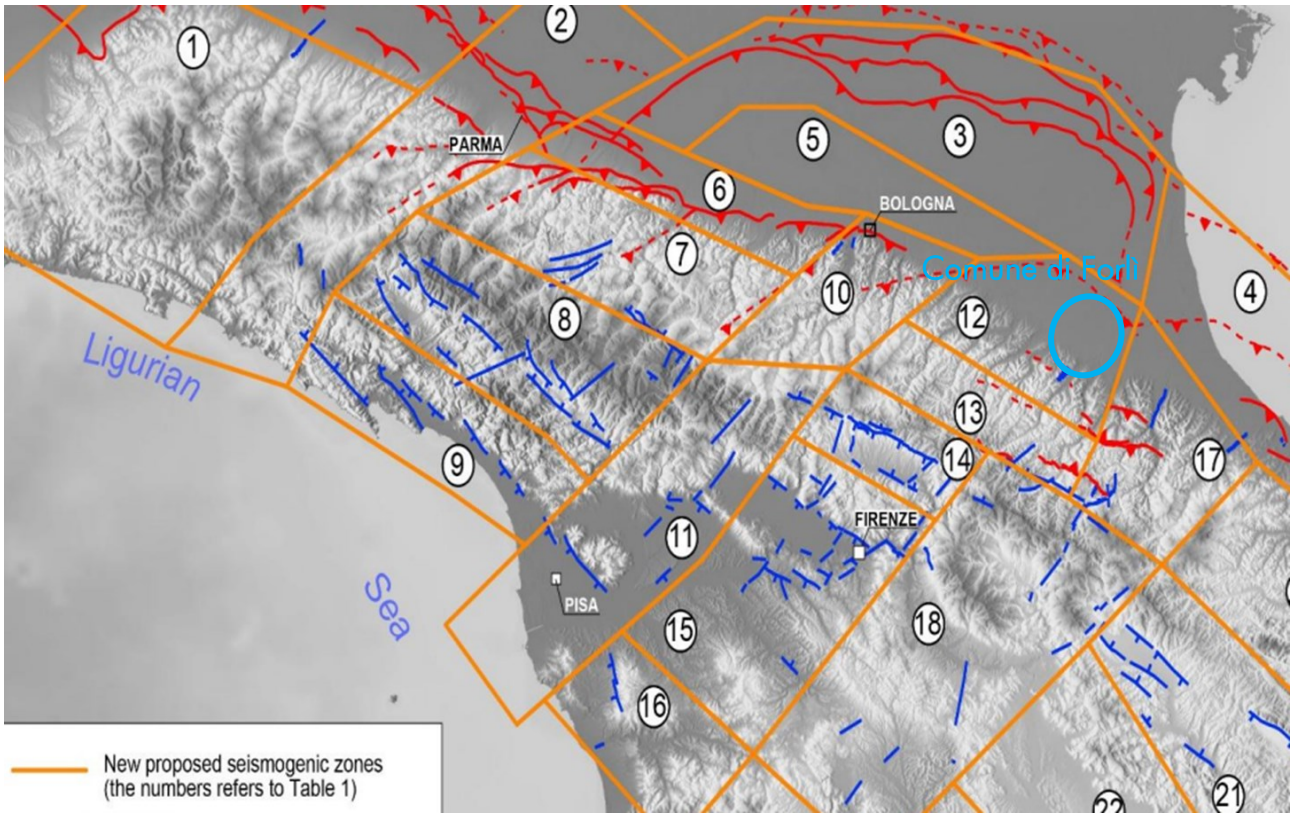


FIG. 9 – ZONE SISMOGENETICHE PROPOSTE DA MARTELLI ET AL. (2017) E LORO NUMERAZIONE

Esaminando, invece, la zonazione Sismogenetica ZS9 (a cura del gruppo di lavoro coordinato da C. Meletti e G. Valensise, 2004), di cui è riportato uno stralcio in Fig. 10, il Comune di Forlì si inserisce a cavallo tra la zona sismogenetica 914 e la zona 912.

La zona 914 "Forlivese" è contraddistinta da eventi sismici di magnitudo medio-bassa (la massima magnitudo rilevata è Md = 4.5), con cinematismi attesi di carattere misto seppure principalmente compressivi a NW e distensivi a SE.

Il maggior numero di terremoti che si verificano nella zona 914 presenta il proprio ipocentro a profondità comprese tra 12 e 20 km, con profondità efficace di 13 km.

La zona 912 "Dorsale Ferrarese" è anch'essa contraddistinta da eventi sismici di magnitudo medio-bassa (la massima magnitudo rilevata è Md = 4.6), ma con cinematismi attesi di carattere prevalentemente compressivo.

Il maggior numero di terremoti che si verificano nella zona 912 presenta il proprio ipocentro a profondità comprese tra 5 e 8 km, con profondità efficace di 7 km.

Sulla base dei meccanismi focali, per entrambe le zone 914 e 912, sono previsti valori "cautelativi" di massima magnitudo (Mwmax2) pari a = 6.14.

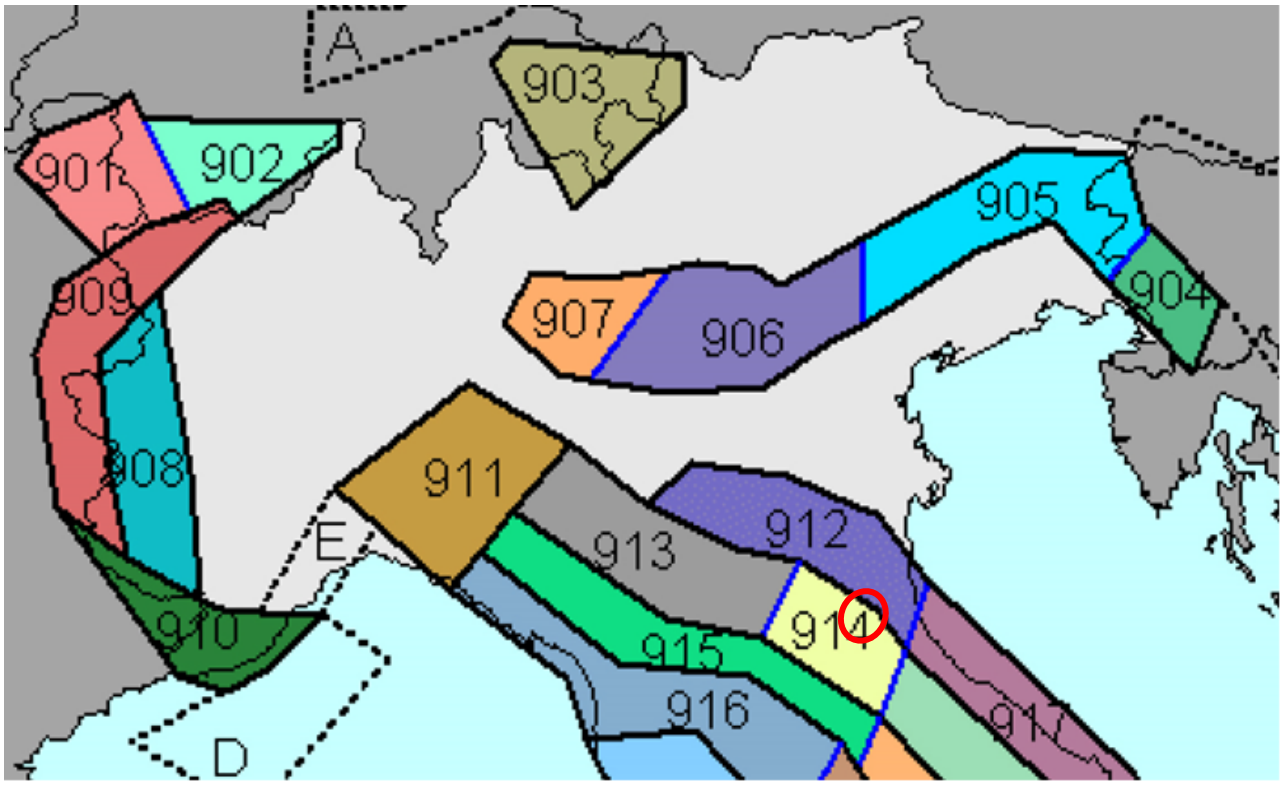


FIG. 10 – STRALCIO DELLA ZONAZIONE SISMOGENETICA ZS9 (2004)

Va, infine, precisato che nel 2021 è stata pubblicata la versione 3.3.0 del DISS[5], che ha modificato in maniera significativa la magnitudo massima attesa (Mw) per le due sorgenti sismogenetiche che interessano il territorio comunale di Forlì (la ITCS001 "Castel San Pietro Terme-Meldola" e la ITCS011 "Ascensione-Armaia") aumentandole rispettivamente da 5.8 a 6.5 e da 6.0 a 7.0.

[5] DISS 3.3.0 - DISS Working Group (2021). Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.3.0: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). https://doi.org/10.13127/diss3.3.0

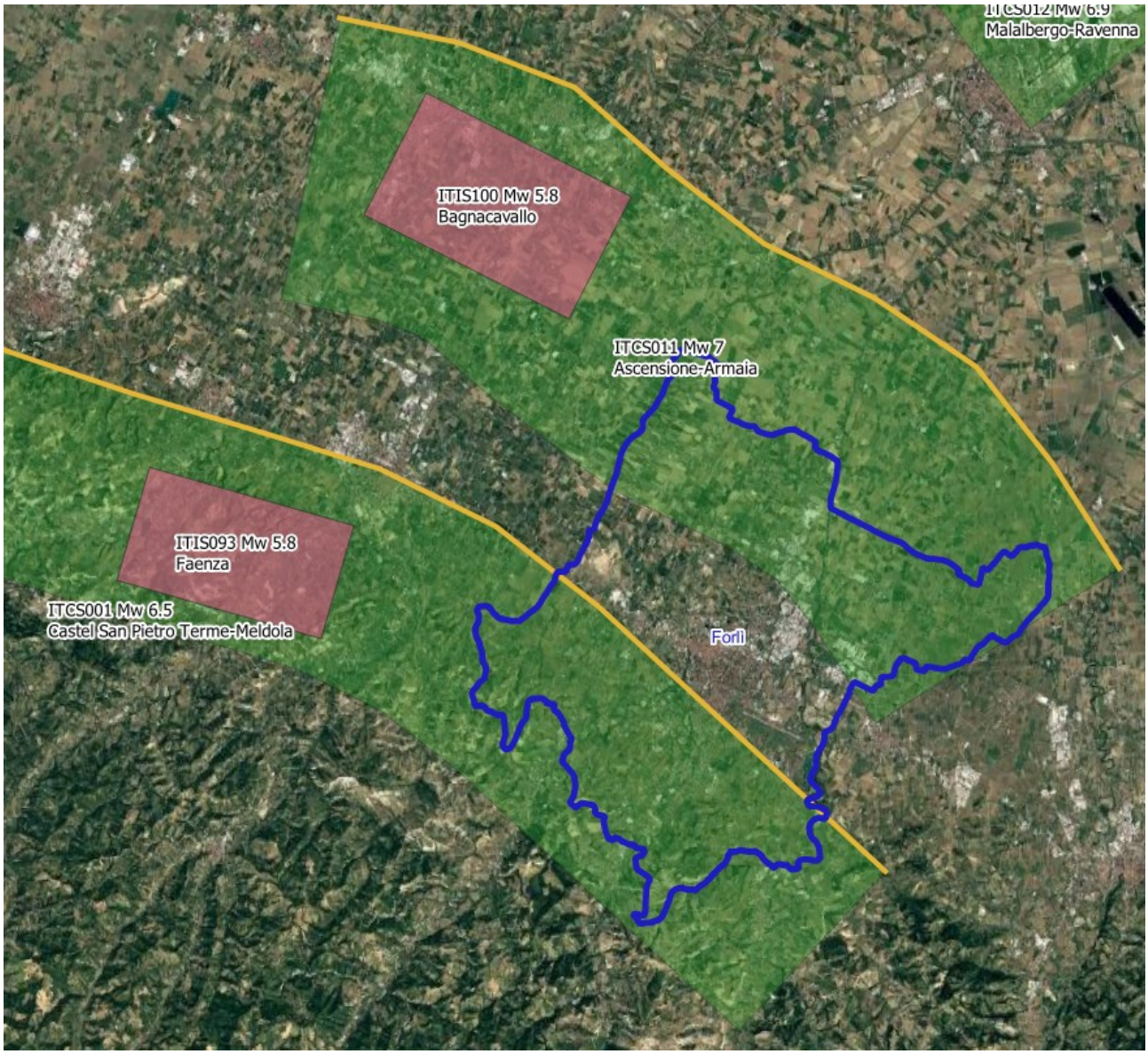


FIG. 11 – STRALCIO DEL DISS 3.3.0

Sempre relativamente al tema delle sorgenti sismogenetiche, si è visto che all'interno del territorio comunale di Forlì (cfr. Fig. 12) sono presenti quattro faglie capaci riportate nei cataloghi del progetto ITHACA (*ITaly HAzard from CApable faults*)[6], sviluppato dal Servizio Geologico d'Italia – ISPRA.

Lo studio di tali lineamenti, tuttavia, ha evidenziato la bassa attendibilità dei dati disponibili.

[6] https://www.isprambiente.gov.it/it/progetti/cartella-progetti-in-corso/suolo-e-territorio-1/ithaca-catalogo-delle-faglie-capaci/default

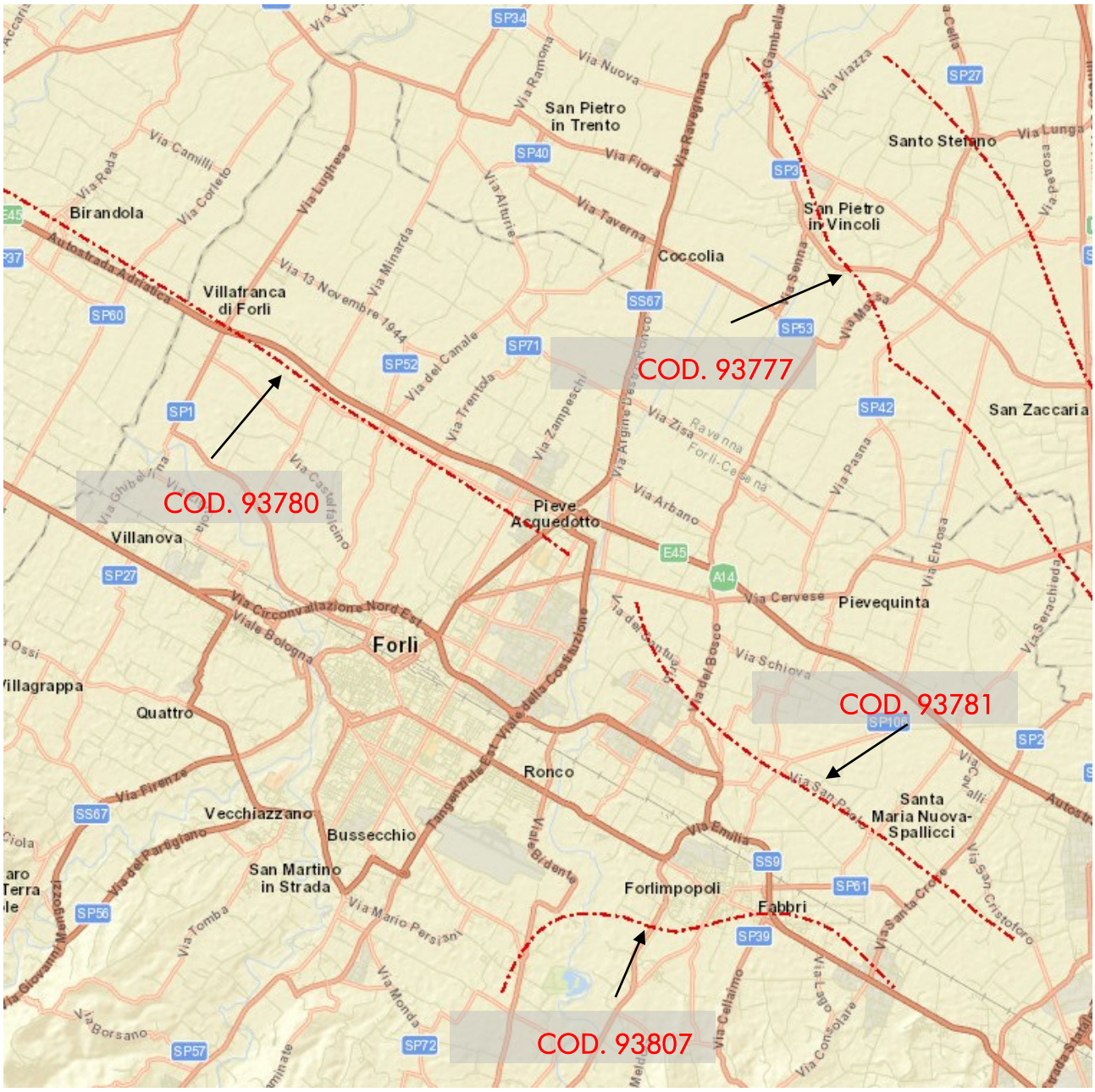


FIG. 12 – STRALCIO DELLA CARTOGRAFIA DEL CATALOGO DELLE FAGLIE CAPACI ITHACA (DA MAPVIEWER PORTALE ISPRA)

Si riportano, di seguito, le informazioni desunte dalle schede specifiche ITHACA:

CODICE	93780
NOME FAGLIA	S. MARTINO DI VILLAFRANCA – RAVENNA
REGIONE	EMILIA-ROMAGNA
SISTEMA	BOLOGNA – RAVENNA
ORDINE	PRIMARIO
CINEMATISMO	INVERSO

CODICE	93780
DIREZIONE DI IMMERSIONE	SSW
LUNGHEZZA (Km)	17.3
ULTIMA ATTIVITA' (anni)	PLEISTOCENE MEDIO (125.000-700.000)
AFFIDABILITA' DATO ATTIVITA'	MEDIA

CODICE	93781
NOME FAGLIA	FORLI'
REGIONE	EMILIA-ROMAGNA
SISTEMA	BOLOGNA – RAVENNA
ORDINE	PRIMARIO
CINEMATISMO	INVERSO
DIREZIONE DI IMMERSIONE	NNE
LUNGHEZZA (Km)	9.9
ULTIMA ATTIVITA' (anni)	PLEISTOCENE MEDIO (125.000-700.000)
AFFIDABILITA' DATO ATTIVITA'	MEDIA

CODICE	93807
NOME FAGLIA	FORLIMPOPOLI - RAVENNA
REGIONE	EMILIA-ROMAGNA
SISTEMA	RAVENNA - COMACCHIO
ORDINE	PRIMARIO
CINEMATISMO	INVERSO
DIREZIONE DI IMMERSIONE	S
LUNGHEZZA (Km)	8.8
ULTIMA ATTIVITA' (anni)	PLEISTOCENE MEDIO (125.000-700.000)
AFFIDABILITA' DATO ATTIVITA'	MEDIA

CODICE	93777
NOME FAGLIA	MENSA - RAVENNA
REGIONE	EMILIA-ROMAGNA
SISTEMA	BOLOGNA - RAVENNA
ORDINE	PRIMARIO
CINEMATISMO	INVERSO
DIREZIONE DI IMMERSIONE	SW
LUNGHEZZA (Km)	16.0
ULTIMA ATTIVITA' (anni)	PLEISTOCENE INFERIORE
AFFIDABILITA' DATO ATTIVITA'	BASSA

2.3. Classificazione sismica comunale

L'Ordinanza n. 3274 del 20 marzo 2003, suddivide il territorio italiano in 4 zone sismiche con diversi livelli di accelerazione sismica di progetto.

La delibera del 06 febbraio 2023 n. 146 della giunta regionale dell'Emilia-Romagna aggiorna la classificazione sismica di prima applicazione dei comuni riclassificando il territorio. Secondo tale aggiornamento, come indicato in Fig. 13, il comune di Forlì è stato identificato in zona 2 (a sismicità medio-alta), cui corrispondono valori di accelerazione di picco orizzontale del suolo (a_g), con probabilità di superamento del 10% in 50 anni, compresi tra 0,15*g e 0,25*g (dove g è l'accelerazione di gravità).

Risulta opportuno evidenziare che, con l'entrata in vigore del decreto ministeriale 14 gennaio 2008 recante "Norme Tecniche per le Costruzioni", la stima della pericolosità sismica, non è più associata alla zona sismica di appartenenza, ma al valore di accelerazione massima orizzontale attesa su base probabilistica in uno specifico sito.

Ciò ha permesso di superare la differenza tra valori di accelerazione previsti dagli studi di pericolosità sismica a scala nazionale e valori previsti dalla normativa antisismica per un suolo di riferimento.

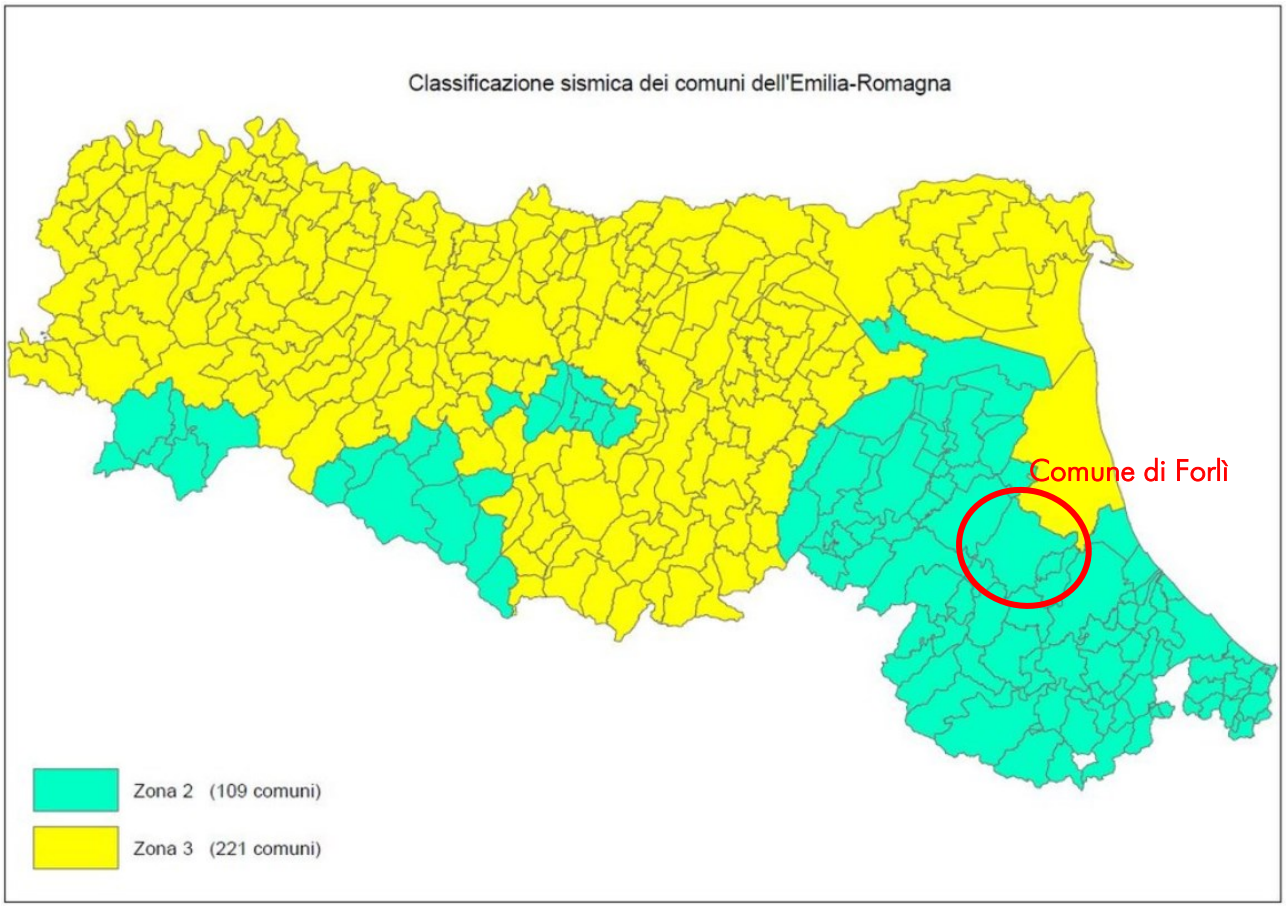


FIG. 13 – CLASSIFICAZIONE SISMICA DEI COMUNI DELLA REGIONE EMILIA-ROMAGNA

L'elaborazione dei parametri della mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale redatta da INGV (2004) e riportata nell'OPCM 3519 del 28/04/2006 "Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone", identifica, per il territorio comunale di Forlì valori di accelerazione (ag) con probabilità di superamento del 10% in 50 anni compresi tra: ag = 0,175 e 0,225

g (ricavato dalle mappe interattive di pericolosità sismica dell'Istituto di Geofisica e Vulcanologia – INGV, cfr. Fig. 14.

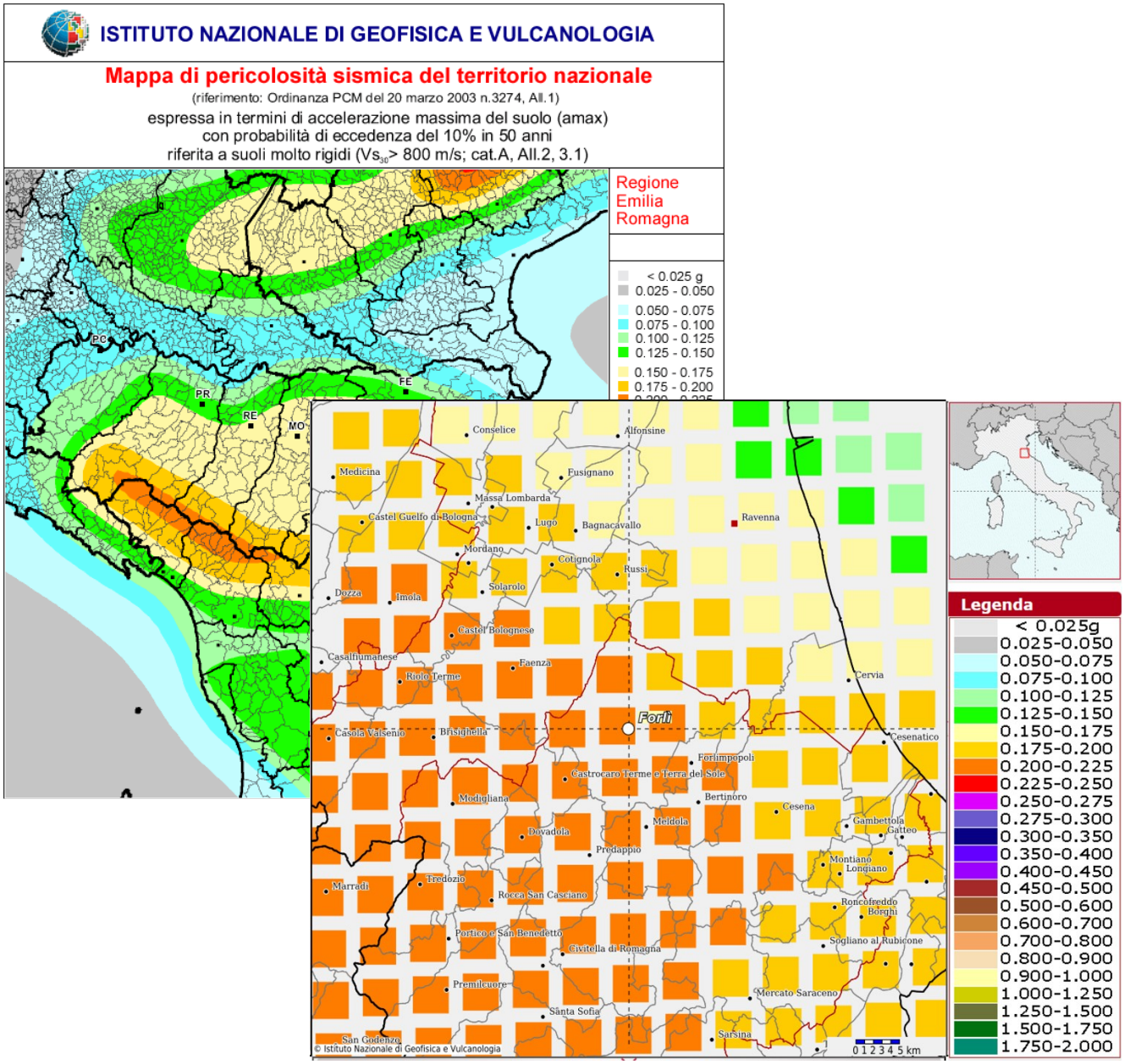


FIG. 14 - STRALCIO DELLA MAPPA DI PERICOLOSITÀ SISMICA RIPRESO DAL SITO DELL'ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

2.4. Il rischio sismico definito nel PTCP della Provincia di Forlì-Cesena

Relativamente agli aspetti sismici, il Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (PTCP) della Provincia di Forlì-Cesena, adottato con Delibera di Consiglio Provinciale n. 53971/127 del 14/07/2005, pur non introducendo

coefficienti direttamente legati alla normativa sismica, fornisce sia indicazioni utili per la pianificazione territoriale sia indirizzi per eventuali indagini di maggior dettaglio.

Nello specifico, nel presente studio si è fatto riferimento all'approfondimento "Elementi di sismicità dell'area Forlì-Cesena ai fini del Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale"[7], il quale fornisce un'analisi delle amplificazioni a scala locale prodotte dalla presenza di depositi superficiali con scadenti caratteristiche meccaniche e uno studio in termini probabilistici della pericolosità sismica della zona indagata.

Va subito evidenziato che tale tipo di approccio necessita una base dati in grado di fornire una caratterizzazione meccanica dei terreni, in particolare per quanto riguarda le velocità delle onde di taglio (Vs); la sua adozione è stata possibile data la preventiva disponibilità di tali informazioni.

L'analisi numerica delle amplificazioni locali è stata quindi suddivisa in due fasi:

- Una prima analisi ha impiegato dati di natura geofisica, ed in particolare prove down-hole e cross-hole fornite dall'Ufficio Geologico della Regione Emilia-Romagna. Una serie di simulazioni numeriche ha permesso di caratterizzare la risposta sismica del suolo in maniera completa ma limitata ai siti investigati.
- Una seconda fase di analisi è consistita nell'estensione dei risultati sopra citati a tutta l'area in esame. A tal fine sono state utilizzate le informazioni geotecniche disponibili ed in particolare le numerose prove CPT raccolte nella banca dati regionale.

È stata messa a punto una relazione empirica per correlare i parametri forniti dalle prove CPT con le velocità delle onde di taglio fornite dai down-holes. Questa relazione ha quindi permesso di ricavare un profilo verticale di velocità per ogni CPT, un dato che può essere impiegato nella stima analitica degli effetti di sito.

Per ognuna delle prove selezionate è stata calcolata la funzione di amplificazione che insieme ad un moto di riferimento (l'accelerogramma Tolmezzo N-S del 6 Maggio 1976, scalato a 250 cm/s^2) ha permesso di valutare il moto in superficie. Si sono quindi calcolati lo spettro di risposta in spostamento e gli pseudo-spettri di risposta in velocità e accelerazione (SD, PSV e PSA per uno smorzamento del 5%) ed infine l'intensità di Housner (SI), intesa come integrale del PSV calcolato per periodi compresi tra 0.1 e 2.5 s.

La SI risulta inoltre particolarmente utile in un'analisi di area vasta in quanto fornisce un'idea globale delle possibili amplificazioni, non mirata a particolari tipologie di strutture.

I risultati ottenuti sono riassunti nella mappa in Fig. 15, in cui il parametro rappresentato è l'intensità di Housner normalizzata rispetto al valore minimo ottenuto per l'area in esame. I valori sono compresi nell'intervallo da 1.00 a 1.15. Dalla mappa si nota un generale incremento delle amplificazioni andando da sud-ovest verso nord-est, in particolare si evidenzia che i valori più alti sono stati calcolati per la zona di Forlì.

Per realizzare tale mappa è stato considerato un moto di riferimento di ampiezza costante su tutta l'area, in quanto l'obbiettivo è stato quello di evidenziare gli effetti locali dovuti alla presenza di depositi superficiali.

[7] A. Marcellini, R. Daminelli, D. Milani e M. Pagani – Istituto per la Dinamica dei Processi Ambientali (CNR)

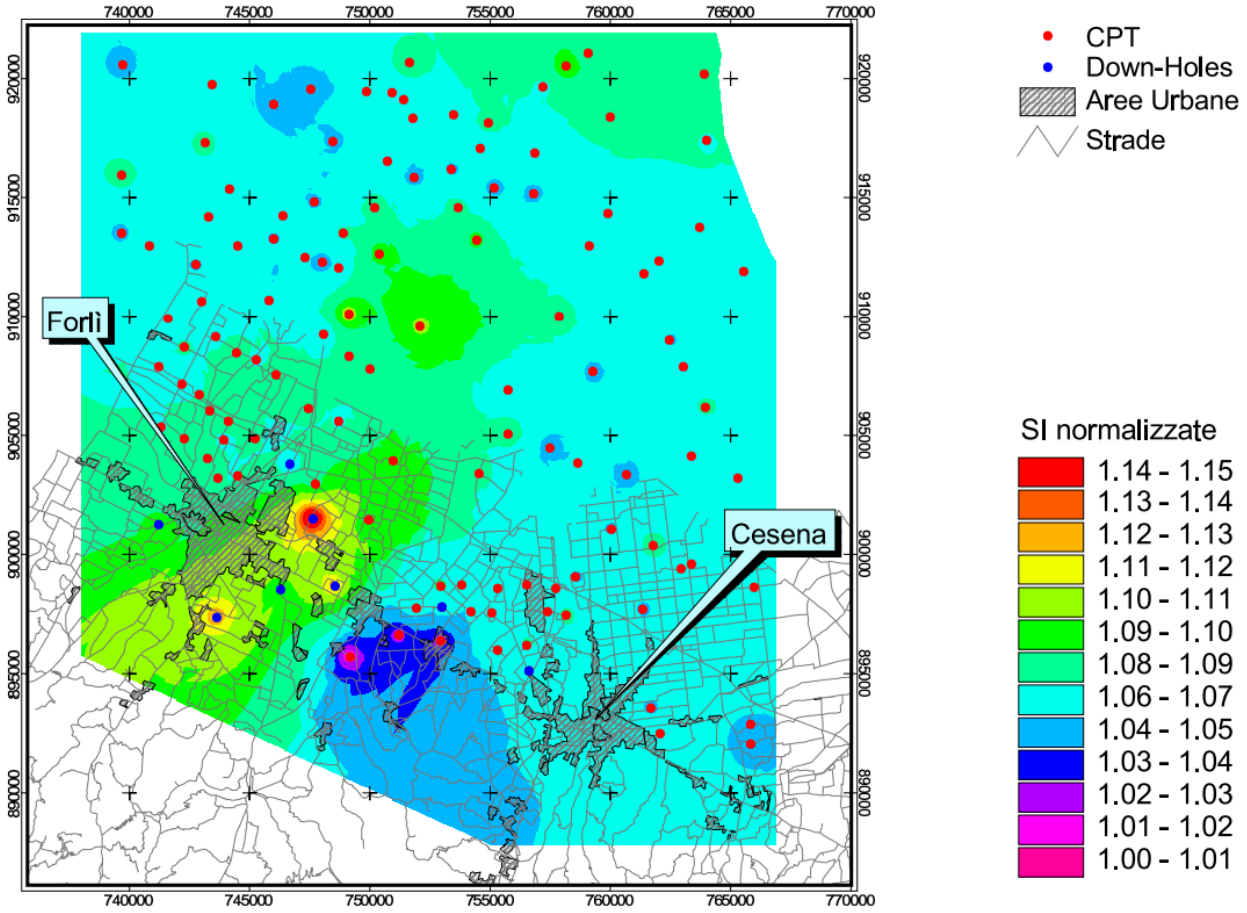


FIG. 15 – MAPPA DEGLI EFFETTI ATTESI DI SITO IN TERMINI DI INTENSITÀ DI HOUSNER NORMALIZZATA RISPETTO AL VALORE MINIMO (DA ALL'APPROFONDIMENTO "ELEMENTI DI SISMICITÀ DELL'AREA FORLÌ-CESENA AI FINI DEL PIANO TERRITORIALE DI COORDINAMENTO PROVINCIALE")

3. ASSETTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO DELL'AREA

3.1. Geologia

Il Comune di Forlì è situato nel margine sudorientale della Pianura Padana (Pianura romagnola), una vasta area pianeggiante dovuta essenzialmente al deposito di sedimenti alluvionali plio-pleistocenici, più o meno rimaneggiati da cicli trasgressivo-regressivi marini di età Olocenica.

Tali depositi, che costituiscono l'ossatura della pianura padana, sono il riempimento del bacino di avanfossa di età plio-quaternaria, compreso tra la catena appenninica a sud e quella alpina a nord.

I caratteri strutturali di tale bacino sono stati ampiamente documentati attraverso studi dell'AGIP, i quali hanno evidenziato che lo spessore complessivo delle unità quaternarie è di 1000-1500 metri. L'evoluzione sedimentaria plioquaternaria del bacino padano registra una generale tendenza "regressiva", identificata al margine appenninico, da Ricci Lucchi *et alii* (1982), da depositi marini di ambiente meno profondo fino a depositi continentali.

Questa chiara superficie di inconformità ha permesso di identificare due tipi di cicli sedimentari principali, uno marino (Qm) e uno continentale (Qc).

Recentemente la superficie di discontinuità che separa i cicli Qm e Qc è stata identificata da Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP (1998) nel sottosuolo della Pianura Padana, in corrispondenza del limite tra Supersintema del Quaternario marino (Qm) e il sovrastante Supersintema Emiliano-Romagnolo (Qc). Il sottosuolo della piana costiera romagnola è caratterizzato dall'organizzazione ciclica di depositi marini e continentali in successioni di vario ordine per un centinaio di metri di spessore. Recenti studi basati sull'interpretazione di profili sismici integrati da dati profondi di pozzo, forniscono un quadro stratigrafico generale dei depositi quaternari nell'area ravennate, mostrando come il Supersintema Emiliano-Romagnolo presenti in questo settore di pianura uno spessore complessivo di circa 600-700 m e possa essere suddiviso in due sintemi (Sintema Emiliano Romagnolo Inferiore e Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore), con spessore in tutte e due i casi di circa 300 m.

Dal punto di vista strutturale, l'asseto di tali depositi, desumibile dai lavori a scala regionale di Pieri & Groppi (1981) e CNR (1990), è dato da una serie di *thrust* ad andamento parallelo con orientazione NW-SE (Pieghe appenniniche).

Il fronte delle Pieghe appenniniche è un sovrascorrimento che si sviluppa da Nord con direzione N120°E circa, si orienta verso NNW-SSE appena a NW del confine comunale di Forlì. A sud di Forlì, questo scorrimento interseca la chiusura periclinalica settentrionale dell'anticlinale di Bertinoro e delle Pieghe di Cesena, limitata anch'essa al fronte da uno scorrimento. In corrispondenza dell'intersezione delle due strutture, si è sviluppata una piega sinclinalica, lacerata da una faglia diretta a direzione appenninica, che ha portato la base dei terreni Pliocenici ad una profondità di 5 km. Circa in corrispondenza del limite nordorientale del comune, si è sviluppata in profondità l'anticlinale frontale dello scorrimento delle "Pieghe romagnole" (Pieri & Groppi, 1981), che ha sollevato la base dei terreni pliocenici al di sopra dei 2 km di profondità.

Questa attività tettonica, attiva dal Miocene superiore, ha deformato anche i terreni del Pleistocene, che complessivamente possono raggiungere i 1000 m.

L'assetto geologico di questo settore appenninico-padano, così come descritto nella letteratura degli ultimi 50 anni, è sintetizzato nello schema tridimensionale di Fig. 16 (Farabegoli *et al.*, 1997).

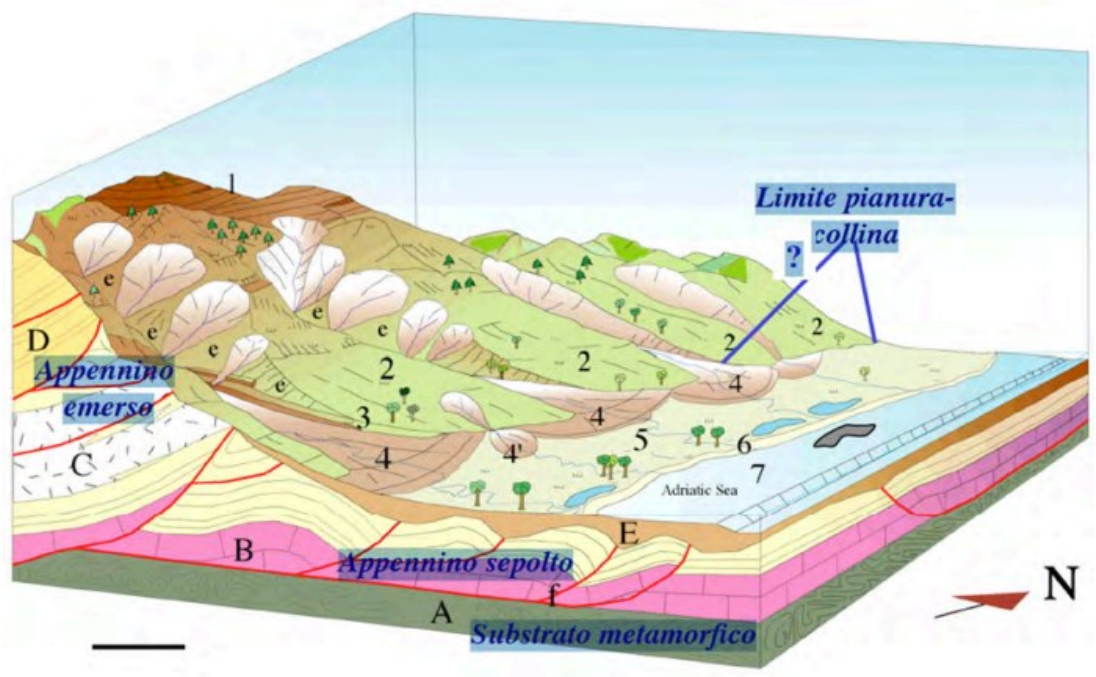


FIG. 16 – SCHEMA GEOLOGICO-GEOMORFOLOGICO DEL MARGINE APPENNINICO-PADANO (DA FARABEGOLI ET AL. 1997)

In questo schema, l'area appenninico-padana è stata suddivisa in 7 categorie "concettuali", di seguito elencate:

1. Aree di collina-montagna
2. Aree triangolari intravallive
3. Depositi alluvionali terrazzati intravallivi
4. Conoidi alluvionali
5. Pianura alluvionale
6. Spiagge e apparati costieri
7. Area marina adriatica

Il territorio forlivese comprende tre delle sette categorie sopraelencate, che, nello specifico, sono rappresentate dai depositi alluvionali terrazzati intravallivi, dalle conoidi alluvionali e dalla pianura alluvionale.

In sintesi, l'attuale assetto geologico del Comune di Forlì è stato determinato dal decorso dei più recenti processi morfogenetici (erosivi e deposizionali) e dall'attività neotettonica. Esso ricade, in massima parte, nei conoidi e alluvioni della pianura olocenica, mentre il restante territorio è contraddistinto dalla presenza di rocce sedimentarie del Quaternario marino e continentale e del Pliocene marino.

Nel complesso, è possibile quindi distinguere i seguenti depositi affioranti d'origine continentale o marina:

- Depositi quaternari continentali caratterizzanti la morfologia attuale del territorio;
- Depositi quaternari continentali di pertinenza della successione neogenico-quaternaria del margine appenninico padano;
- Depositi quaternari di ambiente litorale, di spiaggia e di delta conoide della successione neogenico-quaternaria del margine appenninico padano;

- Depositi pliocenici e quaternari marini della successione neogenico-quaternaria del margine appenninico padano.

Depositi quaternari continentali

Depositi alluvionali in evoluzione: trattasi dei depositi ghiaiosi e sabbiosi, subordinatamente limosi, di origine fluviale, attualmente in evoluzione soggetti a variazioni dovute alla dinamica fluviale; detrito generalmente incoerente e caotico, costituito da clasti eterometrici ed eterogenei, talora arrotondati, in matrice sabbiosa, allo sbocco di impluvi e valli secondarie.

Depositi alluvionali terrazzati: si tratta di depositi ghiaiosi e sabbiosi di origine fluviale costituiti da ciottoli calcarei o arenacei e da sabbie calcaree o silicee ricoperte da suoli in genere argillosi, su aree degradanti dalla pedecollina a valle, di spessore variabile dai 6-3 m nei terrazzi più alti a 1-1.5 m nei terrazzi inferiori. Questi ultimi sono stati interessati da escavazioni intensive ed anche cave di prestito in concomitanza con la realizzazione delle principali arterie viarie del territorio.

Depositi di conoide: sono depositi alluvionali prevalentemente ghiaiosi, 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, soggetti o meno ad evoluzione dovuta alla dinamica torrentizia.

Depositi di frana attivi: si tratta di depositi gravitativi con evidenze di movimenti in atto (indipendentemente dalla entità e dalla velocità degli stessi). L'attività può essere continua o, più spesso, intermittente ad andamento stagionale o pluriennale. Vengono inclusi in questa categoria anche depositi di frane che al momento del rilevamento non presentano sicuri segni di movimento ma che denotano comunque una recente attività segnalata da indizi evidenti (lesioni a manufatti, assente o scarsa vegetazione, terreno rimobilizzato) all'occhio del tecnico rilevatore. Sono altresì incluse anche frane con velocità recepibile solo attraverso strumenti di precisione (inclinometri, estensimetri, ecc.), qualora esistenti.

Nel territorio forlivese figurano frane attive per crollo e/o ribaltamento, per scivolamento, per colamento di fango e di tipo complesso.

Depositi di frana quiescenti: sono depositi gravitativi senza evidenze di movimenti in atto o recenti. Generalmente si presentano con profili regolari, vegetazione con grado di sviluppo analogo a quello delle aree circostanti non in frana, assenza di terreno smosso e assenza di lesioni recenti a manufatti, quali edifici o strade. Per queste frane sussistono oggettive possibilità di riattivazione poiché le cause preparatorie e scatenanti che hanno portato all'origine e all'evoluzione del movimento gravitativo non hanno, nelle attuali condizioni morfoclimatiche, esaurito la loro potenzialità. Sono quindi frane ad attività intermittente con tempi di ritorno lunghi, generalmente superiori a vari anni. Nel territorio comunale forlivese figurano frane quiescenti di tipo indeterminato, per scivolamento, per colamento di fango e di tipo complesso.

Depositi di versante: sono presenti nel settore collinare del Comune di Forlì e sono caratterizzati da accumuli di detrito su versante sulla cui attribuzione genetica permane un grado di incertezza, non escludendo che sia dovuto a fenomeni franosi, mancando spesso i caratteri di forma tipici delle frane stesse. Generalmente 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), solo localmente stratificato e/o cementato. Come indicato sopra la genesi può essere gravitativa, da ruscellamento superficiale, da soliflusso.

Successione neogenico-quaternaria del margine appenninico-padano

A scala di bacino, i depositi affioranti tardo quaternari della successione post evaporitica del margine appenninico-padano sono stati raggruppati nel Supersintema Emiliano Romagnolo. Al margine appenninico affiorano solamente depositi di tipo alluvionale che presentano un limite inferiore inconforme (Ricci Lucchi *et alii,*

1982), evidenziato da una discordanza angolare sui depositi litorali (Sabbie di Imola) e marini (Gruppo del Santerno) del Supersintema Quaternario Marino (Qm). Nel sottosuolo della pianura invece il Supersintema è costituito da depositi alluvionali, deltizi, litorali e marini che, disponendosi in successioni cicliche di vario ordine gerarchico, poggiano in discordanza angolare su depositi correlabili alle Sabbie di Imola.

Il Supersintema Emiliano Romagnolo è diviso al suo interno in due unità stratigrafiche di rango inferiore definiti Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI) e Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES). Quest'ultima unità, affiorante nel territorio di Forlì, è costituita da depositi alluvionali intravallivi, terrazzati, di conoide alluvionale ghiaiosa e di interconoide, passanti lateralmente a limi più o meno sabbiosi e argillosi di piana alluvionale. In affioramento comprende anche depositi litorali e marini (cfr. Fig. 17).

L'unità è suddivisa in subsintemi, sulla base dell'individuazione di deboli discordanze angolari o di scarpate erosive particolarmente ampie, e, nel sottosuolo della pianura, di bruschi contatti fra depositi trasgressivi marino marginali e palustri su depositi di conoide e di piana alluvionale.

Il contatto di base è erosivo e discordante sul Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (in aree limitrofe) e sui depositi marini miopliocenici. Lo spessore massimo in pianura è di un centinaio di metri circa, quello nel sottosuolo circa 200 m.

Nelle aree collinari e pedecollinari del territorio del Comune di Forlì si distinguono:

Subsintema di Ravenna *(Pleistocene superiore-Olocene)*

Nei settori intravallivi ghiaie passanti a sabbie e limi organizzate in numerosi ordini di terrazzi alluvionali. Negli sbocchi vallivi e nelle piane alluvionali ghiaie, sabbie, limi ed argille. Lo spessore massimo dell'unità è di circa 25 metri. Il limite superiore è rappresentato dalla superficie deposizionale, per gran parte relitta, corrispondente al piano topografico, mentre il contatto di base è discontinuo, spesso erosivo e discordante, sui depositi marini e alluvionali sottostanti.

Su base morfologica, archeologica e pedostratigrafica, all'interno del Subsintema di Ravenna, viene distinta l'unità di Modena.

Unità di Modena

Ghiaie prevalenti e sabbie, ricoperte da una coltre limoso argillosa discontinua, organizzate in due ordini di terrazzi alluvionali. L'unità di Modena è sedimentata nell'intervallo temporale costituito da una successione la cui deposizione è inquadrabile nell'ambito degli eventi alluvionali che hanno caratterizzato gli ultimi 1.500 anni di storia evolutiva. Lo spessore massimo dell'unità è di alcuni metri. Il profilo di alterazione è di esiguo spessore (poche decine di centimetri). L'ambiente deposizionale è quello di piana alluvionale.

Subsintema di Villa Verucchio *(Pleistocene superiore)*

Sono presenti ghiaie, sabbie, limi ed argille di origine fluviale, piana intravalliva e conoide alluvionale. Depositi organizzati in diversi ordini di terrazzo. Il tetto dell'unità è generalmente rappresentato da suoli non calcarei molto evoluti di colore bruno scuro. Il limite inferiore è erosivo e discordante sui depositi sottostanti. Nel sottosuolo di pianura l'unità corrisponde ad un ciclo trasgressivo-regressivo costituito da una porzione basale, di pochi metri, di sabbie litorali (Tirreniano Auct.) e argille e limi palustri; una porzione intermedia contenente limi sabbiosi, limi ed argille di argine, rotta fluviale e piana inondabile che include subordinati depositi ghiaiosi di canale fluviale (piana alluvionale); una porzione sommitale con prevalenti ghiaie e sabbie di canale ed argine fluviale (conoide e piana alluvionale). Il limite superiore nel sottosuolo è dato dal contatto netto dei depositi grossolani di conoide e piana alluvionale sommitali con i sovrastanti depositi fini di tracimazione fluviale e palude.

Subsintema di Bazzano *(Pleistocene medio)*

Questo Subsintema è costituito da depositi ghiaiosi, sabbiosi e limo-argillosi di terrazzo intravallivo e di conoide alluvionale. Al tetto presenta suoli decarbonatati con fronte di alterazione fino a 5-7 metri, colore variabile da rosso bruno a giallo bruno. Il contatto inferiore è in discontinuità su unità più antiche.

Subsintema di Torre Stagni *(Pleistocene medio)*

Presenta depositi ghiaioso-sabbiosi, limosi e limo argillosi di terrazzo intravallivo e conoide alluvionale; contengono diverse intercalazioni di suoli. Al tetto figurano suoli decarbonatati di colore bruno giallastro o bruno scuro spesso con fronte di alterazione fino a 10 metri, talvolta rubefatti, al di sotto dei quali possono essere presenti diversi suoli non calcarei meno sviluppati. Contatto inferiore erosivo e in discontinuità su unità più antiche.

Subsintema di Liano *(Pleistocene medio)*

Costituito da ghiaie di conoide alluvionale, spesse sino ad una decina di metri, passanti ad alternanze di limi sabbiosi e limi argillosi e da ghiaie sabbiose di terrazzo intravallivo. Al tetto è generalmente presente un suolo non calcareo, con fronte di alterazione maggiore di 10 metri, di colore bruno giallastro; a tratti sono presenti suoli non calcarei di colore bruno rossastro, sviluppati direttamente sulle ghiaie. Il limite inferiore è erosivo e discordante sui sottostanti depositi marini.

Depositi quaternari di ambiente litorale, spiaggia e delta conoide

Nella zona collinare forlivese, tra i depositi quaternari di ambiente litorale, di spiaggia e di delta conoide della successione neogenico-quaternaria del margine appenninico-padano, figurano:

Sabbie di Imola - membro di Monte Castellaccio *(Pleistocene medio)*

Sabbie ed arenarie poco cementate fini, finissime e subordinatamente medie e grossolane di colore giallo in strati amalgamati con rari livelli di ghiaie fini frequentemente silicee. Queste sabbie passano verso l'alto ad alternanze in strati medi e spessi di ghiaie poligeniche, spesso caratterizzate da colori di alterazione bruno violacei con diametro massimo fino a 12 centimetri e subordinate sabbie. Localmente distinta una litofacies conglomeratica. Ambiente di sedimentazione di spiaggia e delta conoide. Contatto inferiore erosivo e discordante. Spessore massimo di 20 metri circa.

Depositi pliocenici e quaternari marini

Sempre nel territorio collinare forlivese, tra i depositi pliocenici e quaternari marini del margine appenninico-padano affiorano:

Argille Azzurre *(Pliocene inferiore – Pleistocene inferiore)*

Unità costituita da argille, argille marnose, localmente siltose, marne argillose e siltose, grigie e grigio-azzurre, talora grigio plumbeo, con stratificazione mal distinguibile per bioturbazione. Vi si presentano locali intercalazioni di sabbie fini in strati sottili o medi. Nella parte inferiore della formazione localmente sono presenti sottili livelli discontinui di biocalcareniti fini e siltiti giallo, o ocra se alterate, sottilmente laminate. Frequenti i microfossili. Variabile la concentrazione di malacofaune a Gasteropodi e Lamellibranchi, sia come biosomi che come bioclasti. L'ambiente di sedimentazione varia da piattaforma, localmente litorale, a scarpata. Foraminiferi planctonici appartenenti nei vari livelli alle zone a *Globorotalia margaritae, G. puncticulata, G. bononiensis, G. crassaformis, G. inflata* e *Hyalinea*

baltica. Contatto inferiore graduale rapido sulle Marne di Cella, paraconcordante o marcato da una lieve discordanza angolare sulla Formazione a Colombacci, discordante su unità più antiche. Potenza fino a circa 1000 metri circa.

Litofacies arenacea di Lardiano *(Pliocene medio-superiore)*

Presenta strati e pacchi di strati arenaceo-argillosi, con A/P da 3/1 a 5/1; arenarie medio-fini e fini, grigie, talora nettamente gradate, poco cementate, in strati da sottili a spessi, con abbondanti frustoli carboniosi, biosomi, bioclasti e inclusi pelitici; argille marnose, a volte laminate, in strati da molto sottili a medi, passanti talora ad argille sabbiose e siltose; siltiti fittamente laminate, in letti sottili e molto sottili, con spalmature di materiale organogeno (diatomee, frustoli, ecc). Questa litofacies passa lateralmente a prevalenti argille e marne argillose con subordinati letti sottili e molto sottili di arenaria fine. Presenza di foraminiferi planctonici delle zone a *Globorotalia bononiensis*, *G. aemiliana* e *G. crassaformis*. Potenza del deposito 0-200 metri.

Litofacies pelitico-sabbiosa *(Pliocene superiore-inferiore)*

Presenta alternanza di arenarie e siltiti, in strati da molto sottili a medi; argille siltoso-sabbiose, argille marnose, marne argillose grigio-verdastre, in strati sottili e molto sottili, lenticolari, con laminazione piano-parallela, ondulata e incrociata (vi compaiono livelli di concentrazione di biosomi, bioclasti e frustoli carboniosi); arenarie e siltiti con alta componente argilloso-siltosa; argille e siltiti, con subordinate sabbie e siltiti argillose, mal stratificate; argille grigio-scure, un po' sabbiose, in lenti di potenza metrica; arenarie in lenti di potenza metrica. Vi si intercalano lenti decimetriche di Argille Azzurre. Microfossili scarsi, con Foraminiferi planctonici forse appartenenti nella parte alta alla zona a *Hyalinea balthica*. La potenza affiorante è di oltre 600 metri. Talora costituisce la parte superiore della Formazione.

Le Argille Azzurre e, per una piccola area, le Sabbie di Imola, costituiscono il substrato roccioso dell'area collinare del Comune di Forlì. Le Argille Azzurre subiscono una degradazione elevata da parte degli agenti atmosferici, che producono sia una elevata erosione incanalata sia frequenti fenomeni di franamento superficiale.

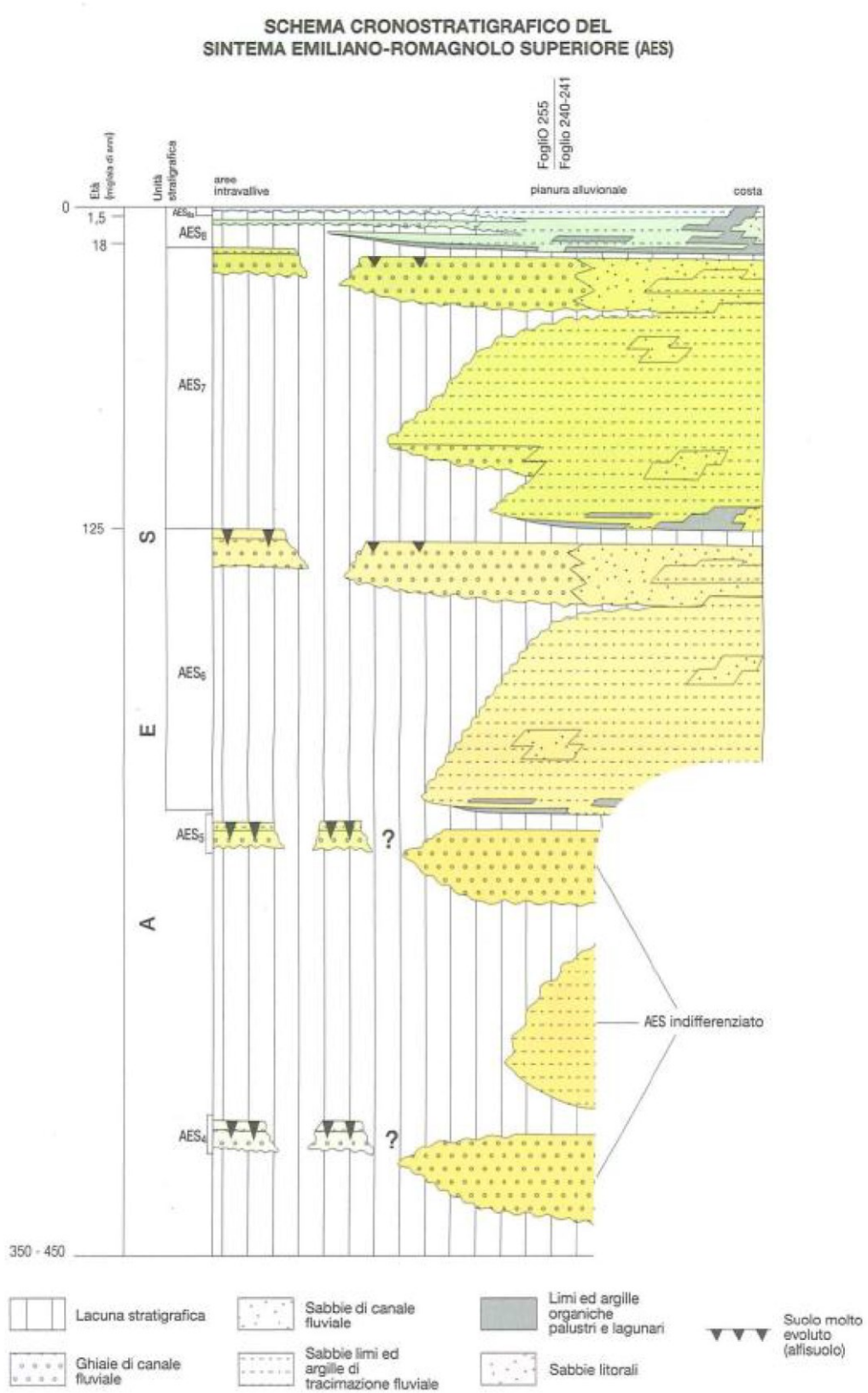


FIG. 17 – SCHEMA CRONOSTRATIGRAFICO DEL SINTEMA EMILIANO ROMAGNOLO SUPERIORE (AES), TRATTO DAL FOGLIO 240-241 FORLÌ-CERVIA DELLA CARTA GEOLOGICA D'ITALIA IN SCALA 1:50.000

3.2. Geomorfologia

L'assetto geomorfologico del territorio comunale di Forlì è inquadrato nello schema geologico-geomorfologico del margine appenninico-padano finora descritto. Le morfologie fondamentali presenti nel territorio forlivese sono infatti strettamente connesse alle proprietà e all'origine geologica delle formazioni affioranti nelle sue varie parti.

Dal punto di vista morfologico, nel territorio in esame è possibile distinguere le unità morfologiche riconoscibili a livello della pianura e quelle tipiche del settore pedecollinare e collinare.

In particolare, il settore collinare del comune di Forlì, contraddistinto da litotipi argillosi e litotipi sabbiosi (Argille Azzurre e Sabbie di Imola), presenta rilievi piuttosto dolci e in genere caratterizzati da acclività superficiali inferiori al 25%. Nei terreni argillosi sono diffuse morfologie perlopiù calanchive ed è frequente la propensione al dissesto.

In queste zone l'evoluzione morfologica spesso è determinata da una intensa erosione di superficie ad opera delle acque di precipitazione e da instabilità più o meno localizzate.

I versanti con inclinazione da moderata a sensibilmente elevata sono predominanti nei terreni prevalentemente argillosi e argilloso – sabbiosi e in quelli sui quali si sono impostate le coperture detritiche. Il paesaggio in tali ambiti tende ad una morfologia estremamente più dolce rispetto a quella suddetta e che in alcuni parti del territorio assume alto grado di evoluzione e notevole estensione superficiale. I versanti sono confinati lateralmente da incisioni prodotte dai corsi d'acqua che immergono conformemente ai vettori di massima pendenza. In questo ambiente la morfologia è diretta espressione dei processi geomorfologici che hanno regolato il modellamento della superficie topografica, compresi quelli di erosione idrica concentrata.

Dall'analisi degli aspetti e delle forme legate alla stabilità globale del territorio emerge che i maggiori presupposti di fragilità statica, risiedono nelle aree occupate da terreni argillosi, dove infatti si registra il maggiore addensamento dei dissesti e delle forme calanchive. L'azione erosiva delle acque, infatti, rappresenta il più incisivo fattore di destabilizzazione dei materiali argillosi. Negli affioramenti rocciosi, la stabilità specialmente delle porzioni corticali, è regolata dai sistemi di fratturazione e dal loro addensamento, nonché dalla consistenza della roccia affiorante e dal suo grado di alterazione.

Il progressivo sollevamento e graduale emersione del territorio collinare e montano, conseguente all'orogenesi appenninica, ha determinato in queste zone un intenso processo erosivo che ha esposto, localmente, i sedimenti litoranei e marini descritti nel paragrafo precedente. Successivamente alle fasi glaciali e interglaciali ed alle conseguenti variazioni del livello marino, ma anche in seguito a variazioni nella velocità tettonica, si sono poi sedimentati i depositi alluvionali quaternari, che attualmente costituiscono una successione di terrazzi intravallivi.

Nel settore di pianura è possibile riconoscere i più importanti terrazzamenti alluvionali legati all'evoluzione del relativo corso d'acqua. Si tratta di depositi alluvionali, abbandonati dai corsi d'acqua a quote decrescenti, mentre i loro alvei incidevano un rilievo in fase di progressiva accentuazione. I depositi alluvionali terrazzati sono spesso interessati da coltri eluvio-colluviali di versante e incisi da solchi di ruscellamento concentrato, appartenenti al reticolo idrografico minore, che hanno generato diversi sistemi di conoide.

Nel complesso, la morfologia della pianura alluvionale di Forlì è piuttosto monotona, salvo che in corrispondenza dei sistemi di conoide, dei terrazzi sugli alvei attuali e dei loro tratti arginati nella bassa pianura.

A livello altimetrico si segnala che il centro abitato di Forlì si trova ad un'altitudine di 34 m s.l.m. La quota massima, nel territorio comunale, è pari a 220 m s.l.m. nel settore collinare, mentre la quota minima è di 13 m s.l.m.

Quanto alla rete idrografica del territorio forlivese è formata essenzialmente da tre aste principali rappresentate dai fiumi Montone, Rabbi e Ronco (già Bidente). Il fiume Rabbi, a sud di Forlì tra San Varano e

Vecchiazzano, si innesta nel Montone, rappresentando così il suo maggior affluente. Sono presenti, inoltre, un cospicuo numero di torrenti, canali, fossi e scoli che confluiscono, in parte, nei collettori principali di cui sopra.

L'andamento dell'idrografia di superficie risulta prevalentemente condizionata dall'assetto strutturale appenninico: infatti appare evidente l'andamento dei principali corsi d'acqua impostati da SSW a NNE, trasversali alla direttrice appenninica.

La zona del territorio comunale posta a valle della via Emilia è invece caratterizzata da una fitta rete di scoli ad andamento subparallelo.

4. INDAGINI ED ANALISI

Di seguito vengono descritte le indagini e le analisi specifiche effettuate per la microzonazione di terzo livello, la cui ubicazione è rappresentata graficamente in Fig. 18, oltre che nella Carta delle indagini alla scala 1:10.000.

I punti di indagine sono stati individuati, in accordo con i Tecnici del Comune, tenendo ovviamente conto dell'approfondimento di secondo livello.

I report di tutte le indagini di nuova esecuzione sono consultabili nell'Elaborato 7 – Nuove indagini.

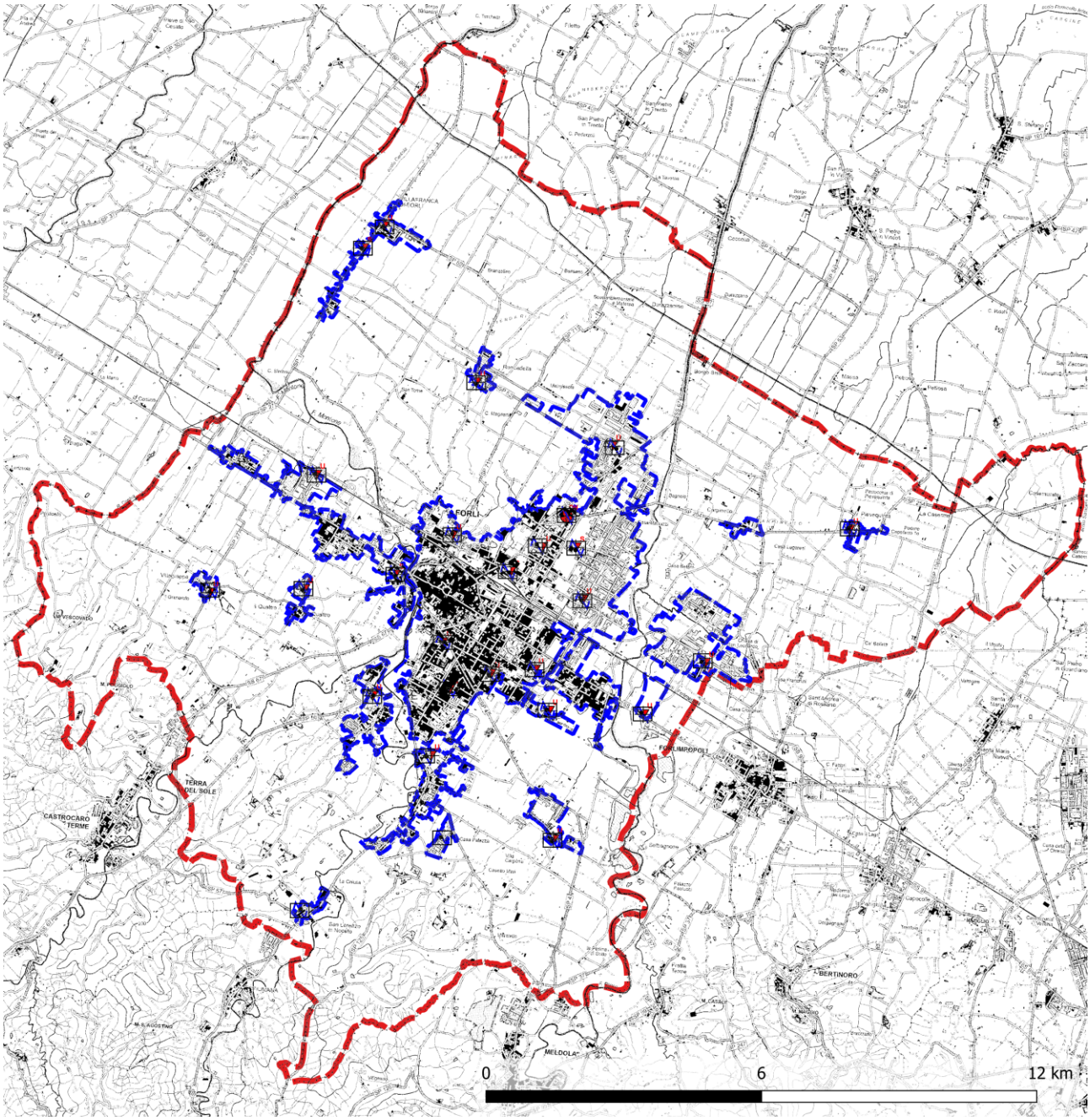


FIG. 18 – UBICAZIONE DELLE INDAGINI EFFETTUATE PER L'ANALISI DI 3° LIVELLO

4.1. Sondaggio a carotaggio continuo

Durante la campagna indagine è stato eseguito, da parte della ditta Studio LZ CPT di Copparo (FE), un sondaggio verticale a carotaggio continuo spinto a una profondità di 30 metri dal piano campagna.

Il sondaggio è stato attrezzato con un tubo in PVC per l'esecuzione della prova Down-Hole (cfr. paragrafo 4.6).

Nell'indagine è stata utilizzata una sonda a rotazione impiegando per la perforazione un carotiere semplice fino a 30 m di profondità.

Nella litostratigrafia allegata (cfr. Elaborato 7) sono riportate:

- le suddivisioni stratigrafiche con relative quote e le descrizioni litologiche effettuate direttamente in campagna con metodi speditivi;
- la determinazione speditiva di campagna del valore di pocket penetrometer, espressi in KPa.





FIG. 19 – UBICAZIONE DEL SONDAGGIO A CAROTAGGIO CONTINUO REALIZZATO PER IL PRESENTE STUDIO

4.2. Analisi di laboratorio

Il campione di terreno prelevato durante l'esecuzione del sondaggio a carotaggio continuo (cfr. paragrafo 4.1) è stato inviato al laboratorio della ditta SOCOTEC di Ferrara, certificato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, sul quale è stata eseguita una prova in colonna risonante per la determinazione dei parametri G/G_0 e D.

I risultati completi sono riportati nell'Elaborato 7.

4.3. Prove penetrometriche con punta elettrica e piezocono (CPTU)

Nel corso della campagna d'indagine, sono state eseguite, sempre da parte della ditta Studio LZ CPT di Copparo (FE), n° 20 prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono, utilizzando un penetrometro Pagani TG 63-100, con spinta nominale da 10 t, attrezzato con una punta Tecnopenta G1-CPLSTI231023.

La prova è consistita nella misura della resistenza alla penetrazione di una punta elettrica, di dimensioni e caratteristiche standardizzate, infissa nel terreno a velocità costante (V = 2 cm/s ± 0.5 cm/s); la penetrazione avviene attraverso un dispositivo di spinta, che agisce su una batteria di aste cave con il cavo di trasmissione dati all'interno.

Lo sforzo necessario per l'infissione viene determinato a mezzo di un opportuno sistema di misura estensimetrico collegato alla punta ed al manicotto dell'attrito laterale.

I dati delle resistenze alla punta, al manicotto laterale e dell'inclinazione della punta vengono registrate su supporti magnetici e successivamente elaborati.

Le dimensioni della punta/manicotto sono standardizzate, e precisamente:

- diametro di base del cono ϕ = 35.7 mm
- area della punta conica Ap = 10 cm^2
- angolo apertura del cono B = 60°

Nei diagrammi e tabulati delle prove riportati nell'Elaborato 7, sono riportati i valori, rilevati a intervalli regolari di 2 cm durante l'infissione dello strumento, dei seguenti parametri:

- qc (MPa) = resistenza alla punta (conica);
- fs (kPa) = resistenza laterale (manicotto);
- U (kPa) = pressione dei pori (setto poroso);

oltre ai relativi grafici e a quello del rapporto fs/qc (%).

Il limite di queste prove, che danno risultati più raffinati rispetto sia a quelle statiche con punta meccaniche che a quelle dinamiche, è che non riescono ad attraversare gli orizzonti ghiaiosi.

4.4. Prove penetrometriche con piezocono sismico (SCPTU)

Per verificare le caratteristiche sismiche dei terreni sono state realizzate n° 4 prove con cono sismico attrezzando lo strumento con una punta con piezocono e geofoni.

Oltre ai normali parametri della prova CPTU (cfr. paragrafo precedente) registrati ogni 2 cm, nella prova con sismocono, ad ogni metro di profondità, viene sospesa l'infissione, e, a piano campagna, vengono generate delle

onde di taglio (onde S) percuotendo orizzontalmente, con una mazza, una trave vincolata al terreno, per avere un sismogramma con una prevalente fase S.

Tramite sensori sismici, presenti all'interno della punta penetrometrica, e adeguato acquisitore dinamico, è possibile rilevare e registrare i segnali prodotti in superficie e, di conseguenza, determinare i tempi necessari alle onde S per percorrere il tratto da piano campagna fino alla profondità a cui si trova il geofono (tempi di arrivo).

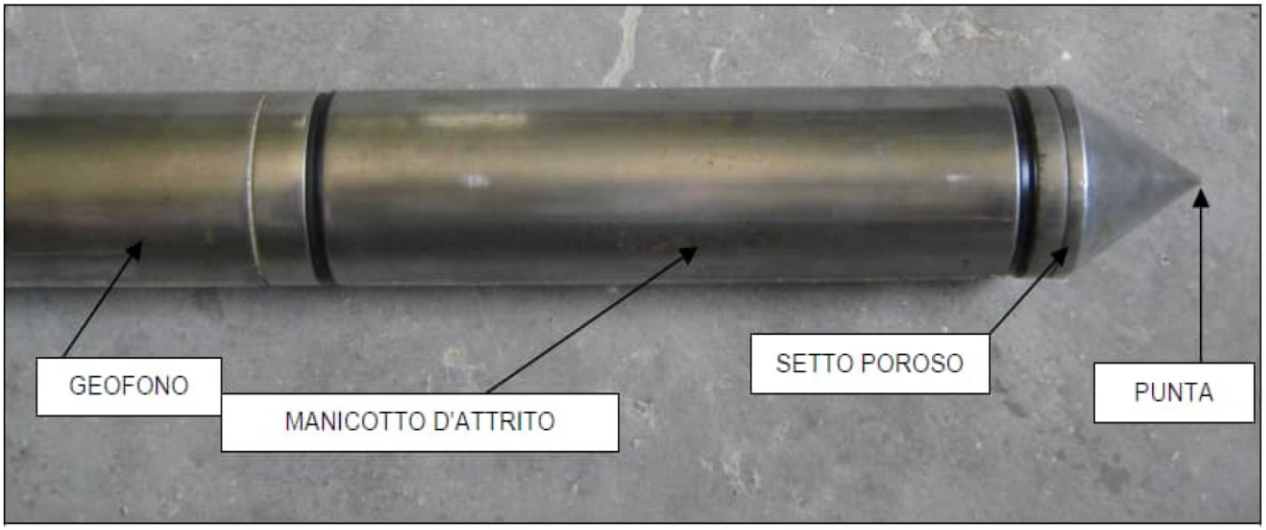


FIG. 20 – PUNTA DEL PENETROMETRO ELETTRICO E SISMOCONO

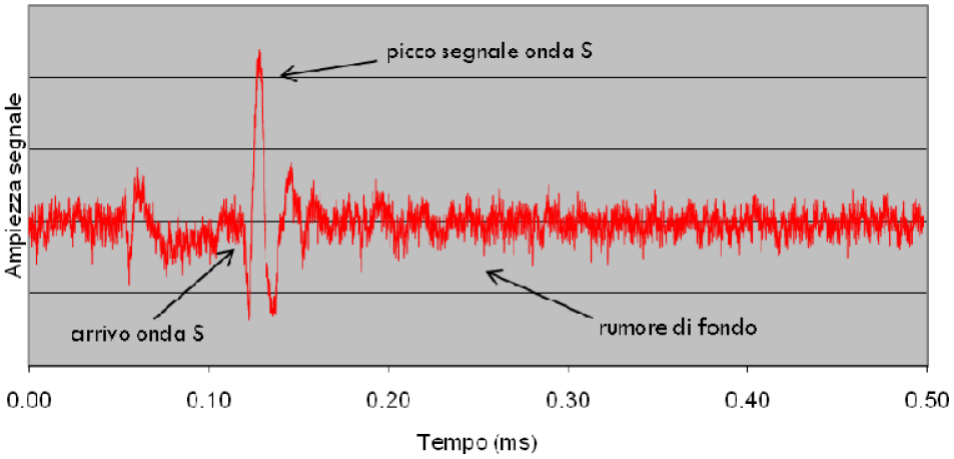


FIG. 21 – ESEMPIO DI SISMOGRAMMA DEL SEGNALE REGISTRATO A 10 M DI PROFONDITÀ

Attraverso il rapporto distanza/tempo di percorrenza, è possibile determinare, direttamente e con grande precisione, le velocità delle onde S, caratterizzando i vari strati di terreno attraversati.

In pratica la prova con sismocono è da considerare una prova Down-Hole a tutti gli effetti.

Nella seguente Fig. 22 viene riportato, a titolo esemplificativo, il grafico della velocita delle onde S, in funzione della profondità, registrata nel corso di una prova SCPTU appositamente effettuata per il presente studio.

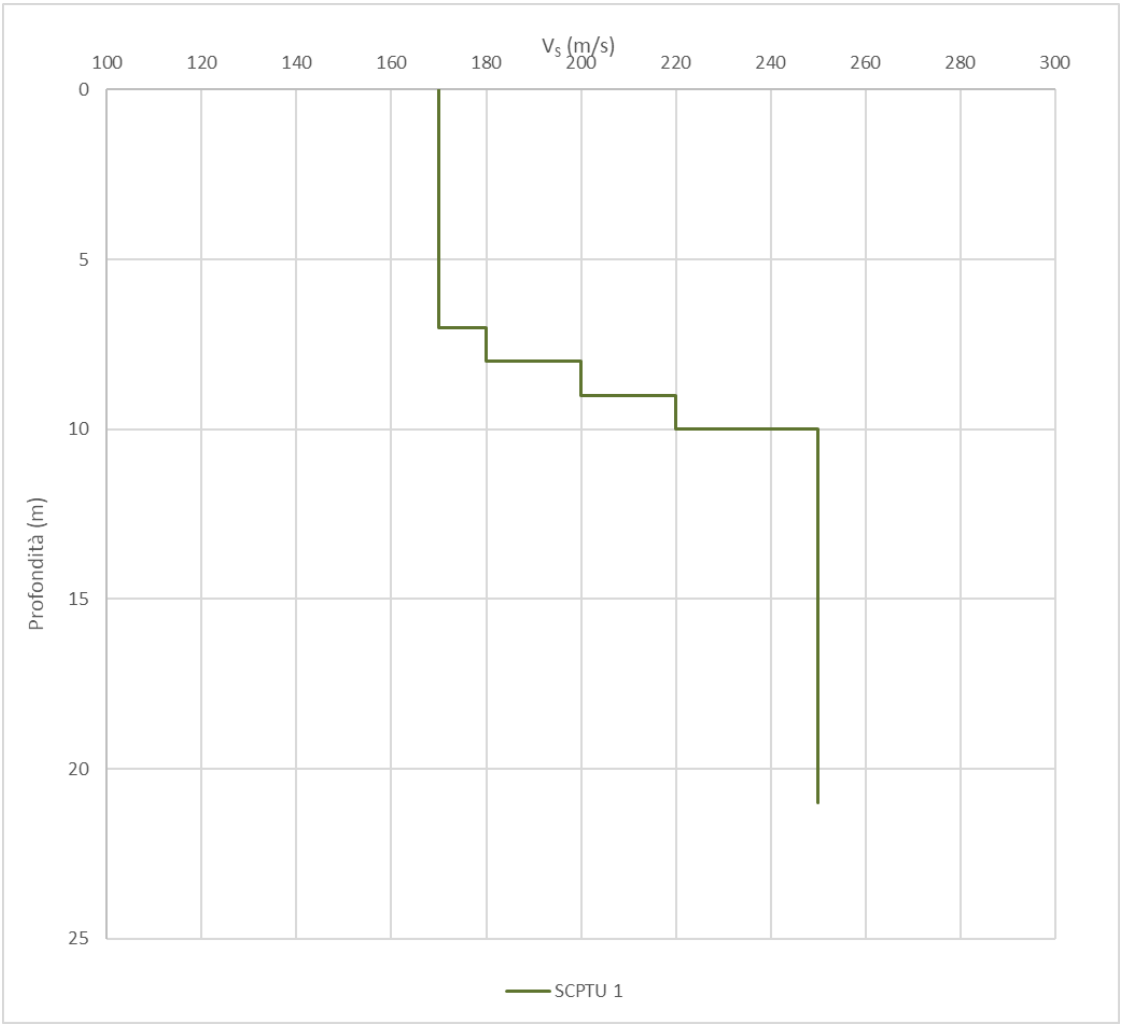


FIG. 22 – VALORI DI VS IN FUNZIONE DELLA PROFONDITÀ PER LA PROVA SCPTU1

4.5. Tomografie elettriche ERT

L'analisi delle caratteristiche geoelettriche dei primi 10÷12 m del sottosuolo è stata effettuata mediante cinque prospezioni con metodo geoelettrico multielettrodo in tomografia elettrica verticale (ERT).

Tale metodologia consente di identificare la tipologia dei materiali indagati in funzione della differenza di resistenza da essi opposta al passaggio delle linee di flusso elettriche.

In particolare, tale indagine è stata effettuata con acquisizione multielettrodo utilizzando 48 elettrodi di misura disposti ad interasse di 1.5 m, in configurazione *Wenner alfa*.

La disposizione degli elettrodi ha permesso di eseguire linee della lunghezza di 70.5 m, utili per indagare i primi 10/12 m di profondità con una buona risoluzione (cfr. Fig. 23).

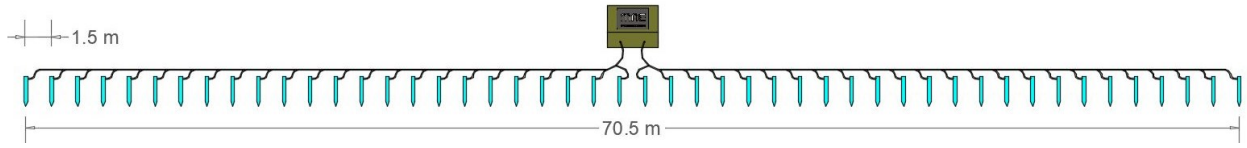


FIG. 23 – SCHEMA DELLA GEOMETRIA DEGLI STENDIMENTI GEOELETTRICI

Sono state così acquisite per ogni indagine 360 misure distribuite uniformemente lungo tutto lo stendimento. Nella sottostante Fig. 24 si riporta una fotografia di una delle due stesse geoelettriche.



FIG. 24 – FOTOGRAFIA ESEGUITA DURANTE LA STESA DEI CAVI GEOELETTRICI

Dette indagini sono state effettuate con GEORESISTIVIMETRO MAE X612EM+ (www.mae-srl.it), acquisitore digitale modulare per prospezione geoelettrica multielettrodo. Il Georesistivimetro è dotato di un sistema di gestione automatica degli elettrodi, in grado, cioè di commutare gli elettrodi disposti lungo la sezione da investigare in elettrodi di immissione di corrente (punti di energizzazione del terreno) e in elettrodi di misura del potenziale elettrico con tutte le possibili combinazioni quadripolari.

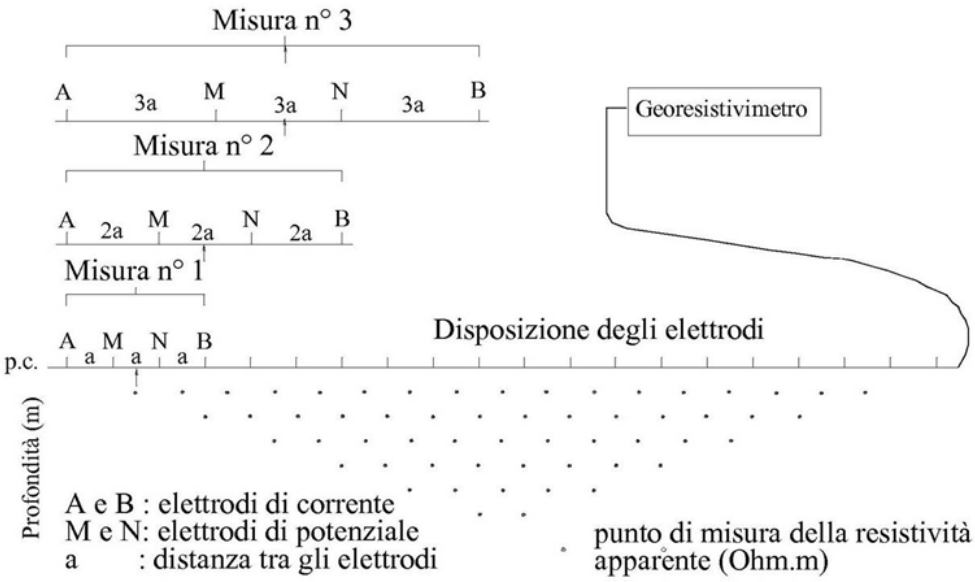


FIG. 25 – SCHEMA DELLA PROCEDURA DI ACQUISIZIONE AUTOMATICA MULTIELETTRODO

I dati ottenuti in fase di acquisizione hanno consentito la costruzione di una matrice di valori di resistività la cui inversione, mediante *software* ERTLab64 della GEOSTUDI ASTIER (http://www.geostudiastier.it/), ha restituito la definizione della distribuzione di resistività elettrica del mezzo investigato mediante visualizzazione grafica in 2D in cui i colori corrispondono a determinati valori di resistività reale (cfr. Fig. 26).

L'esame della sezione tomografica evidenzia che la resistività nei siti in esame variano da circa 5 a un massimo di 250 Ohm/m. Tali resistività risultano coerenti con le litologie riscontrate in sito, in parte a forte componente argillosa e pertanto poco resistive e in parte sabbiose e/o ghiaioso sabbiose caratterizzata da resistività più elevate.

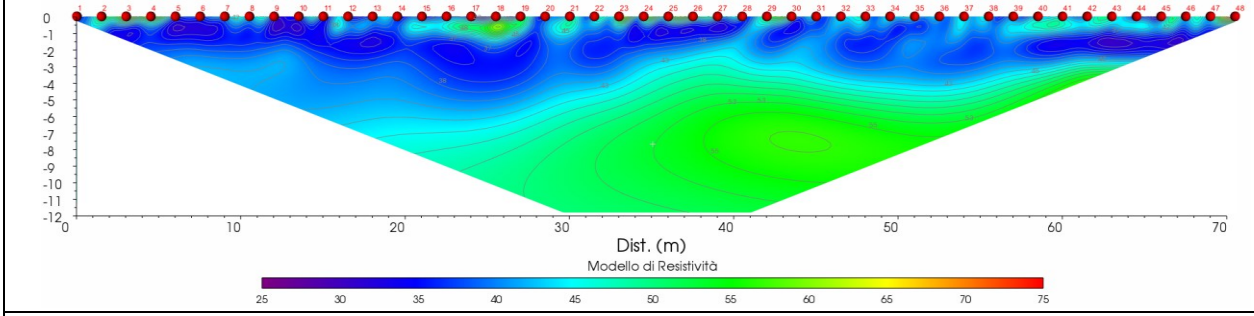
In tale contesto la tomografia elettrica è risultata una buona indagine per definire il passaggio tra materiali fini di copertura prevalentemente argillosi e i sottostanti materiali granulari o viceversa per definire lo spessore di lenti superficiali maggiormente resistive.

I dati ottenuti trovano riscontro dalle altre indagini geognostiche realizzate, che hanno consentito una buona taratura del modello.

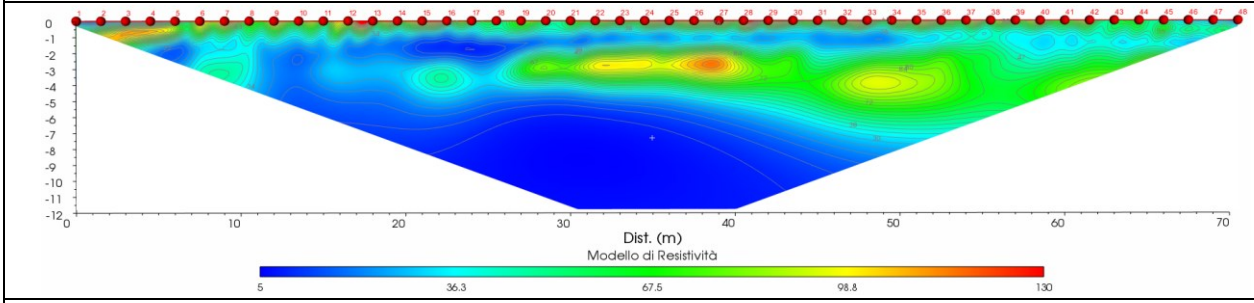
Eventuali distorsioni ai limiti laterali della sezione sono correlabili ad effetti di bordo e limiti interpretativi.

Per ulteriori informazioni sul metodo si rimanda ai report contenuti nell'Elaborato 7.

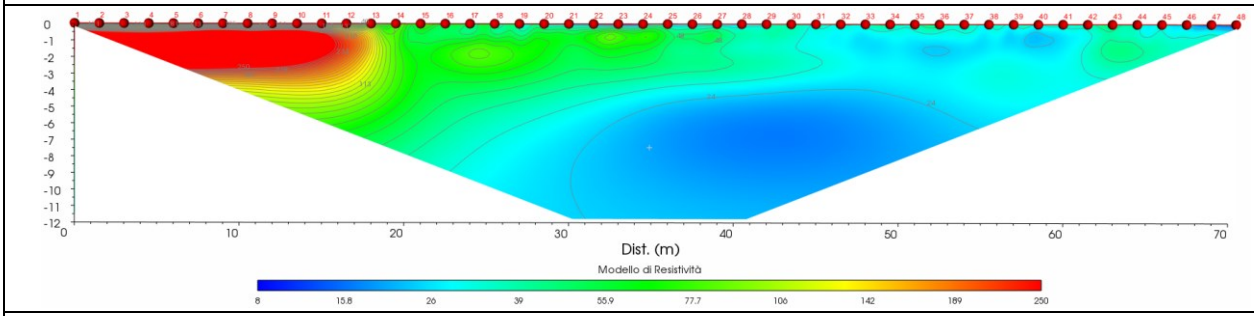
ERT1 – Via Nenni, Forlì



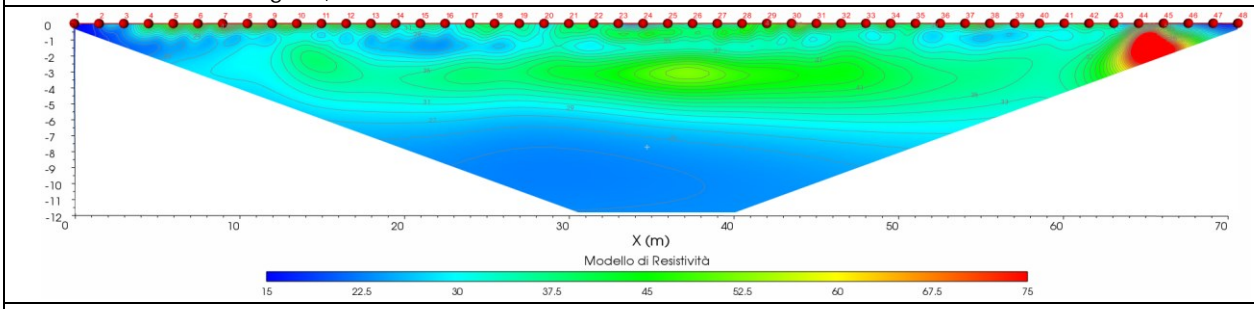
ERT2 – Loc. San Lorenzo in Noceto



ERT3 – Via Correcchio, Forlì



ERT4 – Parco delle Stagioni, Forlì



ERT5 – Via Briganti, Forlì

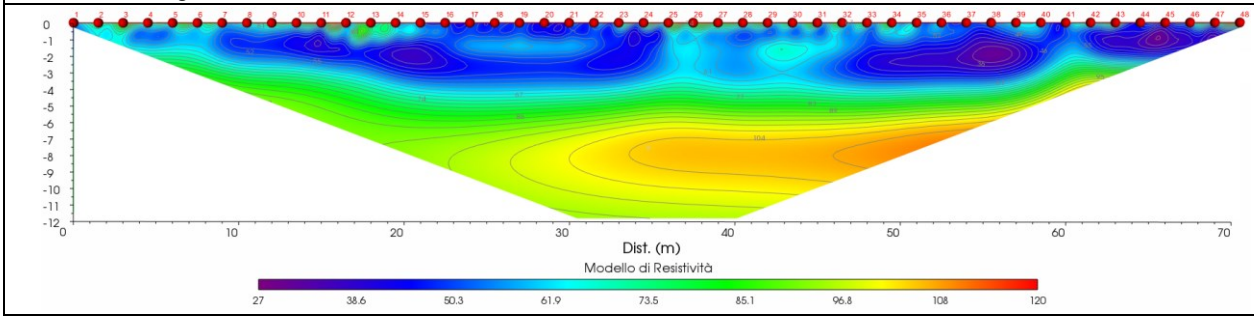


FIG. 26 – PROFILI DI TOMOGRAFIA ELETTRICA OTTENUTI

4.6. Prova sismica in foro di tipo Down-Hole

Tra le varie indagini sismiche realizzate al fine di definire le caratteristiche sismiche dei terreni è stata eseguita un'indagine tipo Down-Hole. A tale scopo il sondaggio S1, al termine della perforazione, è stato attrezzato con un tubo in PVC del diametro di 3 pollici. Tale tubo è stato reso solidale con il terreno mediante cementazione con boiacca di cemento iniettato mediante pompa a bassa pressione.

Una volta che il cemento ha fatto presa, si è proceduto all'esecuzione della prova sismica del tipo Down-Hole.

La prova Down-Hole è stata eseguita con cadenza delle misure pari ad un metro, dal p.c. fino a fondo foro, ad una profondità di 30 metri, utilizzando un sismografo collegato ad un geofono da foro tridimensionale con almeno una terna di geofoni orientati secondo gli assi x – y – z.

Gli impulsi sismici sono stati originati con procedure specifiche in modo da generare, oltre alle onde di compressione (Onde P), anche onde a componente di taglio orizzontale (onde SH).

Le prove sismiche Down-Hole sono eseguite con lo scopo di misurare la velocità delle onde sismiche dirette, che si propagano dalla superficie nel terreno in profondità, energizzando il terreno in direzione verticale e in direzione trasversale (parallelamente al suolo).

Nel primo caso sono generate prevalentemente onde di compressione (onde P) che si propagano in profondità e vengono registrate al meglio dal geofono verticale (asse z).

Nel secondo caso verranno generate prevalentemente onde di taglio (onde S) visibili principalmente sui geofoni con l'asse posto orizzontalmente (assi x e y).

Il sistema di ricezione, costituito da un geofono tridimensionale da foro ad ancoraggio elettromeccanico, viene calato nel foro, sino alla profondità massima di investigazione e progressivamente sollevato dell'interdistanza propria di ciascuna indagine (nel caso in esame 1 m).

Le onde di taglio hanno velocità inferiori rispetto a quelle di compressione e quindi raggiungono il geofono triassiale quando il primo fronte d'onda di compressione è già transitato. Questo passaggio purtroppo costituisce un disturbo per la misura delle onde trasversali, in quanto i geofoni orizzontali si trovano ancora in movimento all'arrivo dell'onda trasversale o di taglio. Per migliorare il rapporto fra l'energia dell'onda di compressione e l'energia dell'onda trasversale (di taglio) a favore di quest'ultima, si realizza una doppia energizzazione orizzontale con verso opposto.

L'analisi dei dati prevede un sismogramma per le forme d'onda relative al geofono verticale (asse z) e in un altro sismogramma le forme d'onda relative ai geofoni orizzontali (assi x e y).

L'interpretazione delle informazioni così acquisite consente di ricostruire l'andamento delle velocità delle onde sia di pressione che di taglio in funzione della profondità.

Nella seguente Fig. 27 si riporta una fotografia eseguita durante la realizzazione dell'indagine.

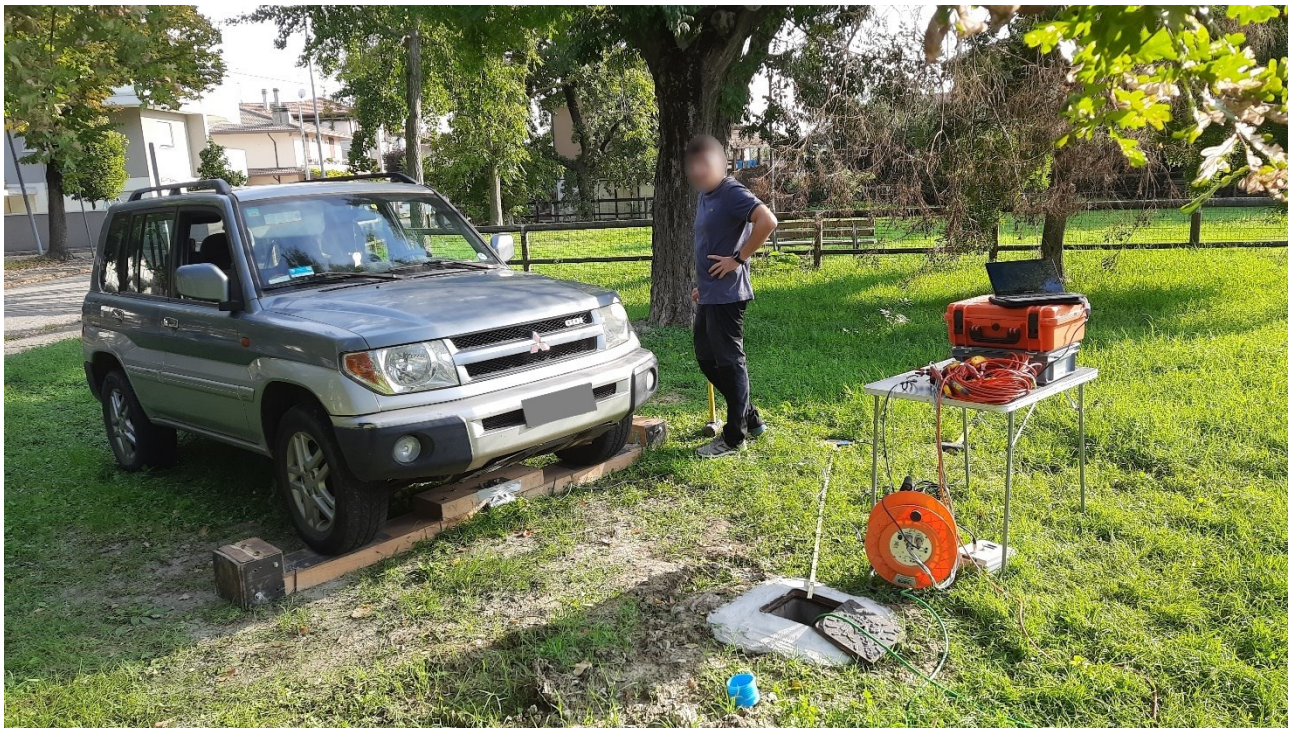


FIG. 27 – REALIZZAZIONE DELLA PROVA SISMICA DOWNHOLE

In Fig. 28 viene riportato il grafico, in funzione della profondità, della velocità delle sole onde S derivate dall'elaborazione della prova, grazie alle quali è possibile determinare anche la categoria sismica del sottosuolo.

La velocità equivalente delle onde sismiche di taglio, ($V_{s\,eq}$), è definita come:

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^{N} \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

dove h_i e V_i sono lo spessore e la velocità delle onde dello strato i-esimo di fondazione, N il numero degli strati e H la profondità del substrato.

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio Vs_{eq} è definita dal parametro V_{S30}, ottenuto ponendo H=30 m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Nel caso in esame, si è determinata una $V_{s,30}$ pari a **220.1 m/s**.

I reports completi sono contenuti nell'Elaborato 7.

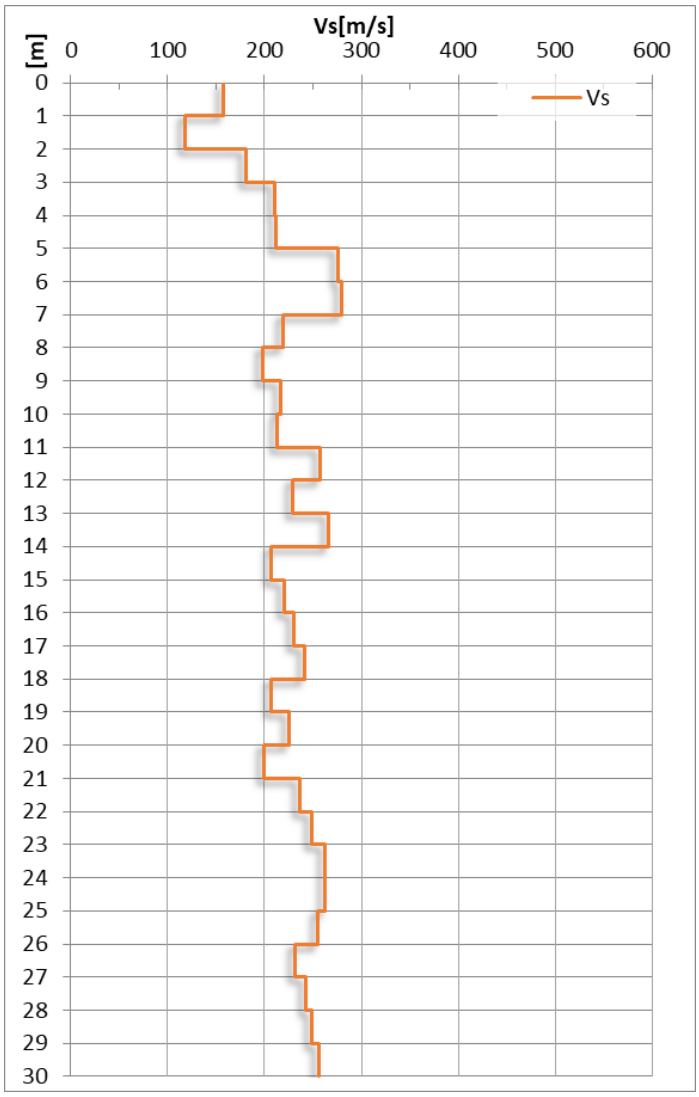


FIG. 28 – GRAFICO VS DERIVANTE DALLA PROVA DOWN-HOLE

4.7. Prove sismiche di tipo HVSR

Ai fini della determinazione della frequenza caratteristica dei suoli sono state eseguite in tutto n° 26 prove HVSR (*Horizzontal to Vertical Spectral Ratio)* tramite tromografo digitale, di cui 24 in corrispondenza dei punti in cui sono state eseguite le prove sismiche MASW+REMI, le altre 2 in corrispondenza del sondaggio e della CPTU10.

Le prove sono state condotta utilizzando un sismometro a stazione singola (tromografo digitale) in grado di registrare i microtremori lungo le due direzioni orizzontali (X, Y) e lungo quella verticale (Z), di un ampio intervallo di frequenze (0.1-100 Hz) e per una durata sufficientemente lunga (mediamente 20 minuti). Il moto indotto nel terreno è stato misurato dallo strumento in termini di velocità attraverso tre velocimetri, uno per ogni direzione di misura (X, Y e Z).

Nella figura Fig. 29 sottostante si riportano due fotografie della strumentazione su uno dei punti d'indagine.

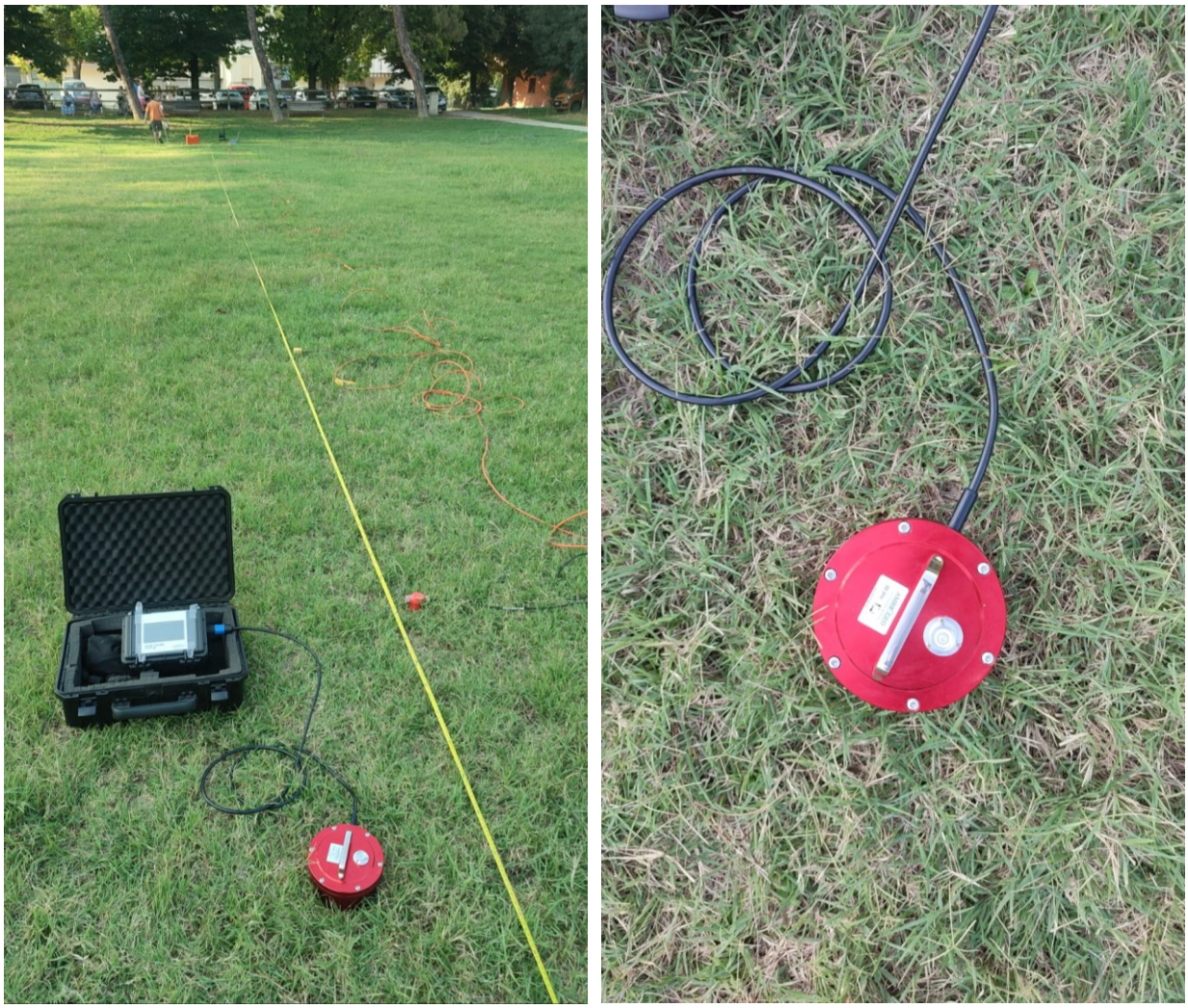


FIG. 29 – FOTOGRAFIA DEL TROMOGRAFO DURANTE L'ACQUISIZIONE HVSR

Le misure registrate sono state poi elaborate e restituite graficamente in forma di spettri H/V (rapporto H/V in funzione della frequenza, cfr. Fig. 30) e spettri delle singole componenti (componente del moto in funzione della frequenza per ognuna delle tre direzioni cfr, Fig. 31).

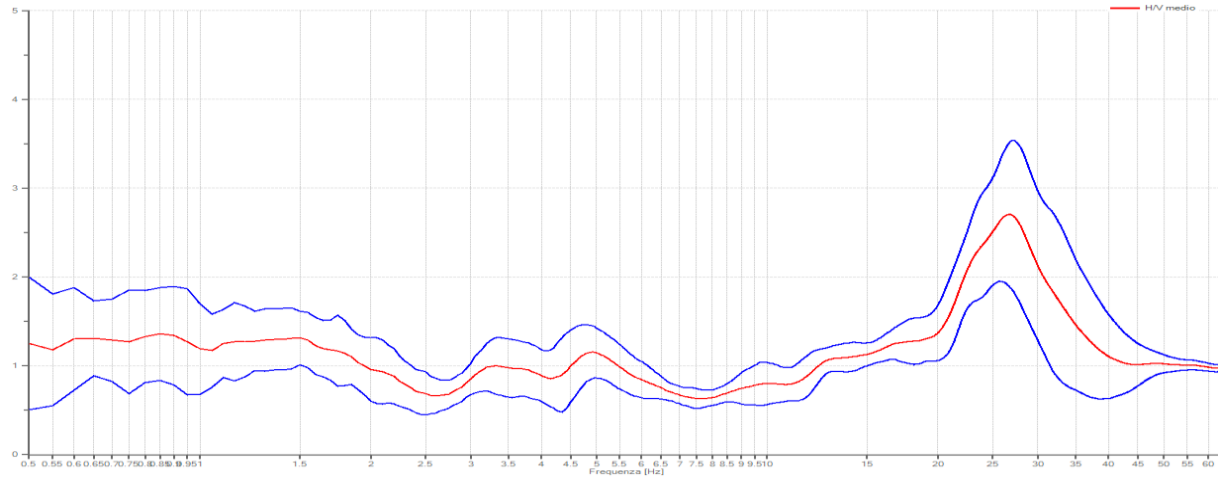


FIG. 30 - RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

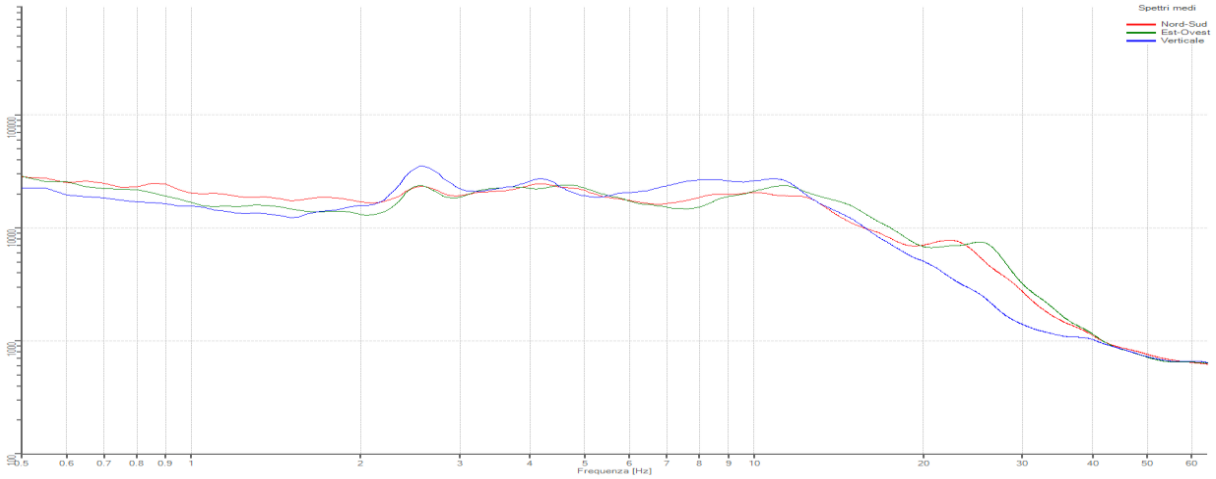


FIG. 31 – SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI

A riguardo, va sottolineato come il confronto fra questi due tipi di grafici consenta di distinguere i picchi di frequenza dovuti a disturbi nel corso della misurazione, in cui tutte le componenti hanno lo stesso andamento, da quelli dovuti a motivi stratigrafici, in cui la componente verticale, a differenza delle altre due, presenta un minimo locale.

Dalla prova tromografica è possibile ottenere la frequenza di risonanza caratteristica del sito (*Nakamura Y.*, 1989).

I reports completi sono riportati nell'Elaborato 7, mentre, nella seguente Tab. 2, sono indicate le frequenze principali corrispondenti ai picchi d'amplificazione individuati.

Codice MS	N. prova	Frequenza fondamentale F0	Ampiezza A0
040012P424118	HVSR1	3.1	1.1
040012P424119	HVSR2	1.4	1.06
040012P424120	HVSR3	0.68	1.3
040012P424121	HVSR4	14.5	1.21
040012P424122	HVSR5	1.1	2.45
040012P424123	HVSR6	1.1	2.15
040012P424124	HVSR7	14	2
040012P424125	HVSR8	6.8	0.98
040012P424126	HVSR9	3.35	2.35
040012P424127	HVSR15	5.5	2.3
040012P424128	HVSR16	4.3	1.4
040012P424129	HVSR18	5	1.9
040012P424130	HVSR19	15	2.7
040012P424131	HVSR22	0.95	2.55
040012P424132	HVSR24	1.2	2.8
040012P424133	HVSR10	0.5	8.5
040012P424134	HVSR12	1.2	1.8
040012P424135	HVSR13	2	1.5
040012P424136	HVSR20	3.7	1.3
040012P424162	HVSR11	1.2	4.25
040012P424163	HVSR14	1.3	2.5
040012P424164	HVSR17	2.1	3.8
040012P424165	HVSR21	0.95	2.5
040012P424166	HVSR23	0.55	6.3
040012P424167	HVSR27	1.25	3.5
040012P424168	HVSR25	1.4	3.4
040012P424169	HVSR26	0.55	5.5

TAB. 2 – RIEPILOGO DEI PICCHI DI AMPLIFICAZIONE MISURATI MEDIANTE PROVE HVSR

4.8. Prove sismiche di tipo MASW-ReMi

Sempre al fine di definire le caratteristiche sismiche del territorio indagato sono state eseguite 25 misure di sismica attiva di tipo MASW congiuntamente a misure passive di tipo REMI.

Di seguito si riportano le specifiche della strumentazione utilizzata, le metodologie d'indagine e si presentano i risultati ottenuti.

4.8.1. *Strumentazione utilizzata*

La prova sismica di tipo MASW e la prova REMI sono state acquisite mediante l'utilizzo di un sismografo digitale multicanale marca *Sara Electronic Instrument* modello *DoReMi*.

Il sismografo è stato attrezzato con 24 canali a 16 bit su cui sono stati disposti 24 geofoni verticali, marca *Geospace* a 4.5 Hz e ad alta sensibilità.

Come sorgente per la prova MASW è stata utilizzata una mazza dal peso di 5 Kg battente su piattello in PVC, l'impulso viene generato attraverso il colpo del martello sul piattello appoggiato al terreno e la registrazione viene azionata mediante un geofono trigger posizionato in prossimità del punto di battuta.

Nella sottostante Fig. 32 si riporta una fotografia della strumentazione utilizzata.



FIG. 32 – SISMOGRAFO UTILIZZATO

4.8.2. *Geometria dello stendimento e modalità di acquisizione*

La tecnica MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) e la tecnica ReMi (*Refraction Microtremor*) sono tecniche di prospezione sismica che, attraverso la registrazione della propagazione delle onde di superficie (Rayleigh), permette di risalire alla velocità di propagazione delle onde di taglio S nel sottosuolo, portando quindi a determinare anche il parametro Vs30 (velocità media delle onde S nei primi 30 metri).

In un mezzo stratificato le onde di superficie (Rayleigh) danno vita al fenomeno della dispersione, cioè lunghezze d'onda diverse si propagano con diverse velocità di fase e gruppo: le componenti ad alta frequenza (con piccola lunghezza d'onda) "sentono" solamente gli strati più superficiali del suolo, mentre le componenti a più bassa frequenza "sentono" anche gli strati più profondi consentendo quindi di determinarne le caratteristiche.

Il metodo si sviluppa attraverso la determinazione delle proprietà dispersive del mezzo individuabili dall'analisi dello spettro di velocità dei dati. Il range di frequenza si sviluppa comunemente tra 1 Hz e 50/60 Hz, fornendo informazioni sino a profondità di circa 30/40 m a seconda della rigidezza del suolo: la profondità massima di penetrazione è determinata dalla relazione fra velocità di propagazione dell'onda e più bassa frequenza identificabile.

Mentre la tecnica MASW è una metodologia attiva: ossia le onde vengono generate artificialmente, la tecnica ReMi è di tipo passivo: si misura il microtremore sismico che attraversa i terreni d'indagine.

Queste tipologie di prospezione si realizzano con uno stendimento sismico costituito da 12/24 o più geofoni allineati con distanza intergeofonica variabile tipicamente fra 1 e 5 m (la lunghezza dello stendimento incide sulla focalizzazione del segnale nello spettro di velocità) che registrano le onde sismiche generate in corrispondenza di un punto di energizzazione effettuata tipicamente ad una distanza compresa fra 2 e 20 m dal primo geofono.

L'acquisizione delle onde di Rayleigh può essere fatta mediante geofoni verticali (come nel nostro caso), oppure mediante geofoni orizzontali con asse posto parallelo (radiale) allo stendimento (in entrambi i casi si utilizza una sorgente verticale piastra-martello).

La geometria dello stendimento sismico per l'indagine MASW è la medesima utilizzata per la misura ReMi.

In base allo spazio a disposizione sono stati posti i geofoni a distanza compresa tra 1.5 e 3.5 m, ottenendo così stendimenti la cui lunghezza varia da 34.5 m a 80.5 m.

Le misure di tipo ReMi sono state acquisite registrando 5 tracce di 1 minuto cadauna e successivamente sommando le misure, ottenendo così una singola traccia da 5 minuti.

Per quanto riguarda le indagini di tipo MASW l'acquisizione è avvenuta energizzando mediante mazza battente su un piattello in PVC posto a 5 m di distanza dal primo geofono, successivamente si è provveduto a eseguire una seconda acquisizione ponendo la sorgente dal loto opposto dello stendimento sismico, ossia a 5 m dall'ultimo geofono.

In ogni punto di energizzazione sono state eseguite 3 battute consecutive al fine di migliorare la qualità del segnale mediante tecnica stacking (somma di differenti segnali sincroni).

In Fig. 33 si riporta una fotografia della strumentazione ubicata sul punto d'indagine.

L'analisi è stata eseguita sull'acquisizione che ha fornito il segnale migliore che è risultata quella corrispondente alla battuta di monte.

Ulteriori specifiche di acquisizione sono contenute nei report riportati nell'Elaborato 7.

Una volta eseguite le misure è stato calcolato lo spettro di velocità caratteristico del sito, nel capitolo successivo si illustra la tecnica di interpretazione delle indagini acquisite



FIG. 33 – FOTOGRAFIA DI UNO DEGLI STENDIMENTI SISMICI REALIZZATI

4.8.3. *Elaborazione congiunta MASW + ReMi + HVSR*

L'elaborazione delle prove MASW e ReMi è avvenuta in maniera CONGIUNTA, tenendo altresì in considerazione la curva HV ottenuta da misure HVSR.

Ognuna delle indagini realizzate ha i suoi pregi e i suoi difetti, interpretare tali indagini in modo "congiunto", ossia cercando un modello che tenga in considerazione i risultati di tutte e tre le indagini, consente di ottenere un modello "consistente" prendendo il meglio da ogni indagine.

Innanzi tutto, si è proceduto ad unire lo spettro ottenuto da indagine ReMi con quello ottenuto da prova MASW: dalle misure di tipo MASW si ottengono spettri ben definiti a frequenze medie e alte, caratteristiche dei terreni più superficiali, mentre le misure di tipo ReMi risultano meglio definite a basse frequenze, influenzate dai terreni presenti a profondità maggiori.

L'unione dei due spettri è avvenuta definendo una "frequenza di taglio" ossia la frequenza di passaggio tra uno spettro e l'altro, la frequenza è stata definita per ogni indagine realizzata sulla base dei risultati ottenuti.

Nelle figure sottostanti si mostrano, a titolo esemplificativo, alcune immagini che mostrano uno spetro di risulta dall'unione di uno spettro MASW e uno ReMi.

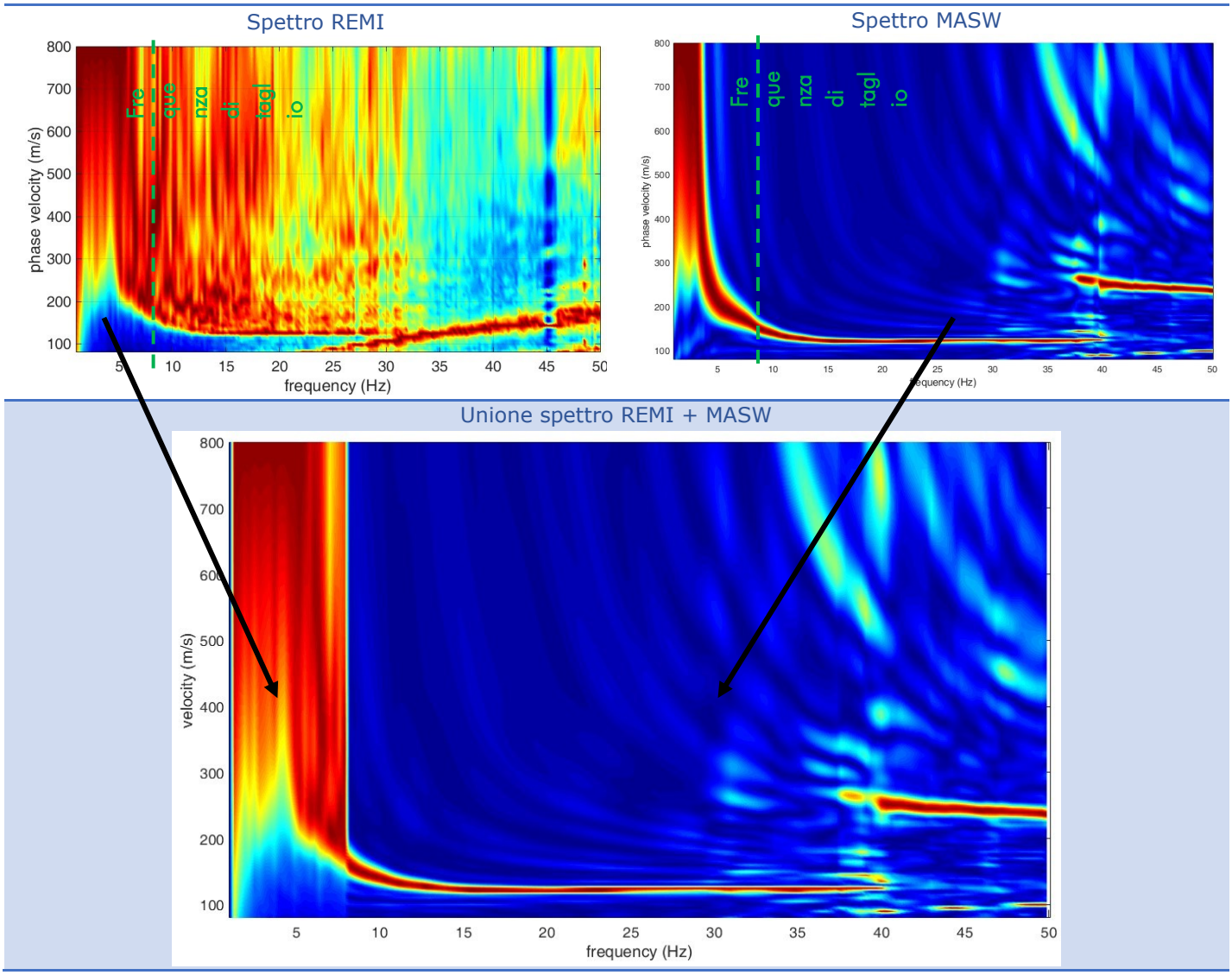
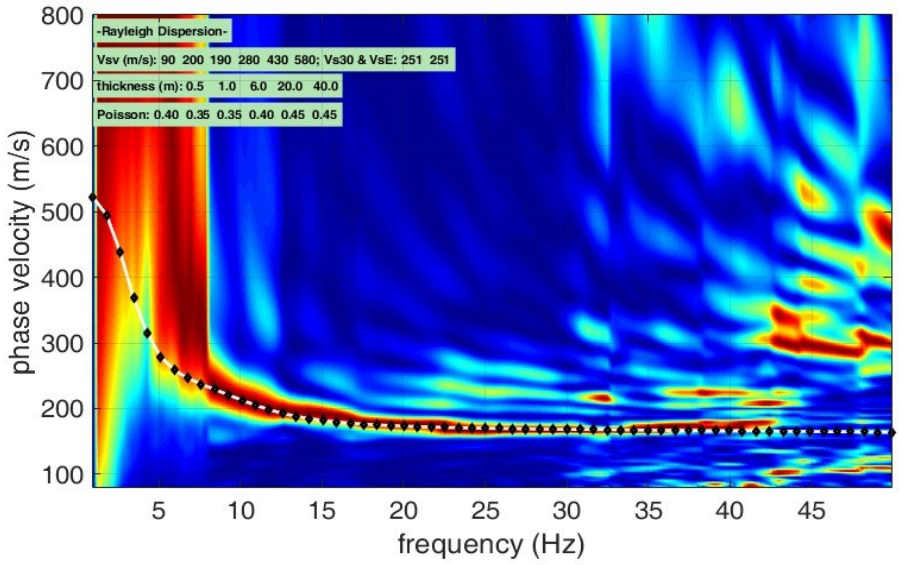


FIG. 34 – SPETTRO REMI, SPETTRO MASW E SPETTRO DI UNIONE

L'inversione è stata eseguita con procedura manuale: modellando la curva variando spessori e velocità dei sismostrati fino ad ottenere una buona corrispondenza tra la curva del modello e lo spettro derivante dall'unione di prova MASW + ReMi, il modello è stato inoltre tarato considerando le risultanze della misura sismica HVSR, in particolare per i passaggi sismostratigrafici profondi, altrimenti poco visibili.

Di seguito si riporta a titolo esemplificativo uno spettro di velocità e una curva HVSR con sovrapposta la curva del modello ottenuto.

Modello sintetico su spettro REMI + MASW



Modello sintetico su spettro HVSR

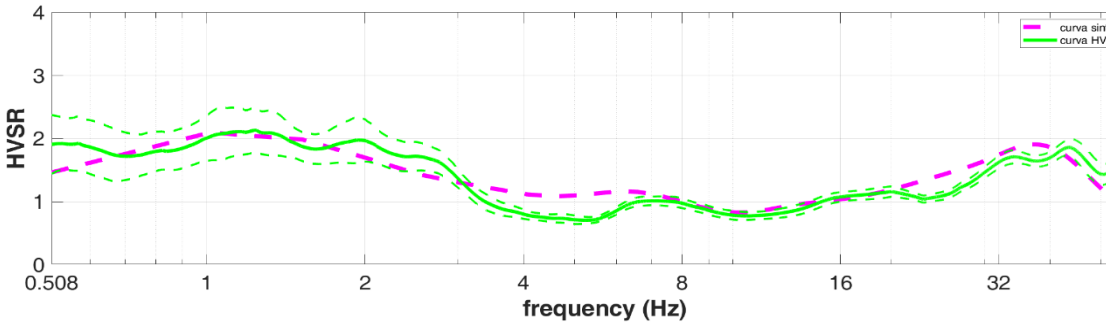


FIG. 35 – MODELLO SINTETICO SU SPETTRO MASW + REMI E SU CURVA HVSR

I risultati delle indagini eseguite sono riportati dell'Elaborato 7, di seguito si riportano i valori di V_{s30} ottenuti.

Nome	Codice MS	V_{s30} (m/s)
MASW+REMI1	040012L94	195
MASW+REMI2	040012L93	223
MASW+REMI3	040012L95	192
MASW+REMI4	040012L97	211
MASW+REMI5	040012L99	216
MASW+REMI6	040012L98	207
MASW+REMI7	040012L102	193
MASW+REMI8	040012L114	251
MASW+REMI9	040012L115	258
MASW+REMI10	040012L109	292
MASW+REMI11	040012L107	221
MASW+REMI12	040012L117	294
MASW+REMI13	040012L116	300

Nome	Codice MS	V_{s30} (m/s)
MASW+REMI14	040012L111	239
MASW+REMI15	040012L118	333
MASW+REMI16	040012L108	285
MASW+REMI17	040012L119	282
MASW+REMI18	040012L101	243
MASW+REMI19	040012L103	235
MASW+REMI20	040012L110	316
MASW+REMI21	040012L104	197
MASW+REMI22	040012L105	213
MASW+REMI23	040012L113	244
MASW+REMI24	040012L106	211
MASW+REMI25	040012L112	237

TAB. 3 – RIEPILOGO DEI VALORI DI V_{s30} OTTENUTI

5. ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE

L'analisi di terzo livello, per il Comune di Forlì, è stata realizzata su nove siti in cui si disponevano informazioni sufficientemente affidabili in termini di profilo sismostratigrafico.

Di seguito vengono fornite alcune informazioni di carattere generale sulle procedure di valutazione di risposta sismica locale, valide per tutti i siti indagati. Nei successivi paragrafi, saranno quindi illustrati i risultati della RSL per ciascun sito.

Nel complesso sono stati presi in esame 30 profili delle velocità delle onde di S in funzione della profondità ottenuti per i punti d'indagine sismica appositamente realizzati per il presente studio (cfr. Fig. 36), tramite prove penetrometriche con punta elettrica e cono sismico (SCPTU) e indagini sismiche di tipo MASW-ReMi. Inoltre, è stata eseguita una prova sismica in foro di tipo Down-Hole all'interno del foro di sondaggio a carotaggio continuo realizzato *ex-novo*.

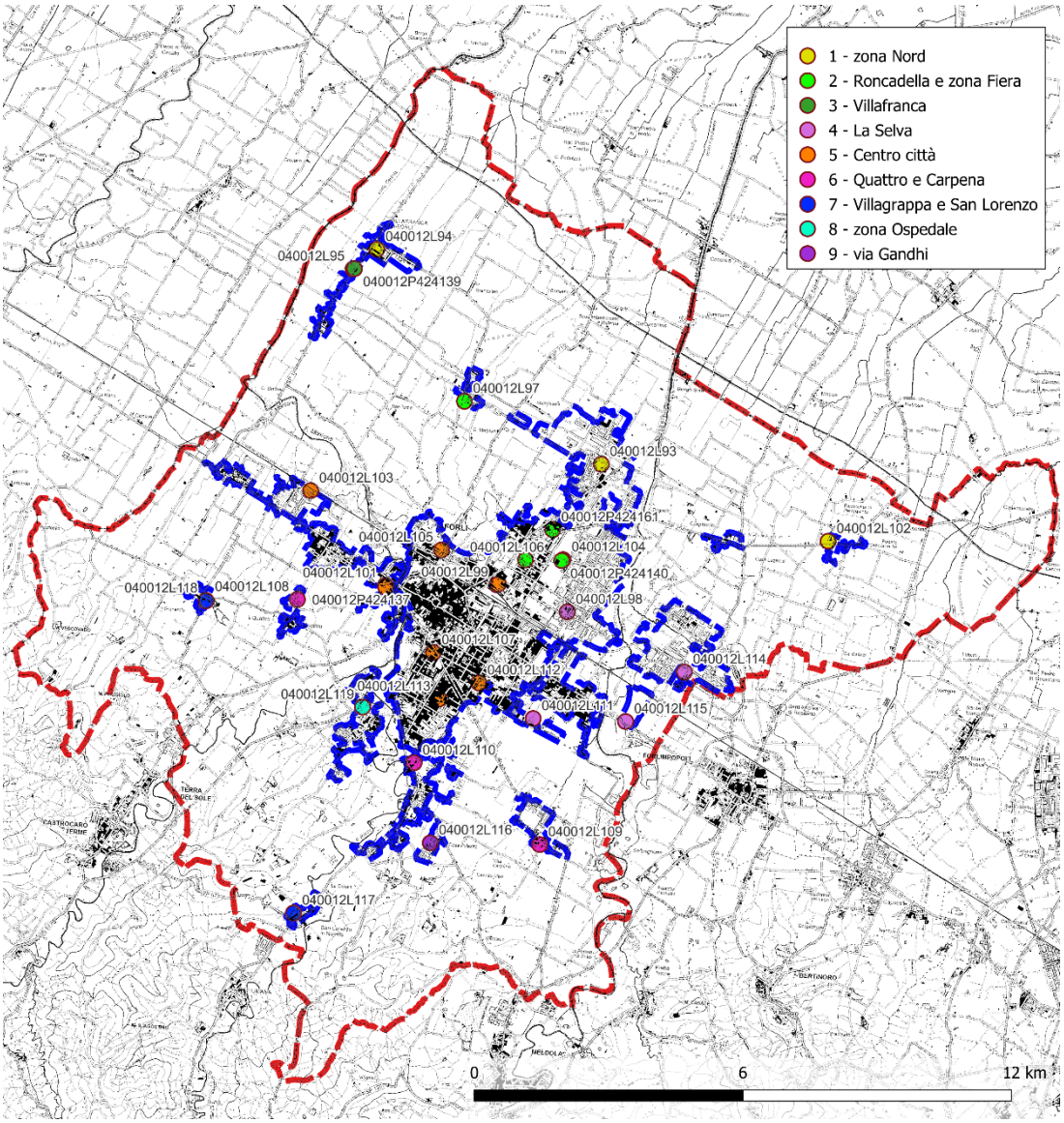


FIG. 36 – UBICAZIONE DELLE INDAGINI SISMICHE UTILIZZATE PER RICAVARE LE VERTICALI DI ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE IN COMUNE DI FORLÌ

Tutte le verticali delle misure dirette di Vs ottenute sono state opportunamente esaminate tenendo conto delle risultanze degli approfondimenti condotti nel precedente studio di microzonazione sismica di livello 2 (al quale si rimanda per i dettagli).

Per quanto riguarda il presente studio, l'analisi di risposta sismica locale è stata quindi effettuata su n° 9 verticali di indagine rappresentative di altrettante aree i cui modelli sismostratigrafici hanno consentito di affinare la zonazione effettuata nel precedente studio.

Nella seguente tabella si riporta un elenco dettagliato delle 30 indagini sismiche realizzate *ex-novo* e utilizzate per ricavare i n° 9 modelli sismostratigrafici sui quali è stata eseguita l'analisi di risposta sismica locale:

Codice MS3[8]	Nome	Tipo prova	X[9]	Y[9]	Verticale modello sismostratigrafico	MOPS
040012L93	MASW/REMI 2	MASW/REMI	267085	4900870	**1 – zona Nord**	**2004**
040012L94	MASW/REMI 1	MASW/REMI	262076	4908901		
040012L102	MASW/REMI 7	MASW/REMI	272224	4902327		
040012P424140	SCPTU 4	SCPTU	266272	4901896	**2 – Roncadella e zona Fiera**	**2004**
040012L106	MASW/REMI 24	MASW/REMI	265420	4901966		
040012L104	MASW/REMI 21	MASW/REMI	266267	4901840		
040012L97	MASW/REMI 4	MASW/REMI	264097	4905459		
040012P424161	S-DH1	DH	266069	4902584		
040012P424139	SCPTU 3	SCPTU	261640	4908423	**3 - Villafranca**	**2004**
040012L95	MASW/REMI 3	MASW/REMI	261607	4908417		
040012L98	MASW/REMI 6	MASW/REMI	266395	4900747	**4 – La Selva**	**2005**
040012L114	MASW/REMI 8	MASW/REMI	269013	4899406		
040012L115	MASW/REMI 9	MASW/REMI	267697	4899298		
040012L111	MASW/REMI 14	MASW/REMI	265631	4898364		
040012L103	MASW/REMI 19	MASW/REMI	260590	4903499	**5 – Centro città**	**2005**
040012L101	MASW/REMI 18	MASW/REMI	262331	4901335		
040012P424137	SCPTU 1	SCPTU	262333	4901306		
040012L107	MASW/REMI 11	MASW/REMI	263354	4899816		
040012L113	MASW/REMI 23	MASW/REMI	263469	4898836		
040012L112	MASW/REMI 25	MASW/REMI	264383	4899103		
040012L105	MASW/REMI 22	MASW/REMI	264762	4901393		
040012L99	MASW/REMI 5	MASW/REMI	264762	4901393		
040012P424138	SCPTU 2	SCPTU	264855	4901371		
040012L108	MASW/REMI 16	MASW/REMI	260317	4900973	**6 - Quattro e Carpena**	**2006**
040012L109	MASW/REMI 10	MASW/REMI	265746	4895496		
040012L110	MASW/REMI 20	MASW/REMI	262888	4896275		
040012L118	MASW/REMI 15	MASW/REMI	258294	4900931	**7 – Villagrappa e San Lorenzo**	**2007**
040012L117	MASW/REMI 12	MASW/REMI	260236	4893958		
040012L119	MASW/REMI 17	MASW/REMI	261821	4898619	**8 – zona Ospedale**	**2008**

[8] Codice da normativa regionale

[9] Coordinate espresse nel sistema WGS84 / UTM zona 33 N

Codice MS3[8]	Nome	Tipo prova	X[9]	Y[9]	Verticale modello sismostratigrafico	MOPS
040012L116	MASW/REMI 13	MASW/REMI	263336	4895585	**9 – via Gandhi**	**2009**

TAB. 4 – ELENCO DELLE PROVE SISMICHE UTILIZZATE PER L'ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE SULLE N° 9 VERTICALI INDIVIDUATE IN COMUNE DI FORLÌ

Si ribadisce che l'analisi di risposta sismica locale è stata sviluppata con riferimento allo stato limite SLV utilizzando un tempo di ritorno di 475 anni.

5.1. Pericolosità sismica di base

Nell'ambito della microzonazione sismica i parametri di riferimento (PGA su suolo di categoria A, spettri di risposta rappresentativi e segnali di riferimento) sono definiti dall'Allegato A4 della DGR 2193/2015 della Regione Emilia-Romagna.

In particolare, l'Allegato A4 contiene:

a. la forma dello spettro di risposta normalizzato rappresentativo del moto sismico atteso per un periodo di ritorno di 475 anni (con smorzamento pari al 5%) in Emilia-Romagna;
b. le indicazioni per il reperimento e l'utilizzo dei segnali di riferimento selezionati.
c. Le indicazioni per il calcolo dei valori di a_{refg} (10% di probabilità di superamento in 50 anni) di ogni sito indagato;

Per i punti di indagine il parametro a_{refg}, che varia in funzione del sito indagato, risulta compreso nel seguente intervallo (Tabella 5-1):

$a_{ref,g}$ (a_g/g)
$0.175 < a_{ref,g} < 0.225$

TABELLA 5-1 – VALORI DI A_{REFG} (10% DI PROBABILITÀ IN 50 ANNI)

5.2. Segnali in input

Quali segnali di input sismico sono stati utilizzati quelli forniti dalla piattaforma WebGIS sviluppata da EUCENTRE per la Regione Emilia-Romagna nell'ambito dell'accordo "Acquisizione del servizio di rilevamento a scala regionale del rischio sismico degli edifici residenziali ordinari e aggiornamento dei segnali di riferimento per la stima della risposta sismica locale negli studi di microzonazione sismica di terzo livello di approfondimento"[10].

I segnali sismici sono rappresentativi dello scuotimento atteso, per un periodo di ritorno di 475 anni (10% di probabilità di superamento in 50 anni), sul suolo di riferimento relativo alla categoria di sottosuolo A definita nella tabella 3.2.2 delle Norme Tecniche per le Costruzioni del 2018, ovvero con Vs30 superiore a 800 m/s.

[10] R.E.R. (eucentre.it)

Tutti i segnali sono stati selezionati attraverso una procedura che valuta la similarità tra le forme spettrali di riferimento e la forma degli spettri di risposta dei segnali contenuti nelle banche dati. Il confronto viene effettuato con lo spettro di risposta indicato dalla NTC 2018, con il 10% di probabilità di eccedenza in 50 anni.

Il servizio fornisce 7 accelerogrammi per ciascun nodo del reticolo di riferimento della pericolosità sismica locale dell'Allegato A delle NTC 2018. Per i n° 9 siti indagati che ricadono in Comune di Forlì, data la vasta estensione del territorio, sono stati utilizzati i sismi riferiti ai nodi più prossimi alle verticali, ovvero 17851, 18072, 18073 e 18294 (cfr. Tab. 5, Tab. 6, Tab. 7 e Tab. 8).

Gli accelerogrammi sono stati estratti per tempi di ritorno di 475 anni e sono stati scalati in accelerazione per ottenere un valore massimo di input compatibile con quello previsto dalle NTC per ogni verticale di indagine.

Se segnala che i sismi sono sempre gli stessi, ma cambia il fattore di scala.

M_W	Distanza epicentrale	Fattore di scala	File
6.90	62.90	0.78 %	ESM EU.HRZ..HNE.D.19790415.061941.C.ACC.ASC
5.74	12.57	1.70 %	NGA RSN146_COYOTELK_G01320.AT2
6.93	94.31	2.14 %	NGA RSN797_LOMAP_RIN090.AT2
6.69	38.07	1.32 %	NGA RSN1091_NORTHR_VAS000.AT2
6.60	31.00	0.80 %	KiKnet SMNH100010061330.EW2
6.60	62.00	1.42 %	KiKnet SAGH050503201053.EW2
6.10	97.00	1.63 %	KiKnet MYGH041103280724.EW2

TAB. 5 – SISMI ESTRATTI RIFERITI AL NODO 17851

M_W	Distanza epicentrale	Fattore di scala	File
6.90	62.90	0.79 %	ESM EU.HRZ..HNE.D.19790415.061941.C.ACC.ASC
5.74	12.57	1.72 %	NGA RSN146_COYOTELK_G01320.AT2
6.93	94.31	2.17 %	NGA RSN797_LOMAP_RIN090.AT2
6.69	38.07	1.34 %	NGA RSN1091_NORTHR_VAS000.AT2
6.60	31.00	0.81 %	KiKnet SMNH100010061330.EW2
6.60	62.00	1.44 %	KiKnet SAGH050503201053.EW2
6.10	97.00	1.65 %	KiKnet MYGH041103280724.EW2

TAB. 6 – SISMI ESTRATTI RIFERITI AL NODO 18073

M_W	Distanza epicentrale	Fattore di scala	File
6.90	62.90	0.81 %	ESM EU.HRZ..HNE.D.19790415.061941.C.ACC.ASC
5.74	12.57	1.76 %	NGA RSN146_COYOTELK_G01320.AT2
6.93	94.31	2.21 %	NGA RSN797_LOMAP_RIN090.AT2
6.69	38.07	1.37 %	NGA RSN1091_NORTHR_VAS000.AT2
6.60	31.00	0.83 %	KiKnet SMNH100010061330.EW2
6.60	62.00	1.47 %	KiKnet SAGH050503201053.EW2
6.10	97.00	1.69 %	KiKnet MYGH041103280724.EW2

TAB. 7 – SISMI ESTRATTI RIFERITI AL NODO 18072

M_W	Distanza epicentrale	Fattore di scala	File
6.90	62.90	0.81 %	ESM EU.HRZ..HNE.D.19790415.061941.C.ACC.ASC
5.74	12.57	1.77 %	NGA RSN146_COYOTELK_G01320.AT2
6.93	94.31	2.23 %	NGA RSN797_LOMAP_RIN090.AT2
6.69	38.07	1.38 %	NGA RSN1091_NORTHR_VAS000.AT2
6.60	31.00	0.84 %	KiKnet SMNH100010061330.EW2
6.60	62.00	1.48 %	KiKnet SAGH050503201053.EW2
6.10	97.00	1.70 %	KiKnet MYGH041103280724.EW2

TAB. 8 – SISMI ESTRATTI RIFERITI AL NODO 18294

5.3. Modello geofisico del sottosuolo

La valutazione della risposta sismica locale richiede un'accurata modellazione delle caratteristiche geofisiche del sottosuolo, principalmente basata sui seguenti parametri:

- litologia;
- velocità delle onde sismiche di taglio (V_S);
- curve di variazione dello smorzamento (D) e della rigidezza (G/G_0) in funzione della deformazione e densità in situ,

Tale modellazione va spinta in profondità fino a raggiungere il *bedrock* sismico, che teoricamente dovrebbe essere uno strato con velocità Vs>800 m/s.

A proposito della definizione del *bedrock* sismico, si rimanda al paragrafo 6.1 in cui la questione viene discussa approfonditamente.

5.3.1. Litologia

Per la determinazione delle caratteristiche litologiche sono stati utilizzati i dati delle stratigrafie delle prove CPTU e SCPTU e del sondaggio (cfr. par. 4.3, 4.4 e 4.1) eseguite nei diversi siti; laddove necessario le informazioni sono state integrate con la stratigrafia di prove geognostiche limitrofe le aree oggetto di studio provenienti da archivio comunale e/o già inserite nei precedenti studi di MS.

5.3.2. Determinazione della Vs e del bedrock sismico

Per quanto riguarda la velocità delle onde S in funzione della profondità per le diverse aree d'indagine, si è fatto riferimento alle misure della prova Down-Hole spinta fino alla profondità di 30 m e delle prove MASW-ReMi e SCPTU effettuate durante la campagna indagini 2024 e riportate in Tab. 4.

La V_S è stata discretizzata per strati omogenei, in funzione principalmente della litologia, per consentire la realizzazione di un modello non troppo complesso.

Si è constatato, infatti, che l'introduzione di un eccessivo numero di strati nel software di calcolo, che sarebbero stati opportuni per seguire più fedelmente l'andamento della V_S con la profondità, introduce una complessità che non migliora i risultati.

Mediante il processo sopra descritto si giunge ad una prima discretizzazione della V_S in funzione della profondità. Ovviamente per i primi 25-30 m sono stati ritenuti più significativi i risultati delle prove SCPTU e Down-Hole, mentre per le profondità maggiori si è fatto riferimento principalmente alle prove MASW-ReMi e HVSR.

A tale proposito, l'interpretazione delle prove geofisiche ha tenuto conto anche dell'interpretazione geologica del sito, soprattutto in relazione alla definizione del *bedrock*.

Nella gran parte delle prove effettuate infatti è stato individuato un picco (3-20 Hz) interpretabile come un contrasto di impedenza con profondità dell'ordine dei 80÷150 m da p.c.

Tale profondità corrisponde al limite tra la base del Sintema Emiliano Romagnolo Superiore (AES) e la base del Subsintema di Bazzano (AES6), come individuato negli studi regionali e visibile nella sezione di Fig. 37 (cfr. par. 6.1). La sezione, allineata con l'andamento del fiume Montone, mostra inoltre un approfondimento delle ghiaie in prossimità della via Emilia.

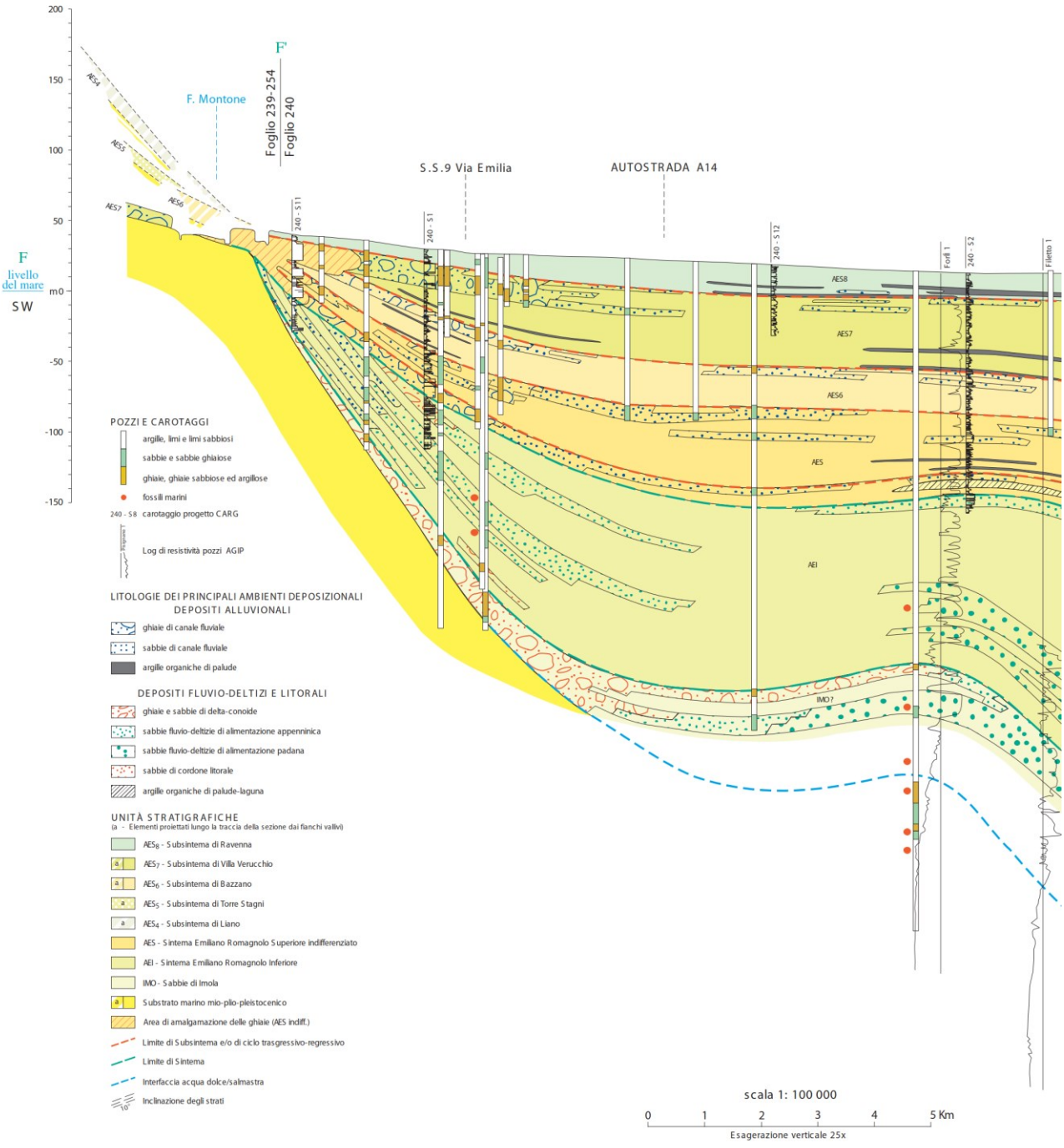


FIG. 37 – SEZIONE GEOLOGICA N. 58 DA RER

5.3.3. Curva di variazione dello smorzamento (D) e della rigidezza (G/G_0) in funzione della deformazione

Per la valutazione delle curve di variazione del rapporto di smorzamento (D) e del decadimento del modulo di taglio normalizzato (rigidezza G/G_0) in funzione della deformazione di taglio, sono stati utilizzati i dati relativi a

prove in colonna risonante effettuate sul campione S1DH – 7.50-8.20 prelevato durante l'esecuzione del sondaggio 040012P424161, nei pressi di Via Repubblica Cispadana.

Tali prove hanno fornito dati sperimentali che hanno consentito di definire le leggi di variazione dei parametri D e G/G_0 mediante il modello iperbolico di Yokota (1981).

Le leggi di variazione di Yokota sono le seguenti:

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \alpha\gamma^{\beta}}$$

$$D = \eta e^{(-\lambda\frac{G}{G_0})}$$

dove:

G/G0 = modulo di taglio normalizzato

D = rapporto di smorzamento

γ = deformazione di taglio

α, β, η, λ = parametri sperimentali del modello

Il fit dei dati sperimentali alle funzioni sopra descritte è stato effettuato con il metodo dei minimi quadrati (X^2).

In Tab. 9 sono riportati schematicamente i valori delle proprietà indice dei terreni analizzati per il presente studio.

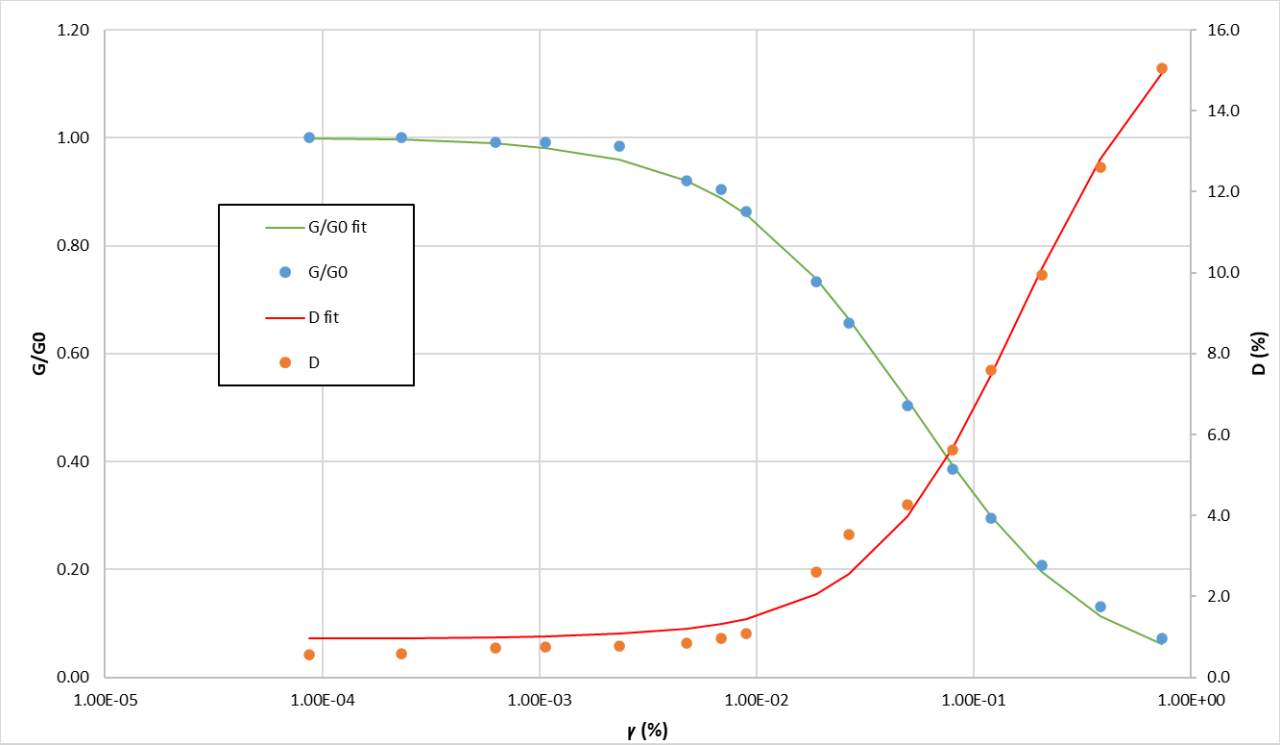


FIG. 38- FITTING DEI DATI SPERIMENTALI PER I DATI SPERIMENTALI DELLA PROVA IN COLONNA RISONANTE

Campione	Litologia	G_0 (MPa)	α	β	η	λ
S1DH7.50-8.20	Limo argilloso grigio con screziature marrone chiaro	100	20.67	1.02	17.92	2.93

TAB. 9 – RIEPILOGO DELLE PROPRIETÀ INDICE DEI TERRENI ANALIZZATI

Inoltre, laddove non erano a disposizione colonne risonanti di campioni prelevati in sito, sono state utilizzate curve da letteratura per terreni consimili, i cui parametri sono riportati in Tab. 10. In particolare, per i depositi argillosi e limosi Vucetic & Dobry (1991)[11] e per i depositi sabbiosi Sand Seed & idriss (1970)[12].

Tipo di curva	Litologia	α	β	η	λ
Vucetic & Dobry PI=30	Argilla e limo	5.12	0.81	30.24	3.06
Vucetic & Dobry PI=15	Argilla e limo	9.52	0.82	25.96	2.32
Sand Seed & Idriss	Sabbia	14.12	0.93	27.29	2.99

TAB. 10 – RIEPILOGO DEI PARAMETRI CARATTERISTICI DELLE CURVE DA LETTERATURA

Nelle seguenti figure sono riportate le curve di interpolazione per i parametri G/G_0 (cfr. Fig. 39) e D (cfr. Fig. 40) provenienti da letteratura.

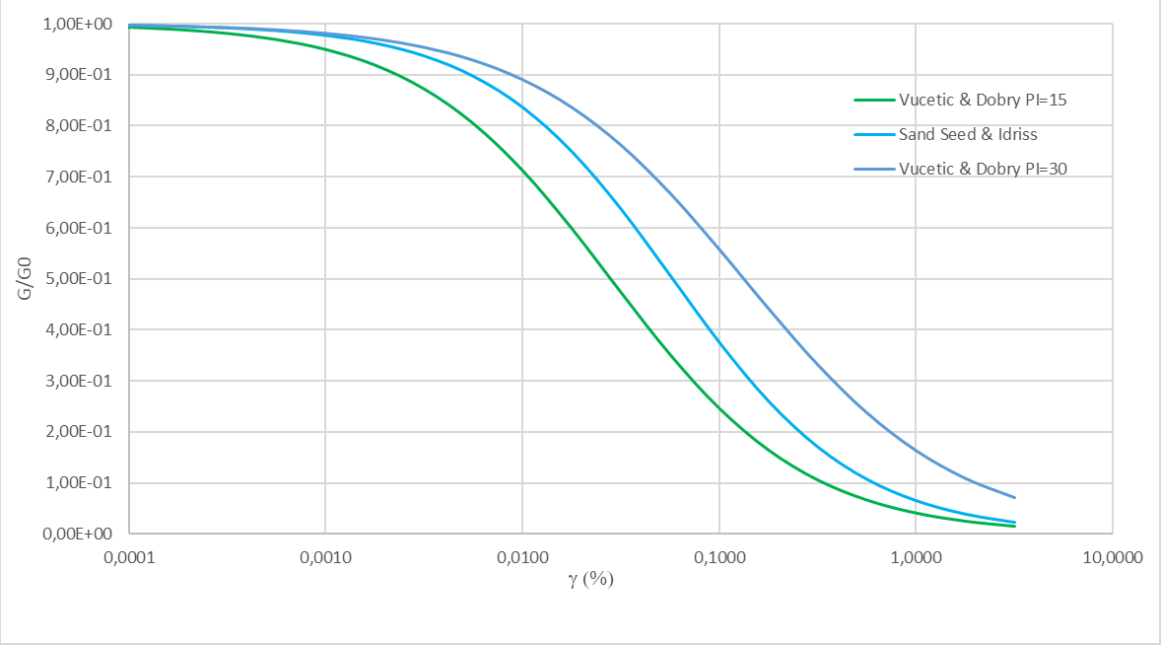


FIG. 39 – GRAFICO DELLE CURVE DI INTERPOLAZIONE G/G_0 IN FUNZIONE DELLA DEFORMAZIONE

[11] M. Vucetic; R. Dobry – 1991 – Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response - Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 117, Issue 1.

[12] H. B. Seed; I. M. Idriss – 1970 – Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses – University of California Berkeley Structural Engineers and Mechanics.

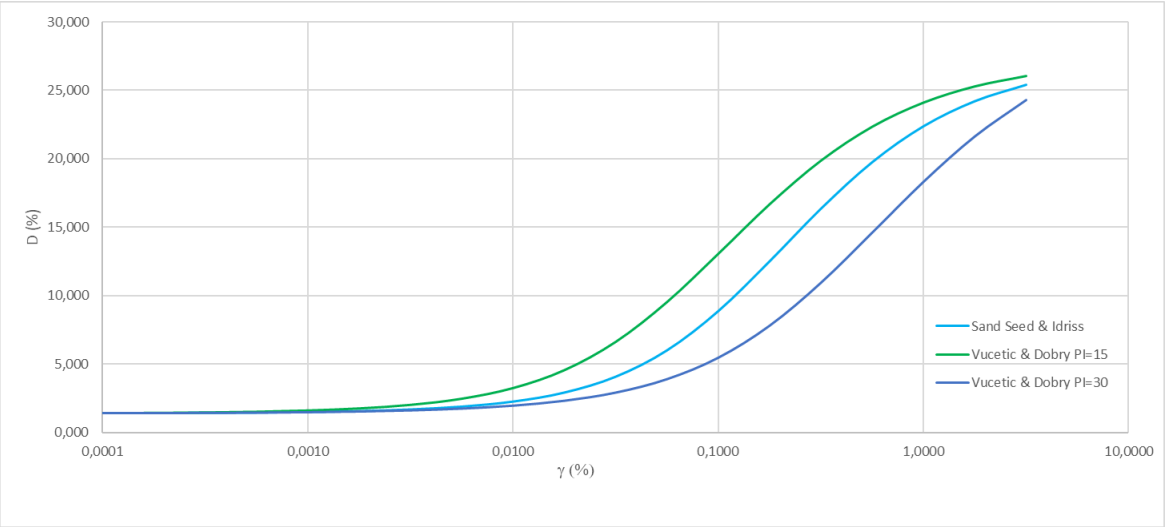


FIG. 40 - GRAFICO DELLE CURVE DI INTERPOLAZIONE D IN FUNZIONE DELLA DEFORMAZIONE

5.4. Procedura di analisi RSL

Per la valutazione della risposta sismica locale è stato utilizzato il codice di calcolo LSR 2D (Local Sismic Response 2D) Ver. 5.2.0 di STACEC.

Il codice di calcolo LSR2D consente di effettuare una modellazione bidimensionale del problema mediante il metodo degli elementi finiti, nel dominio del tempo, in tensioni totali, utilizzando il metodo lineare equivalente e tenendo conto della deformabilità del substrato.

Qualora la stratigrafia in esame non presenti problematiche di carattere bidimensionale, come nel caso in esame, è comunque possibile studiare il problema monodimensionale grazie ad una discretizzazione di una striscia unitaria di terreno e all'applicazione di un sistema di vincoli sul modello FEM tale da consentire solo deformazioni di taglio.

5.4.1. Metodo lineare equivalente

Il comportamento meccanico dei terreni sotto l'effetto di carichi ciclici ad elevata frequenza è alquanto complesso e caratterizzato da marcata non linearità, accumulo di deformazioni permanenti, dissipazione di energia e degradazione progressiva delle caratteristiche meccaniche per effetto del numero di cicli di carico applicati. In presenza di fluido interstiziale, alle suddette problematiche si aggiunge l'accumulo di sovrappressioni interstiziali in condizioni di drenaggio impedito o parziale, che sono comunque le più frequenti, in considerazione della velocità di applicazione del carico.

La modellazione di tali fenomeni richiede l'utilizzo di legami costitutivi complessi, che oltretutto difficilmente riescono a riprodurre simultaneamente tutte le specificità del comportamento dei terreni. Per tale ragione spesso si preferisce fare riferimento a modelli costitutivi semplificati che, pur non essendo rigorosi, riescono a riprodurre il comportamento in modo adeguato in riferimento alla specifica applicazione.

In particolare, per quanto riguarda la risposta sismica dei depositi, l'approccio visco-elastico lineare equivalente rappresenta un valido compromesso tra semplificazione delle analisi ed accuratezza dei risultati. La strategia consiste sostanzialmente nel fare riferimento 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.

Tale modello lineare equivalente, studia il comportamento tra tensione e deformazione del terreno basandosi sul modello di Kelvin-Voigt, illustrato in Fig. 41. La tensione τ dipende dalla deformazione γ e dalla sua derivata γ', secondo la relazione:

$$\tau = G\gamma + \eta\dot{\gamma}$$

dove:

- G = Modulo di taglio;
- η = viscosità del mezzo;

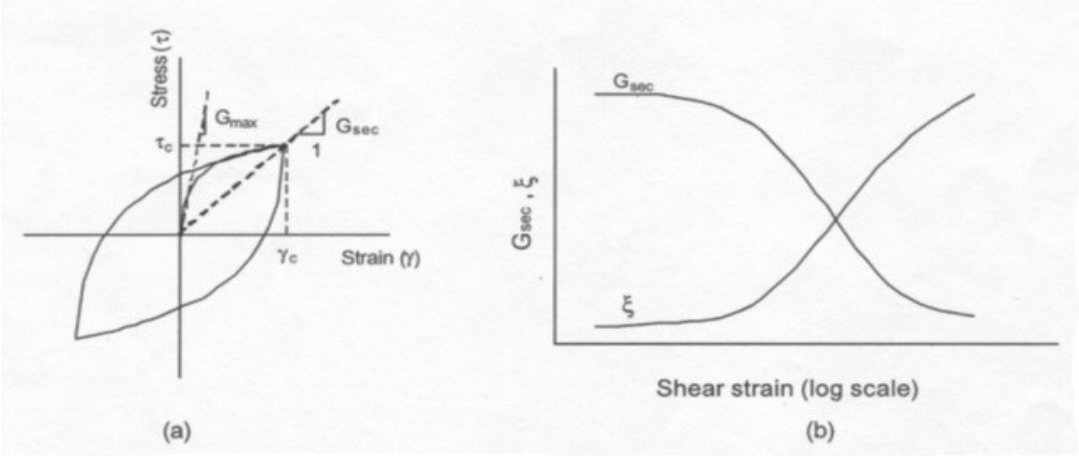


FIG. 41 – MODELLO LINEARE EQUIVALENTE A) CURVE TENSIONE – DEFORMAZIONI; B) VARIAZIONE DEL MODULO

Il comportamento non lineare del terreno, durante un ciclo di carico, viene approssimato per come mostrato in Fig. 41. Il modulo di taglio equivalente, G, è preso considerando il modulo di taglio secante Gs.

È possibile notare come alla fine di un ciclo controllato e simmetrico di tensioni si ha:

$$Gs = \frac{\tau_c}{\gamma_c}$$

La curva $Gs - \gamma$ non può avere una forma arbitraria ma deriva dalla curva $\tau - \gamma$ e sussiste la seguente relazione:

$$\frac{dt}{d\gamma} = G_s(\gamma) + \frac{dG_s}{d\gamma}\gamma \geq 0$$

La descrizione del comportamento meccanico dei terreni nei confronti dei carichi ciclici non può peraltro prescindere dalla dissipazione intrinseca di energia che si verifica durante i cicli di carico-scarico. Il parametro di riferimento a tal riguardo è costituito dal coefficiente di smorzamento D, definito come:

$$D = \frac{1}{4\pi}\frac{\Delta W^{dissp}}{W^{max}}$$

dove:

- ΔW^{dissp} = quantità di energia dissipata, per unità di volume, dal terreno durante un ciclo di carico armonico;
- W^{max} = massima energia di deformazione, per unità di volume, immagazzinata dal terreno durante lo stesso ciclo di carico armonico;

In definitiva la risposta non lineare del terreno tramite il modello viscoelastico lineare equivalente viene riassunta mediante delle curve di riduzione del modulo di taglio e di incremento del rapporto di smorzamento (Fig. 41 b).

5.4.2. Soluzione alla singola iterazione mediante FEM

L'approccio utilizzato per la soluzione visco-elastica lineare all'interno dell'i-esimo ciclo iterativo utilizza il metodo degli elementi finiti. In particolare, il deposito di terreno viene discretizzato mediante una "mesh" di elementi finiti piani che possono avere forma quadrangolare o rettangolare a seconda dei casi (cfr. Fig. 41) e caricato mediante un'accelerazione alla base dello stesso (bedrock), la soluzione dell'equazione del moto viene poi ottenuta nel dominio del tempo utilizzando il metodo di integrazione di Newmark.

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -Ma_g$$

dove:

M = matrice di massa del sistema;

C = matrice di smorzamento del sistema;

K = matrice di rigidezza del sistema;

$\ddot{u}, \dot{u}, u$ = rispettivamente vettori di accelerazione, velocità e spostamento del sistema;

a_g = vettore di accelerazione alla base;

Tale equazione vale per ogni istante di tempo tn e descrive l'equilibrio dinamico del sistema. La soluzione in termini di spostamento velocità ed accelerazione per ogni tn viene ottenuta a partire dalle seguenti relazioni:

$$\dot{u}_n = \dot{u}_{n-1} + \Delta t\,[(1-\gamma)\,\ddot{u}_{n-1} + \gamma\ddot{u}_n]$$

$$u_n = u_{n-1} + \Delta t\,\dot{u}_{n-1} + \frac{\Delta t^2}{2}\,[(1-\beta)\,\ddot{u}_{n-1} + 2\beta\ddot{u}_n]$$

dove:

Δt = incremento temporale tra l'istante di tempo tn e $tn-1$

β = parametro del metodo di integrazione posto pari a 0.25

γ = parametro del metodo di integrazione posto pari a 0.50

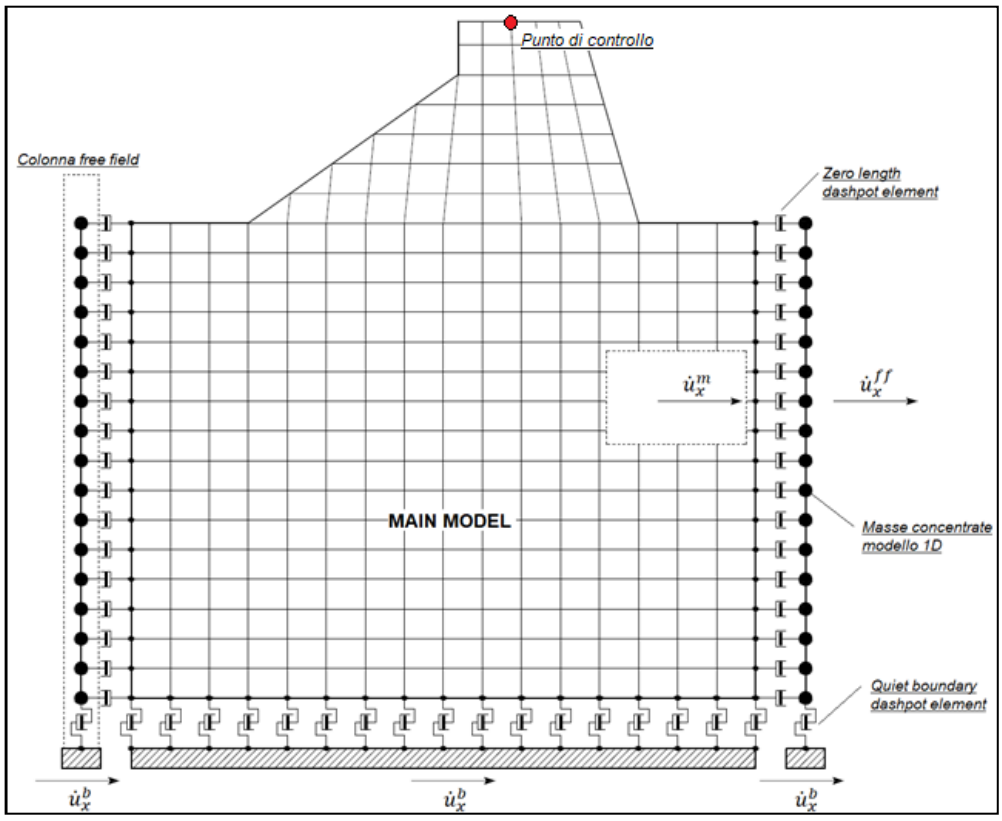


FIG. 42 – DISCRETIZZAZIONE FEM DEL TERRENO

5.4.3. Smorzamento

La matrice di smorzamento del sistema viene ottenuta mediante l'assemblaggio delle matrici di smorzamento dei singoli elementi, queste ultime ottenute a loro volta come:

$$C_q = \alpha_q M_q + \beta_q K_q$$

dove:

- α_q e β_q = coefficienti di smorzamento alla Reyleigh;

Tali coefficienti vengono ottenuti a partire dal rapporto di smorzamento viscoso del singolo elemento e dalla relazione seguente:

$$\dot{u}_n = \dot{u}_{n-1} + \Delta t\,[(1-\gamma)\,\ddot{u}_{n-1} + \gamma\ddot{u}_n]$$

$$u_n = u_{n-1} + \Delta t\,\dot{u}_{n-1} + \frac{\Delta t^2}{2}\,[(1-\beta)\,\ddot{u}_{n-1} + 2\beta\ddot{u}_n]$$

da cui si ottiene (Hudson, 1994):

$$D_q = \frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_q}{\omega} + \beta_q\omega\right)$$

dove:

- $\omega 1$ = frequenza naturale del primo modo del deposito;
- $\omega 2 = n * \omega 1$ con $n = \omega i/\omega 1$ (approssimato all'intero pari più grande) e ωi frequenza di picco dello spettro ottenuto a partire dall'accelerazione di bedrock.

5.4.4. Procedimento iterativo

La procedura iterativa che consente di ottenere la risposta non lineare del sistema consiste nell'eseguire una sequenza di analisi lineari, con aggiornamento iterativo dei parametri di rigidezza e smorzamento, fino al raggiungimento di un prefissato criterio di convergenza. Lo schema della procedura iterativa su cui è basato il modello lineare equivalente, da applicare ad ogni strato in cui è stato discretizzato il profilo stratigrafico, è il seguente:

1. definizione di curve $G = G(\gamma)$ e $D = D(\gamma)$ per i diversi strati;
2. inizializzazione dei valori del modulo di taglio e del fattore di smorzamento ai livelli di piccole deformazioni ($G0$ e $D0$);
3. calcolo della risposta dinamica del suolo e valutazione della deformazione massima a taglio in ogni strato ($\gamma 1$);
4. aggiornamento dei valori $G1 = G(\gamma 1)$ e $D1 = D(\gamma 1)$;
5. iterazione dei passi 3 e 4 fino a convergenza $(\gamma i - 1 \sim \gamma i)$.

5.4.5. Interpretazione dei risultati

Il risultato della procedura iterativa sopradescritta non è altro che la storia temporale di accelerazione, velocità e spostamento di ogni grado di libertà del modello FEM.

Tuttavia, dal punto di vista ingegneristico è interessante monitorare la risposta in termini di accelerazione 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.

5.5. Analisi dei risultati

I risultati delle analisi condotte con il codice di calcolo LSR 2D (Local Sismic Response 2D) Ver. 5.2.0 di STACEC, elaborati nel dominio del tempo e delle frequenze, hanno consentito di definire per i siti in esame:

- La funzione di trasferimento del segnale sismico dal *bedrock* alla superficie;
- Lo spettro di risposta elastico in pseudoaccelerazione con smorzamento ζ=5% (PSA – di cui in Fig. 43 si riporta un esempio) e lo spettro di risposta elastico in pseudovelocità (PSV di cui in Fig. 44 si riporta un esempio); gli spettri rappresentati sono ottenuti come mediana dei valori degli spettri di tutti i segnali sismici in output.
- La curva di variazione dell'accelerazione con la profondità (di cui in Fig. 45 si riporta un esempio);
- Il fattore di amplificazione in termini di picco di accelerazione (FA_{PGA}), definito come il rapporto tra l'accelerazione massima in superficie ed il valore di riferimento per il sito su suolo rigido;
- Il fattore di amplificazione di sito in termini di rapporto tra intensità dello spettro di risposta in pseudovelocità (FH_{IS}) calcolato in superficie e quello calcolato su suolo rigido. In sostanza viene calcolato il rapporto degli indici di Housner negli intervalli 0.1-0.5 s, 0.5-1.0 s e 0.5-1.5 s, per i due spettri indicati (superficie e suolo rigido). I rapporti risultano pertanto:
  - $FH_{IS\ 0.1-0.5} = \dfrac{\int_{0.1}^{0.5} PSV_{superficie}(T)dt}{\int_{0.1}^{0.5} PSV_{suolo\ rigido}(T)dt}$
  - $FH_{IS\ 0.5-1.0} = \dfrac{\int_{0.5}^{1.0} PSV_{superficie}(T)dt}{\int_{0.5}^{1.0} PSV_{suolo\ rigido}(T)dt}$

- $FH_{IS\ 0.5-1.5} = \frac{\int_{0.5}^{1.5} PSV_{superficie}(T)dt}{\int_{0.5}^{1.5} PSV_{suolo\ rigido}(T)dt}$

- Il fattore di amplificazione di sito in termini di rapporto tra intensità dello spettro di risposta in pseudoaccelerazione (FA_{SA}) calcolato in superficie e quello calcolato su suolo rigido in diversi intervalli. I rapporti risultano pertanto:

  - $FA_{SA\ 0.1-0.5} = \frac{\int_{0.1}^{0.5} PSA_{superficie}(T)dt}{\int_{0.1}^{0.5} PSA_{suolo\ rigido}(T)dt}$
  - $FA_{SA\ 0.4-0.8} = \frac{\int_{0.4}^{0.8} PSA_{superficie}(T)dt}{\int_{0.4}^{0.8} PSA_{suolo\ rigido}(T)dt}$
  - $FA_{SA\ 0.7-1.1} = \frac{\int_{0.7}^{1.1} PSA_{superficie}(T)dt}{\int_{0.7}^{1.1} PSA_{suolo\ rigido}(T)dt}$
  - $FA_{SA\ 0.5-1.5} = \frac{\int_{0.5}^{1.5} PSA_{superficie}(T)dt}{\int_{0.5}^{1.5} PSA_{suolo\ rigido}(T)dt}$

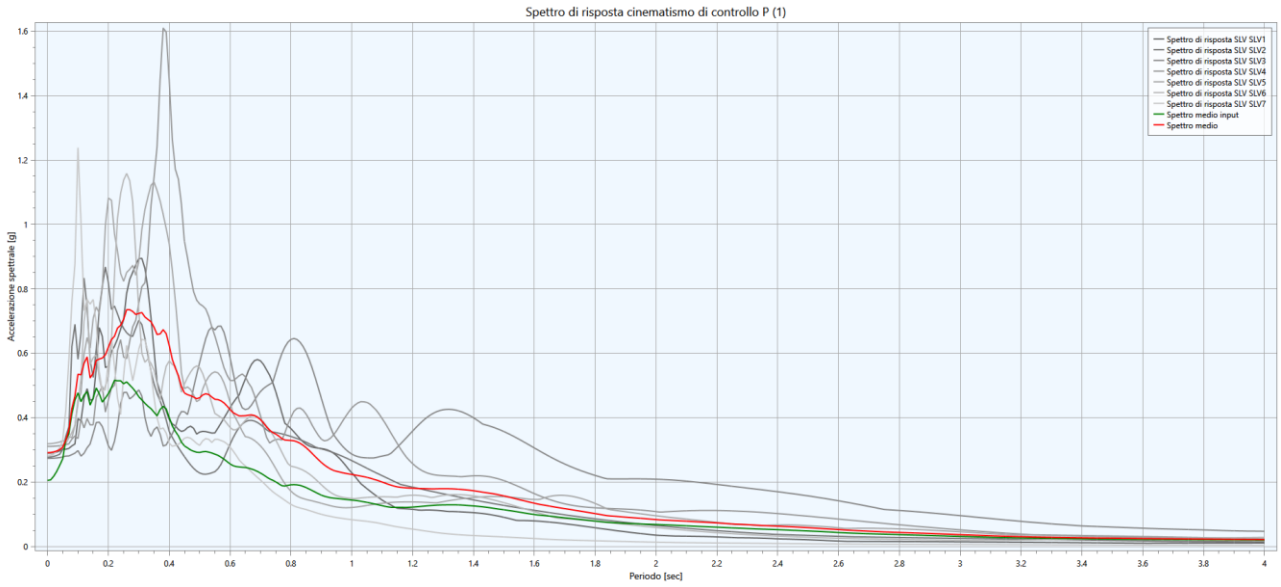


FIG. 43 – ESEMPIO DI SPETTRO ELASTICO IN ACCELERAZIONE (IN GRIGIO GLI SPETTRI DEI SINGOLI ACCELEROGRAMMI, IN VERDE LO SPETTRO MEDIO DI INPUT, IN ROSSO LO SPETTRO MEDIO DI OUTPUT)

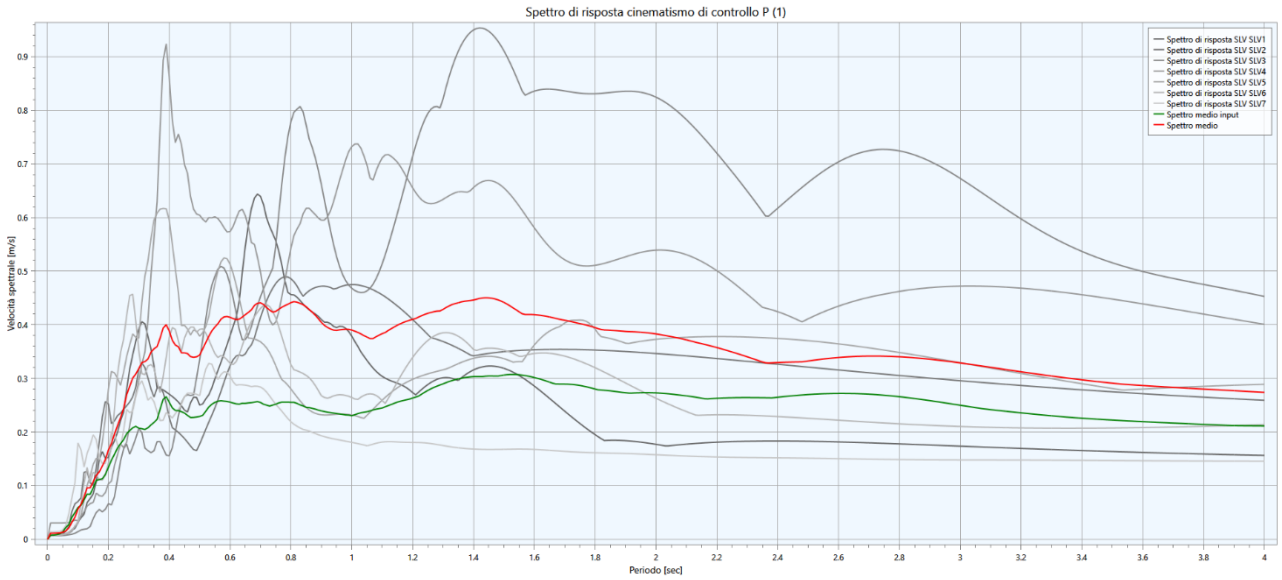


FIG. 44 - SPETTRO ELASTICO IN VELOCITÀ (IN GRIGIO GLI SPETTRI DEI SINGOLI ACCELEROGRAMMI, IN VERDE LO SPETTRO MEDIO DI INPUT, IN ROSSO LO SPETTRO MEDIO DI OUTPUT)

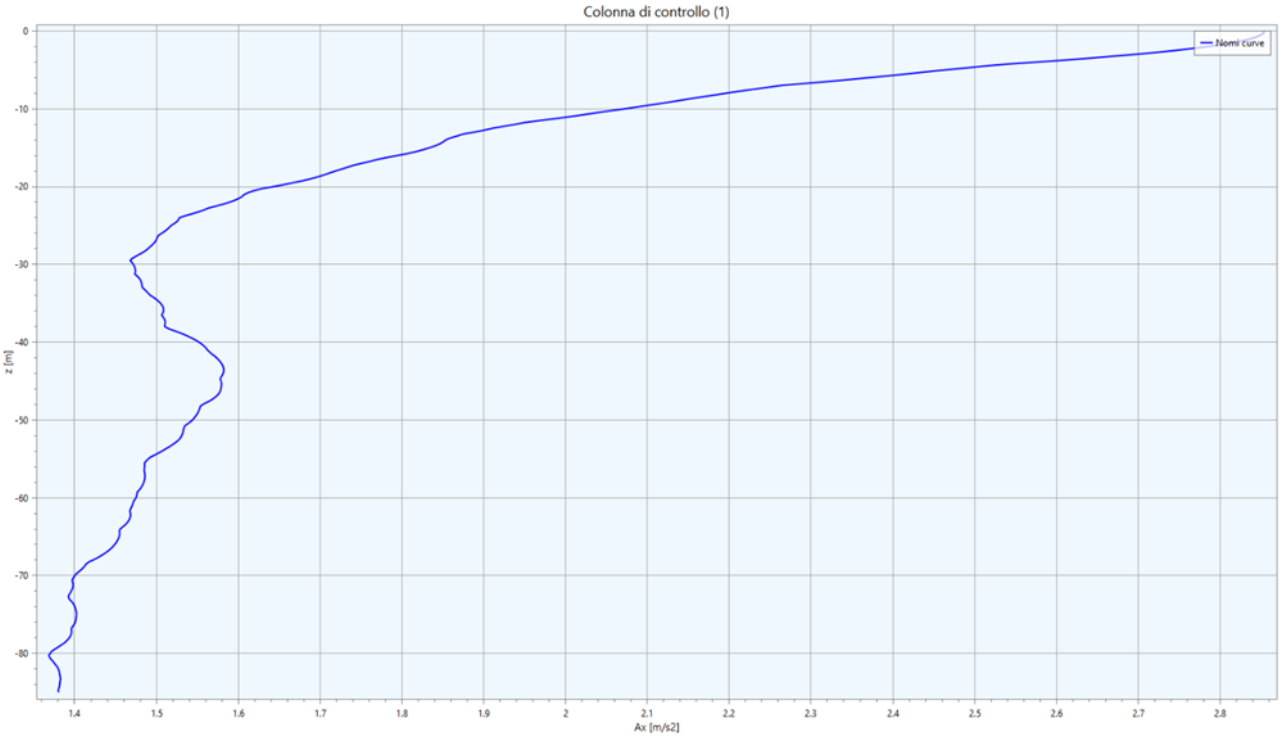


FIG. 45 - VARIAZIONE DELL'ACCELERAZIONE CON LA PROFONDITÀ

I fattori di amplificazione in accelerazione e velocità sono ottenuti direttamente dal programma di calcolo confrontando lo spettro medio degli accelerogrammi in input con quello ottenuto dagli accelerogrammi in output. In Fig. 46 è riportato il grafico relativo, generato da LSR2D.

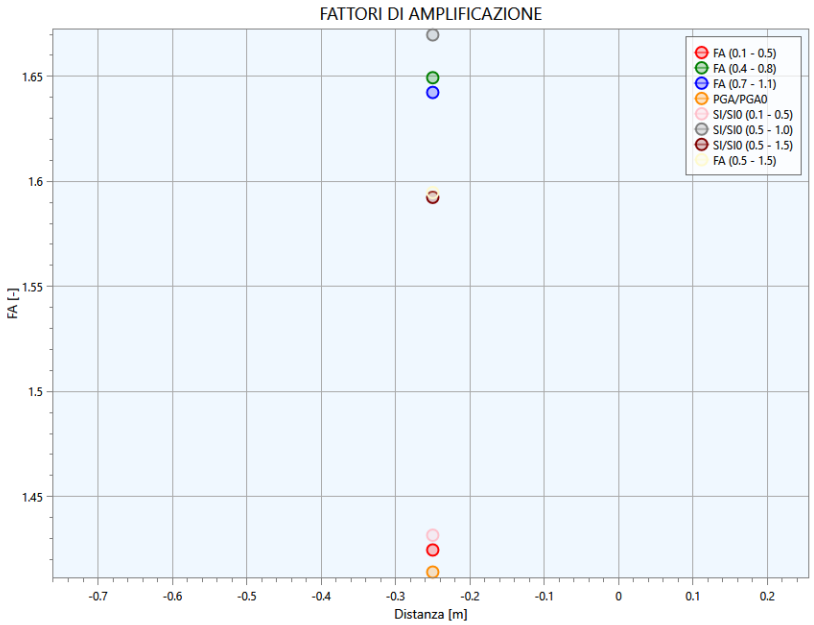


FIG. 46 – GRAFICO DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE

5.5.1. Spettro di risposta elastico normalizzato

Le verifiche progettuali delle strutture richiedono anche i parametri espressi secondo i parametri di normativa (a_g, F_0, T_B, T_C, T_C^*, T_D, C_C, S, η); per questo motivo è necessario dapprima normalizzare lo spettro elastico ricavato dalla risposta sismica locale. Considerato che la procedura di normalizzazione dello spettro non è prevista dalle NTC 2018 si sono seguite le indicazioni fornite dalle Ordinanze P.C.M N° 24 del 12/5/2017 e n° 55 del 24/4/2018, modificate per la sola determinazione di T_D[13] con il metodo di *Newmak-Hall*[14].

La normalizzazione dello spettro è avvenuta attraverso la seguente metodologia:

a) Dallo spettro in pseudoaccelerazione calcolato con la RSL (SA) si determina il periodo proprio (TA) per il quale è massimo il valore dello stesso;
b) Si calcola il valore medio dello spettro (Sa_m) nell'intorno di TA tra 0.5 TA e 1.5 TA. Questo valore viene assunto come valore costante del tratto ad accelerazione costante dello spettro standard:

$$SA_m = \int_{0.5TA}^{1.5TA} SA(T)dT$$

c) Si determina lo spettro di pseudovelocità (SV) a partire da quello di accelerazione, moltiplicando le ordinate spettrali di quest'ultimo per l'inverso della corrispondente frequenza circolare $\omega = 2\pi/T$:

$$SV(T) = SA(T) * \frac{T}{2\pi}$$

e quindi si individua il periodo (TV) per il quale è massimo il valore dello spettro di pseudovelocità;
d) Si calcola il valore medio dello spettro (SV_m) nell'intorno di TV tra 0.8 TV e 1.2 TV:

[13] La modifica del valore di T_D si è resa necessaria poiché la formula indicata dalle ordinanze porta ad una evidente sovrastima dello spettro nel tratto tra T_C e T_D.

[14] Newmark NM, Hall WJ, Earthquake Spectra and Design, EERI Monograph Series, 1982.

$$SV_m = \frac{1}{0.4 * TV} \int_{0.8TV}^{1.2TV} SV(T)dT$$

e) Si determina il periodo in corrispondenza del quale si incontrano i due rami dello spettro ad accelerazione costante e velocità costante:

$$T_C = 2\pi * \frac{SV_m}{SA_m}$$

f) Si determina lo spettro di pseudospostamento (SV) a partire da quello di velocità e quindi si individua il periodo (TD) per il quale è massimo il valore dello spettro di pseudospostamento;

g) Si calcola il valore medio dello spettro (SDm) nell'intorno di TD tra 0.8 TD e 1.2 TD:

$$SD_m = \frac{1}{0.4 * TD} \int_{0.8TD}^{1.2TD} SD(T)dT$$

h) Si calcola il valore di T_D con la formula:

$$T_D = 2\pi * \frac{SD_m}{SV_m}$$

i) Si determina $T_B = 1/3 * T_C$

j) Si determina il valore di F_0 come rapporto SA_m/a_{max}, dove a_{max} è ricavato dalla seguente equazione:

$$a_{max} = \left(\frac{S_e(T = 0.01\ s)}{SA_m} - \frac{0.01}{T_B}\right) * \left(\frac{SA_m}{1 - \frac{0.01}{T_B}}\right)$$

k) Si applicano le seguenti equazioni riportate in NTC 2018 (Cap. 3.2.3.2.1) per la determinazione dei tratti dello spettro tra $T_A=0$, T_B, T_C, T_D, fino a un T di interesse.

l)

d. $0 \le T \le T_B \qquad S_e(T) = a_g * S * \eta * F_0 \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta * F_0} * \left(1 - \frac{T}{T_B}\right)\right]$

e. $T_B \le T \le T_C \qquad S_e(T) = a_g * S * \eta * F_0$

f. $T_C \le T \le T_D \qquad S_e(T) = a_g * S * \eta * F_0 \left(\frac{T_C}{T}\right)$

$T_D \le T \qquad S_e(T) = a_g * S * \eta * F_0 \left(\frac{T_C T_D}{T^2}\right)$

5.6. Modelli e risultati della modellazione numerica

Di seguito vengono presentati in dettaglio i modelli sismostratigrafici adottati ed risultati delle analisi effettuate sulle 9 verticali rappresentative delle aree studiate.

Gli spettri medi di risposta in accelerazione e lo spettro normalizzato vengono messi a confronto con lo spettro da normativa relativo alla categoria sismica di quel sito.

5.6.1. RSL.1 per il sito "zona Nord"

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kN/m³)	Vs (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Argille	0.00	-5.00	5.00	18.00	120	Vucetic & Dobry, PI=30
Argille 2	-5.00	-15.00	10.00	18.50	200	Vucetic & Dobry, PI=15
Sabbie	-15.00	-40.00	25.00	20.00	400	Sand Seed & Idriss (1970)
Sabbie 2	-40.00	-70.00	30.00	20.50	490	Sand Seed & Idriss (1970)
Bedrock	-70.00	-	-	22.00	650	-

TAB. 11 – MODELLO GEOFISICO DELLA VERTICALE "ZONA NORD"

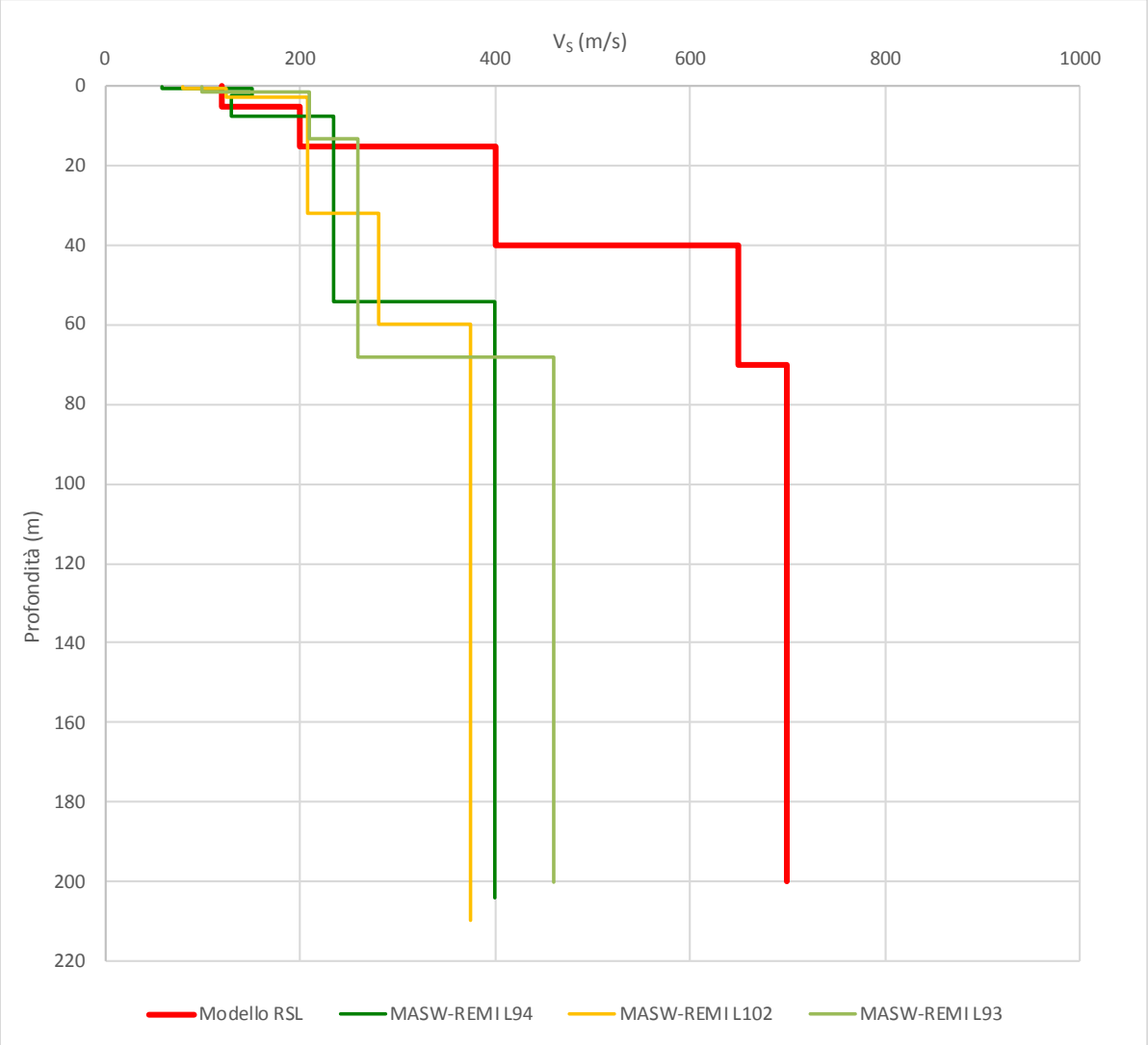


FIG. 47 – DISCRETIZZAZIONE DELLA VS LUNGO LA VERTICALE "ZONA NORD"

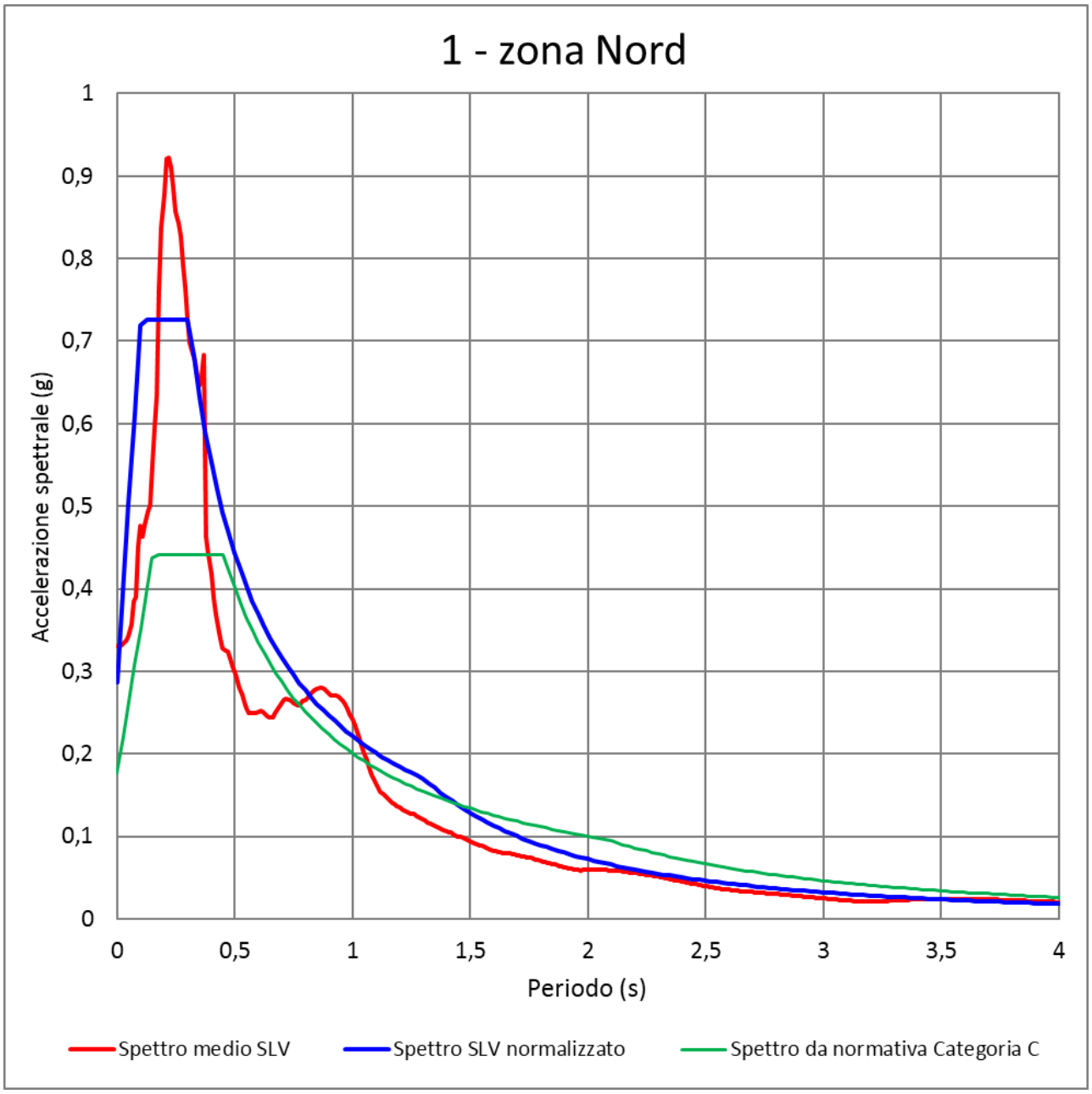


FIG. 48 - SPETTRO MEDIO DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE E SPETTRO MEDIO NORMALIZZATO PER LA VERTICALE "ZONA NORD" CONFRONTATI CON LO SPETTRO SEMPLIFICATO DA NORMATIVA PER LA CATEGORIA DI SOTTOSUOLO C

$a_{max}(T=0)$	F_o	Tc^*	h	S	Tb	Tc	Td	Cc
0.287	2.533	0.215	1.000	1.000	0.102	0.305	1.307	1.420

TAB. 12 – PARAMETRI NORMALIZZATI PER LA VERTICALE "ZONA NORD"

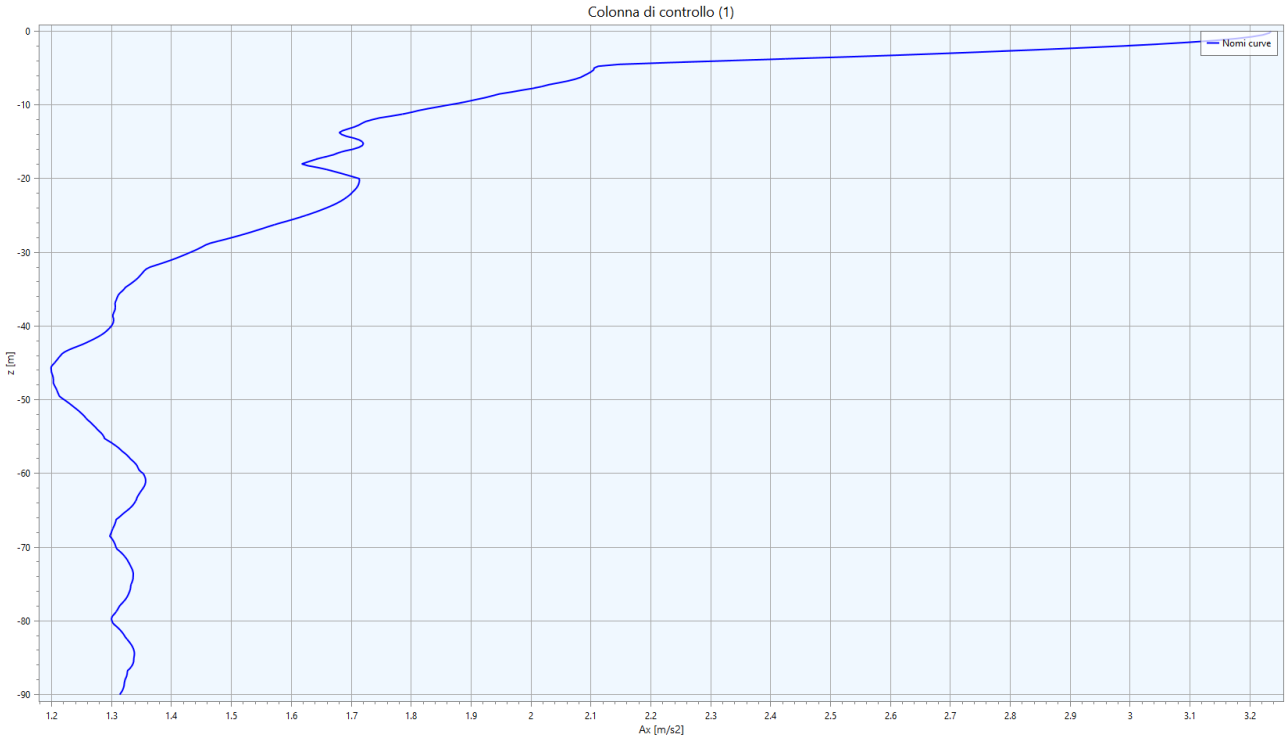


FIG. 49 - ACCELERAZIONE IN OUTPUT IN FUNZIONE DELLA PROFONDITÀ LUNGO LA VERTICALE "ZONA NORD"

Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore da abachi RER Pianura 2	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	1.7	1.8	-5.88%
FA (0.4-0.8 s)	2.3	2.7	-14.81%
FA (0.7-1.1 s)	2.3	3.2	-28.13%
FA (0.5-1.5 s)	2.2	3.1	-29.03%
PGA/PGA_0	1.7	1.7	-
SI/SI_0 (0.1-0.5 s)	1.7	2.0	-15.00%
SI/SI_0 (0.5-1.0 s)	2.3	3.0	-23.33%
SI/SI_0 (0.5-1.5 s)	2.1	3.3	-36.36%

TAB. 13 - FATTORI DI AMPLIFICAZIONE CALCOLATI LUNGO LA VERTICALE "ZONA NORD"

5.6.2. RSL.2 per il sito "Roncadella e Zona Fiera"

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kN/m³)	Vs (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Argille	0.00	-7.00	7.00	18.00	170	Vucetic & Dobry, PI=30
Argille 2	-7.00	-25.00	18.00	18.50	200	Vucetic & Dobry, PI=15
Sabbie	-25.00	-45.00	20.00	20.00	450	Sand Seed & Idriss (1970)
Sabbie 2	-45.00	-90.00	45.00	20.50	550	Sand Seed & Idriss (1970)
Bedrock	-90.00	-	-	22.00	700	-

TAB. 14 – MODELLO GEOFISICO DELLA VERTICALE "RONCADELLA E ZONA FIERA"

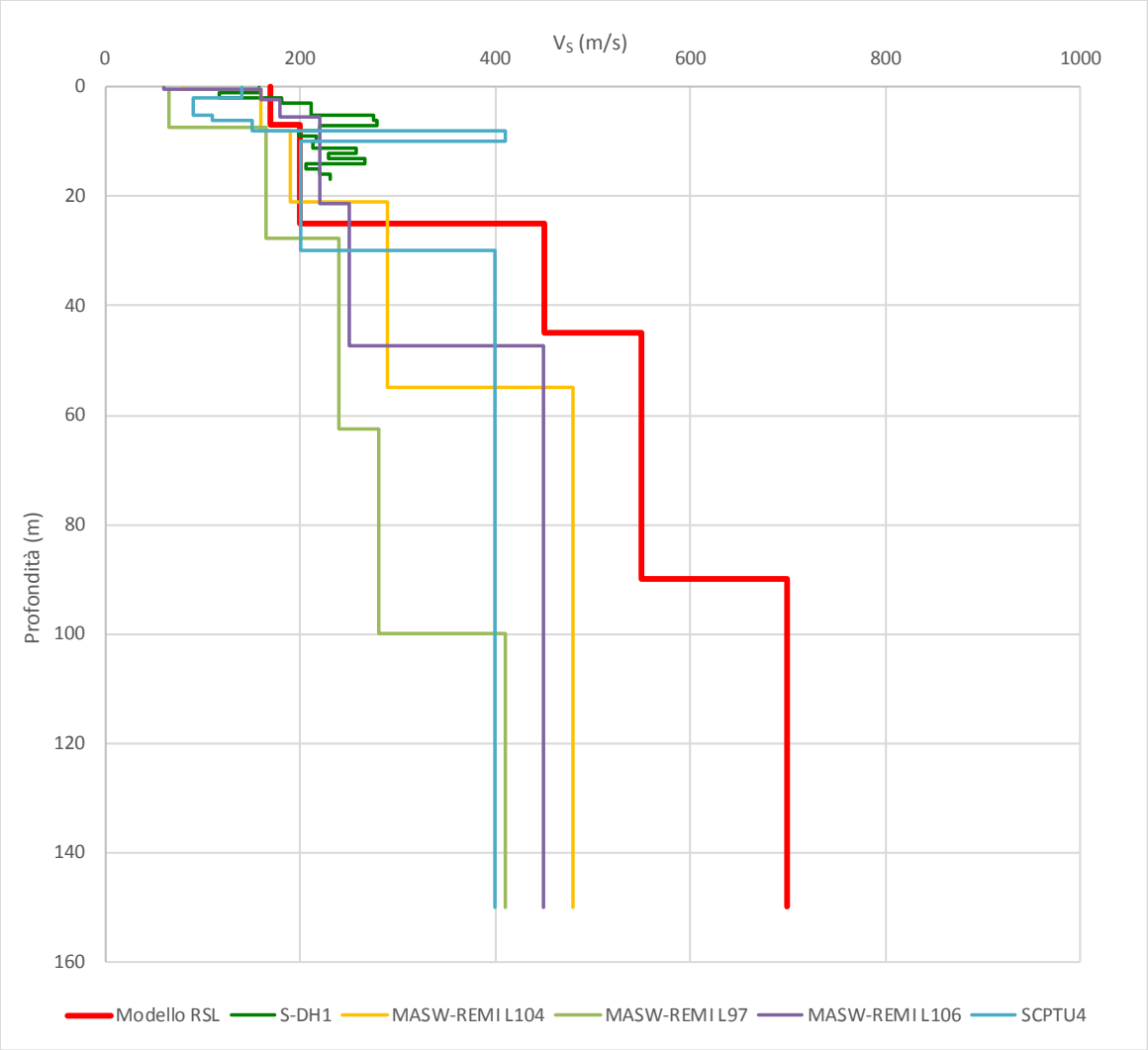


FIG. 50 – DISCRETIZZAZIONE DELLA VS LUNGO LA VERTICALE "RONCADELLA E ZONA FIERA"

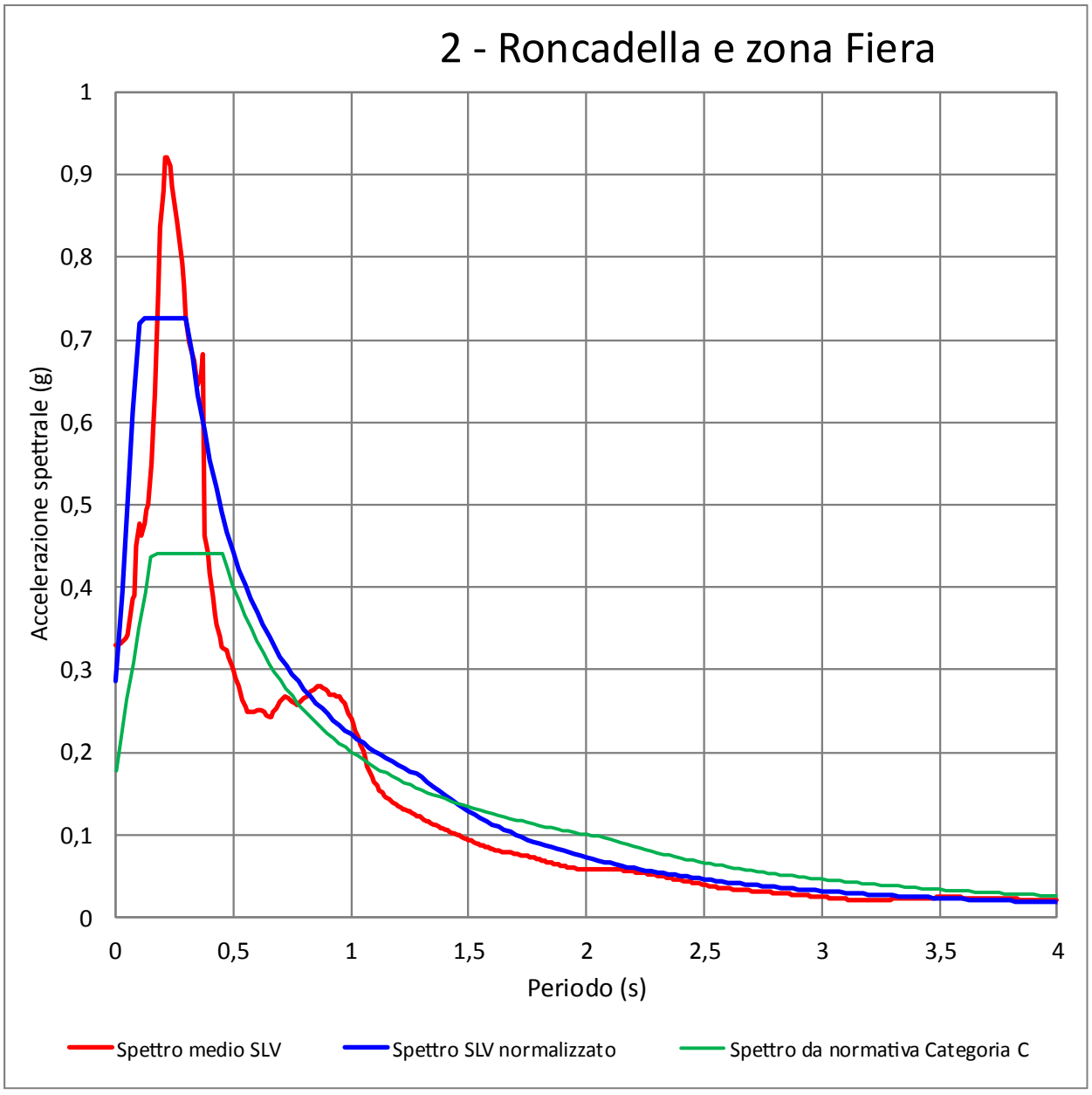


FIG. 51 - SPETTRO MEDIO DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE E SPETTRO MEDIO NORMALIZZATO PER LA VERTICALE "RONCADELLA E ZONA FIERA" CONFRONTATI CON LO SPETTRO SEMPLIFICATO DA NORMATIVA PER LA CATEGORIA DI SOTTOSUOLO C

a_{max} (T=0)	F_o	Tc*	h	S	Tb	Tc	Td	Cc
0.287	2.533	0.215	1.000	1.000	0.102	0.305	1.307	1.420

TAB. 15 – PARAMETRI NORMALIZZATI PER LA VERTICALE "RONCADELLA E ZONA FIERA"

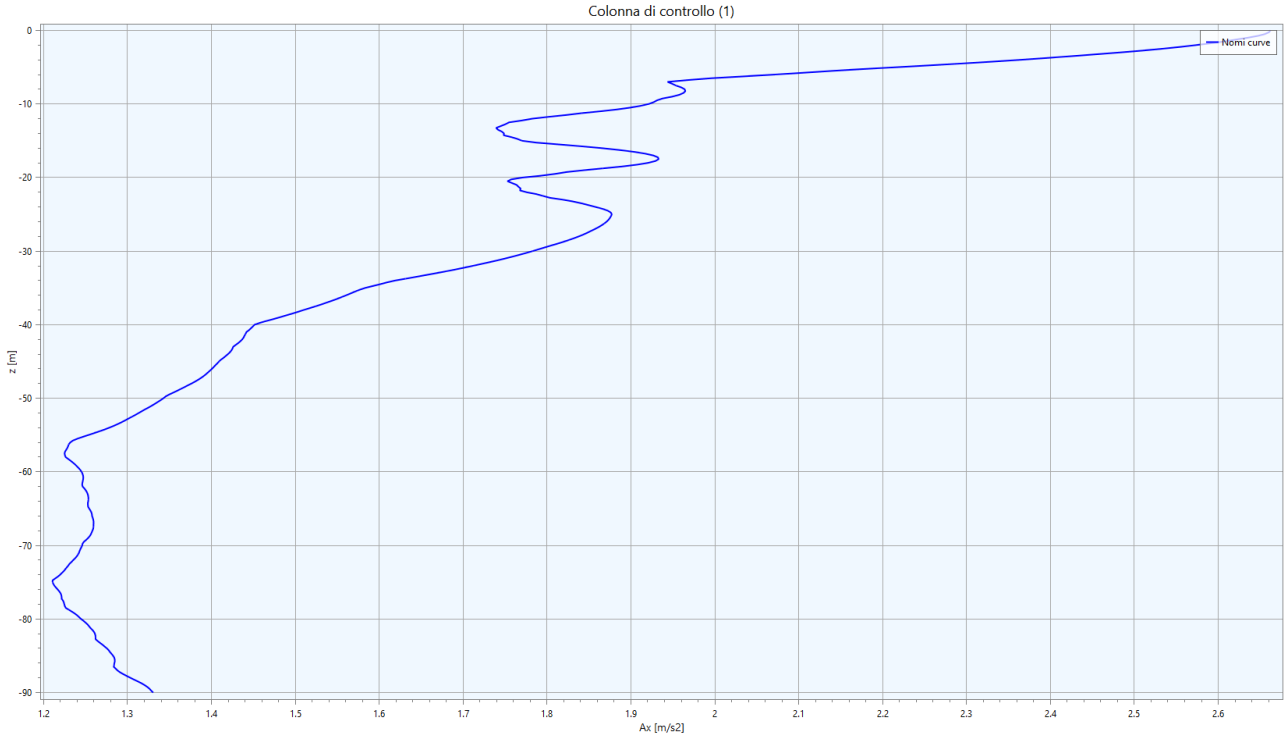


FIG. 52 – ACCELERAZIONE IN OUTPUT IN FUNZIONE DELLA PROFONDITÀ LUNGO LA VERTICALE "RONCADELLA E ZONA FIERA"

Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore da abachi RER Pianura 2	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	1.3	1.8	-27.78%
FA (0.4-0.8 s)	2.0	2.7	-25.93%
FA (0.7-1.1 s)	2.4	3.2	-25.00%
FA (0.5-1.5 s)	2.2	3.1	-29.03%
PGA/PGA_0	1.3	1.7	-23.53%
SI/SI_0 (0.1-0.5 s)	1.3	2.0	-35.00%
SI/SI_0 (0.5-1.0 s)	2.2	3.0	-26.67%
SI/SI_0 (0.5-1.5 s)	2.2	3.3	-33.33%

TAB. 16 - FATTORI DI AMPLIFICAZIONE CALCOLATI LUNGO LA VERTICALE "RONCADELLA E ZONA FIERA"

5.6.3. RSL.3 per il sito "Villafranca"

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kN/m³)	Vs (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Argille	0.00	-0.30	0.30	18.00	65	Vucetic & Dobry, PI=30
Argille 2	-0.30	-2.30	2.00	18.50	157	Vucetic & Dobry, PI=15
Argille 3	-2.30	-10.30	8.00	18.50	148	Vucetic & Dobry, PI=15
Sabbie	-10.30	-20.30	10.00	20.00	210	Sand Seed & Idriss (1970)
Sabbie 2	-20.30	-60.30	40.00	20.50	260	Sand Seed & Idriss (1970)
Bedrock	-60.30	-	-	22.00	400	-

TAB. 17 – MODELLO GEOFISICO DELLA VERTICALE "VILLAFRANCA"

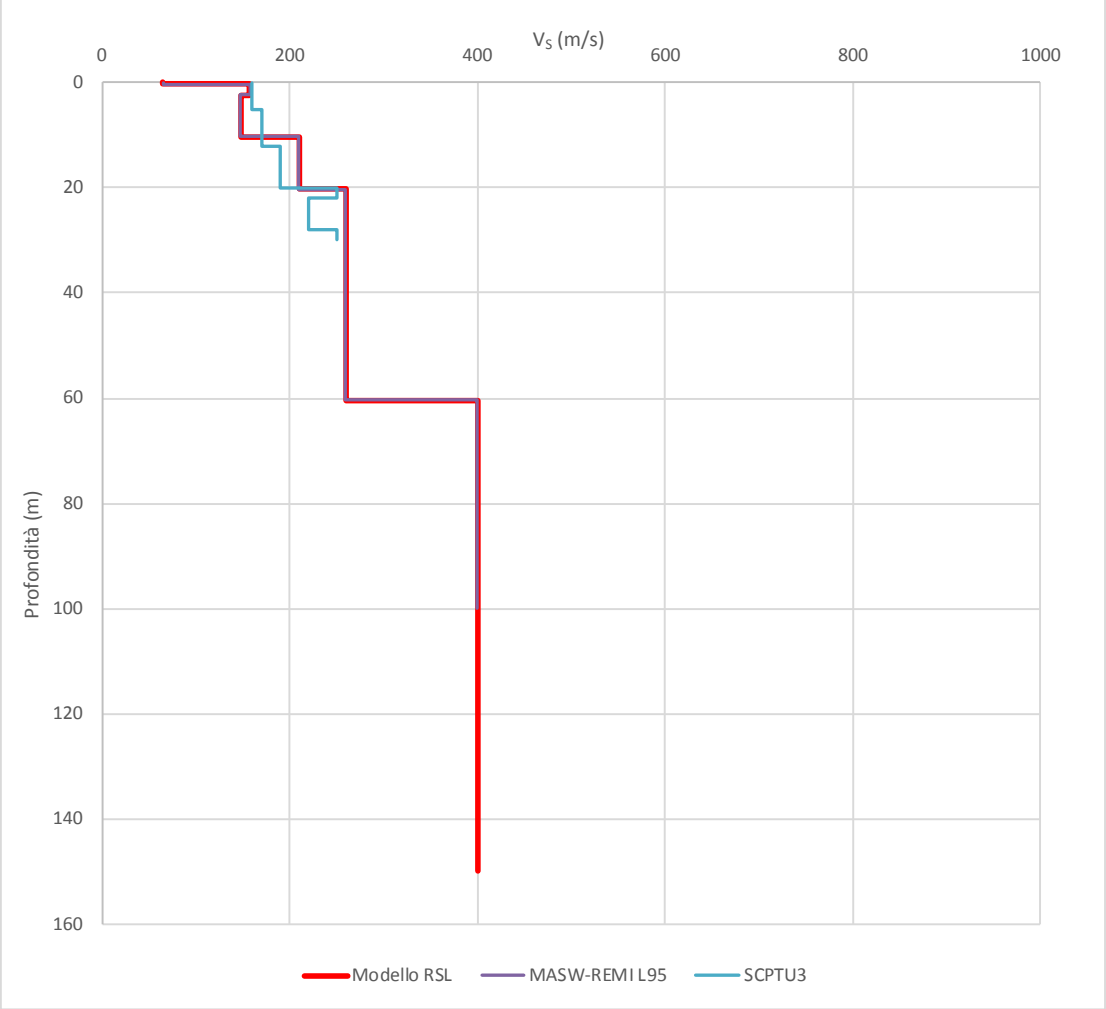


FIG. 53 – DISCRETIZZAZIONE DELLA VS LUNGO LA VERTICALE "VILLAFRANCA"

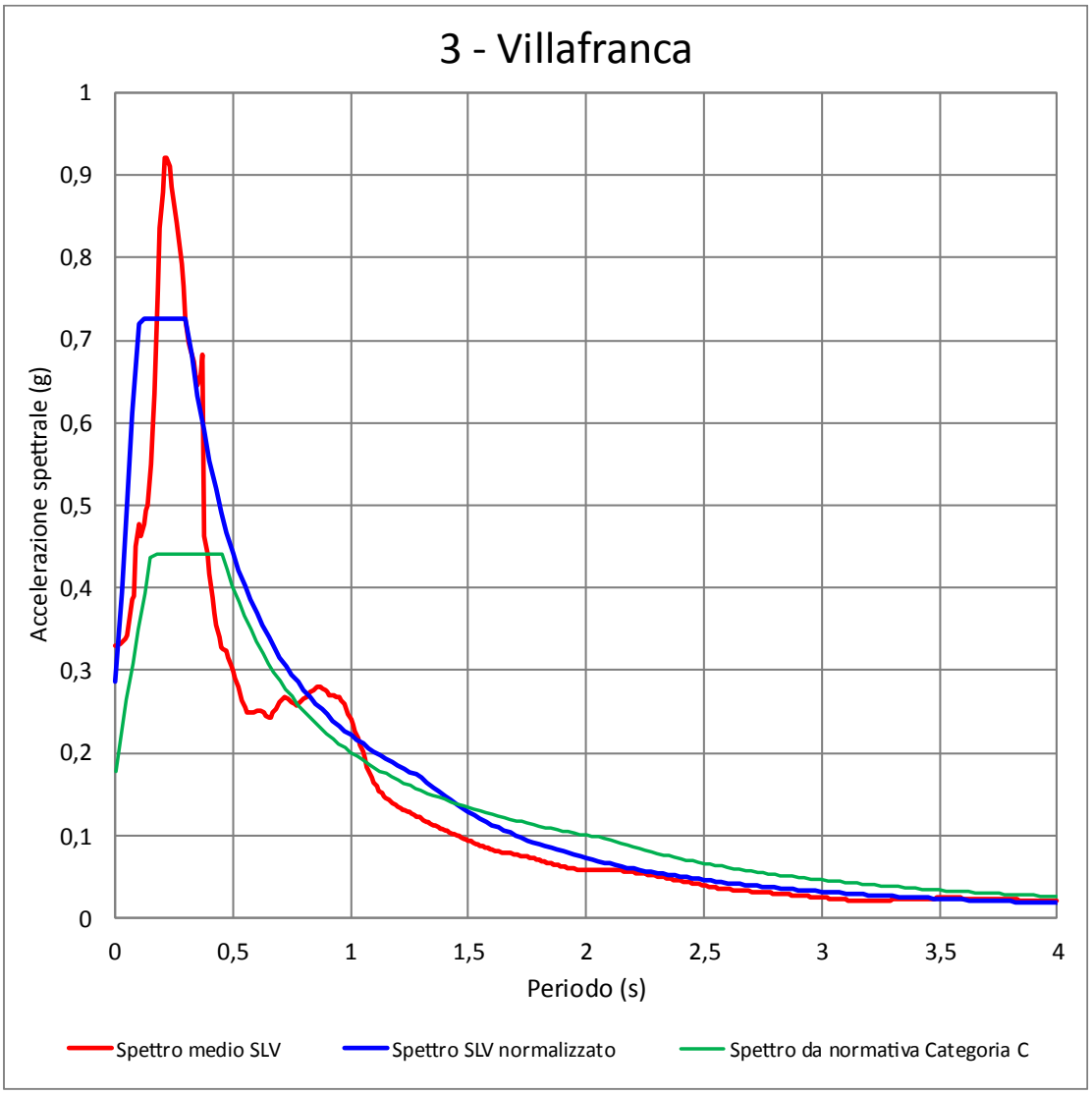


FIG. 54 - SPETTRO MEDIO DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE E SPETTRO MEDIO NORMALIZZATO PER LA VERTICALE "VILLAFRANCA" CONFRONTATI CON LO SPETTRO SEMPLIFICATO DA NORMATIVA PER LA CATEGORIA DI SOTTOSUOLO C

$a_{max}(T=0)$	F_o	Tc^*	h	S	Tb	Tc	Td	Cc
0.287	2.533	0.215	1.000	1.000	0.102	0.305	1.307	1.420

TAB. 18 – PARAMETRI NORMALIZZATI PER LA VERTICALE "VILLAFRANCA"

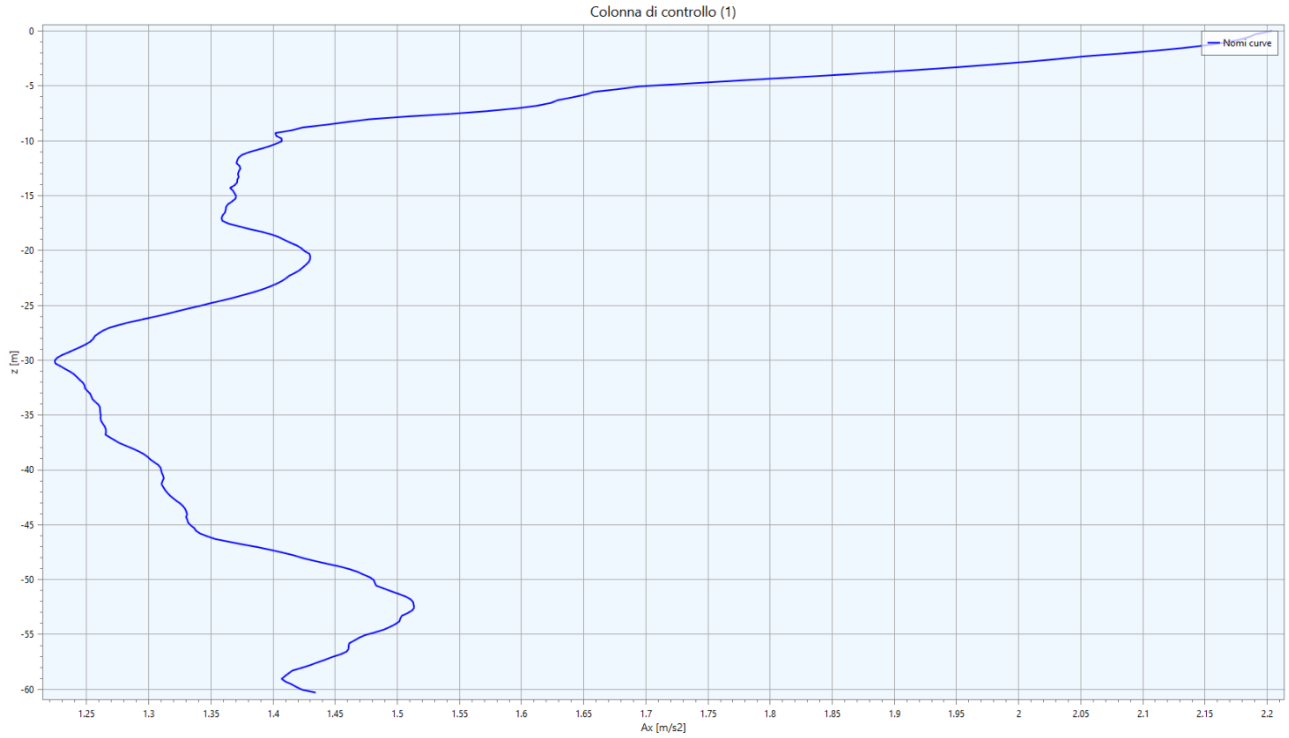


FIG. 55 – ACCELERAZIONE IN OUTPUT IN FUNZIONE DELLA PROFONDITÀ LUNGO LA VERTICALE "VILLAFRANCA"

Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore da abachi RER Pianura 2	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	1.1	1.8	-38.89%
FA (0.4-0.8 s)	1.5	2.7	-44.44%
FA (0.7-1.1 s)	1.6	3.2	-50.00%
FA (0.5-1.5 s)	1.1	3.1	-64.52%
PGA/PGA_0	1.1	1.7	-35.29%
SI/SI_0 (0.1-0.5 s)	1.1	2.0	-45.00%
SI/SI_0 (0.5-1.0 s)	1.4	3.0	-53.33%
SI/SI_0 (0.5-1.5 s)	1.6	3.3	-51.52%

TAB. 19 - FATTORI DI AMPLIFICAZIONE CALCOLATI LUNGO LA VERTICALE "VILLAFRANCA"

5.6.4. RSL.4 per il sito "La Selva"

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kN/m³)	Vs (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Argille	0.00	-7.00	7.00	18.00	250	Vucetic & Dobry, PI=30
Argille 2	-7.00	-25.00	18.00	18.50	330	Vucetic & Dobry, PI=15
Sabbie	-25.00	-55.00	30.00	20.00	440	Sand Seed & Idriss (1970)
Sabbie 2	-55.00	-85.00	30.00	20.50	550	Sand Seed & Idriss (1970)
Bedrock	-85.00	-	-	22.00	630	-

TAB. 20 – MODELLO GEOFISICO DELLA VERTICALE "LA SELVA"

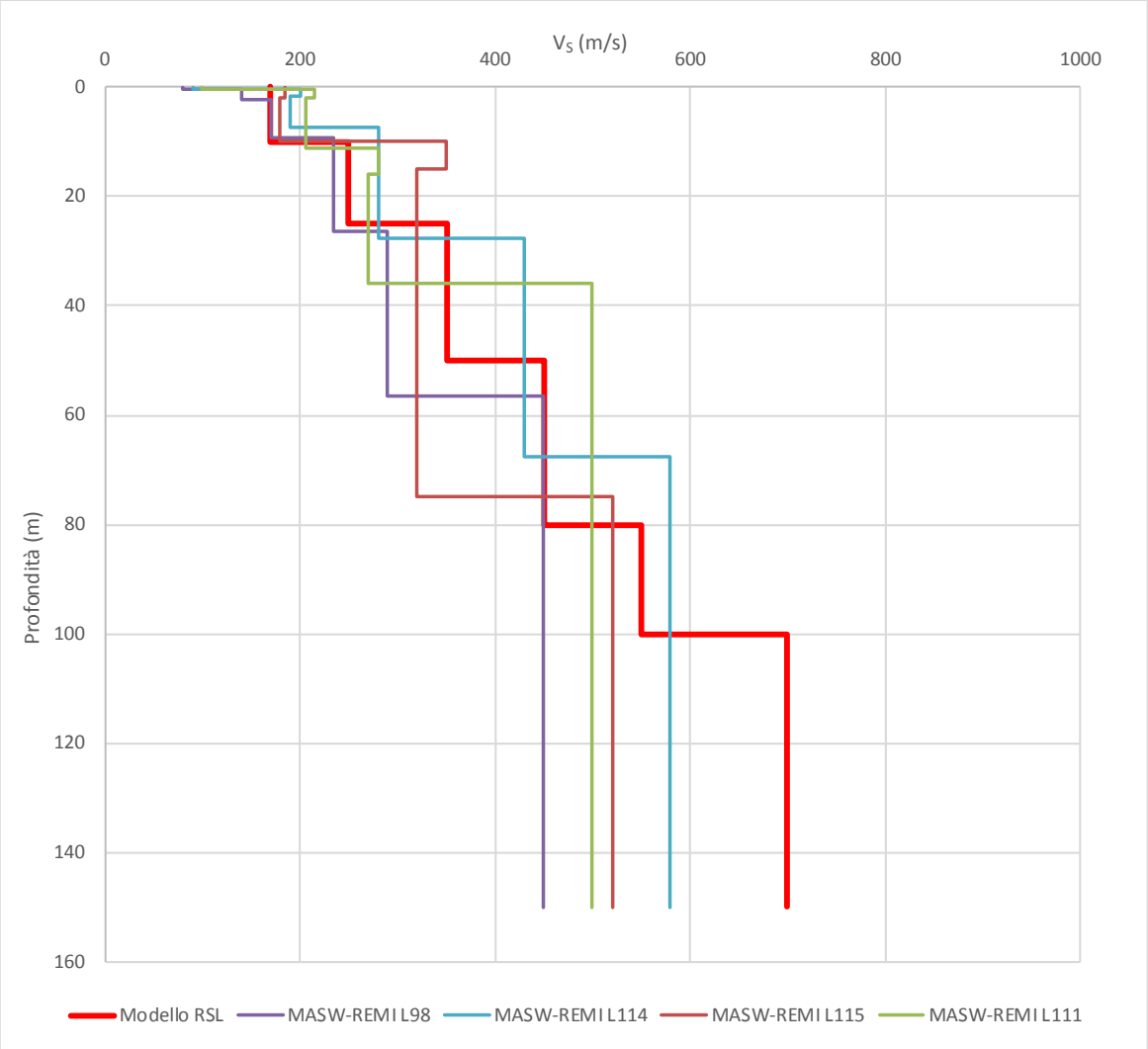


FIG. 56 – DISCRETIZZAZIONE DELLA VS LUNGO LA VERTICALE "LA SELVA"

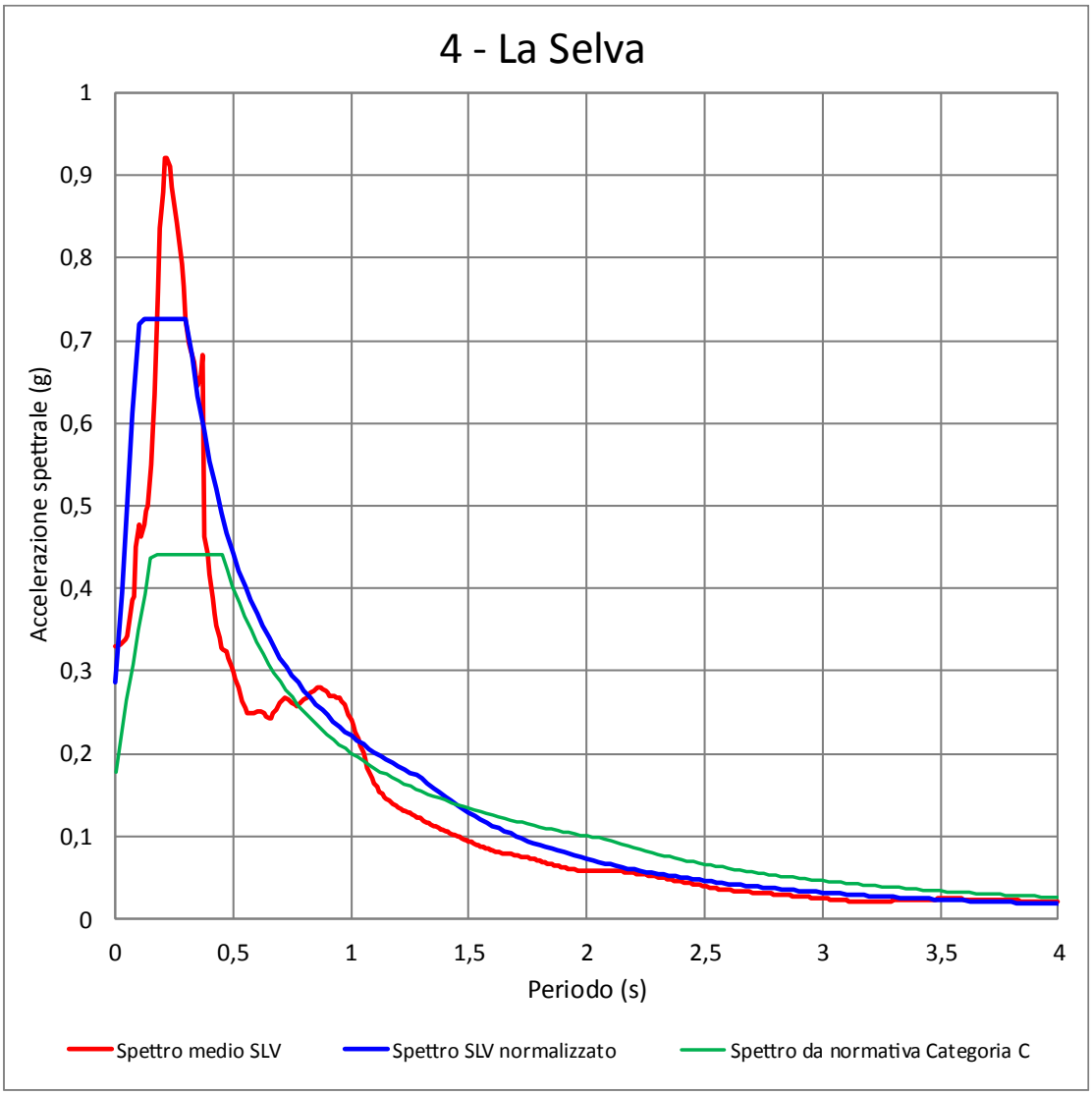


FIG. 57 - SPETTRO MEDIO DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE E SPETTRO MEDIO NORMALIZZATO PER LA VERTICALE "LA SELVA" CONFRONTATI CON LO SPETTRO SEMPLIFICATO DA NORMATIVA PER LA CATEGORIA DI SOTTOSUOLO C

$a_{max}(T=0)$	F_o	Tc^*	h	S	Tb	Tc	Td	Cc
0.287	2.533	0.215	1.000	1.000	0.102	0.305	1.307	1.420

TAB. 21 – PARAMETRI NORMALIZZATI PER LA VERTICALE "LA SELVA"

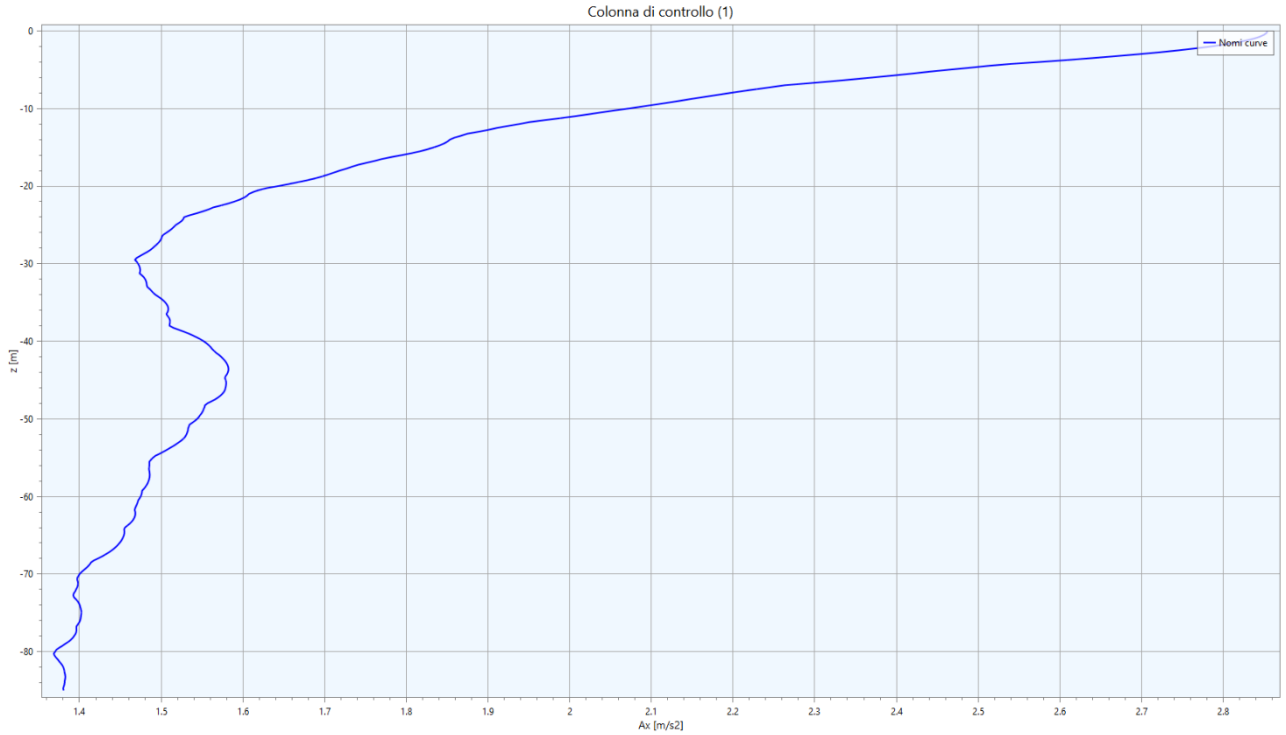


FIG. 58 – ACCELERAZIONE IN OUTPUT IN FUNZIONE DELLA PROFONDITÀ LUNGO LA VERTICALE "LA SELVA"

Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore da abachi RER Margine tipo B	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	1.4	1.8	-22.22%
FA (0.4-0.8 s)	1.6	2.3	-30.43%
FA (0.7-1.1 s)	1.6	2.7	-40.74%
FA (0.5-1.5 s)	1.6	2.6	-38.46%
PGA/PGA_0	1.4	1.6	-12.50%
SI/SI_0 (0.1-0.5 s)	1.4	1.9	-26.32%
SI/SI_0 (0.5-1.0 s)	1.7	2.5	-32.00%
SI/SI_0 (0.5-1.5 s)	1.6	2.7	-40.74%

TAB. 22 - FATTORI DI AMPLIFICAZIONE CALCOLATI LUNGO LA VERTICALE "LA SELVA"

5.6.5. RSL.5 per il sito "Centro città"

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kN/m³)	Vs (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Argille	0.00	-10.00	10.00	18.00	170	Vucetic & Dobry, PI=30
Argille 2	-10.00	-25.00	15.00	18.50	250	Vucetic & Dobry, PI=15
Sabbie	-25.00	-50.00	25.00	20.00	350	Sand Seed & Idriss (1970)
Sabbie 2	-50.00	-80.00	30.00	20.00	450	Sand Seed & Idriss (1970)
Sabbie 3	-80.00	-100.00	20.00	20.50	550	Sand Seed & Idriss (1970)
Bedrock	-100.00	-	-	22.00	630	-

TAB. 23 – MODELLO GEOFISICO DELLA VERTICALE "CENTRO CITTÀ"

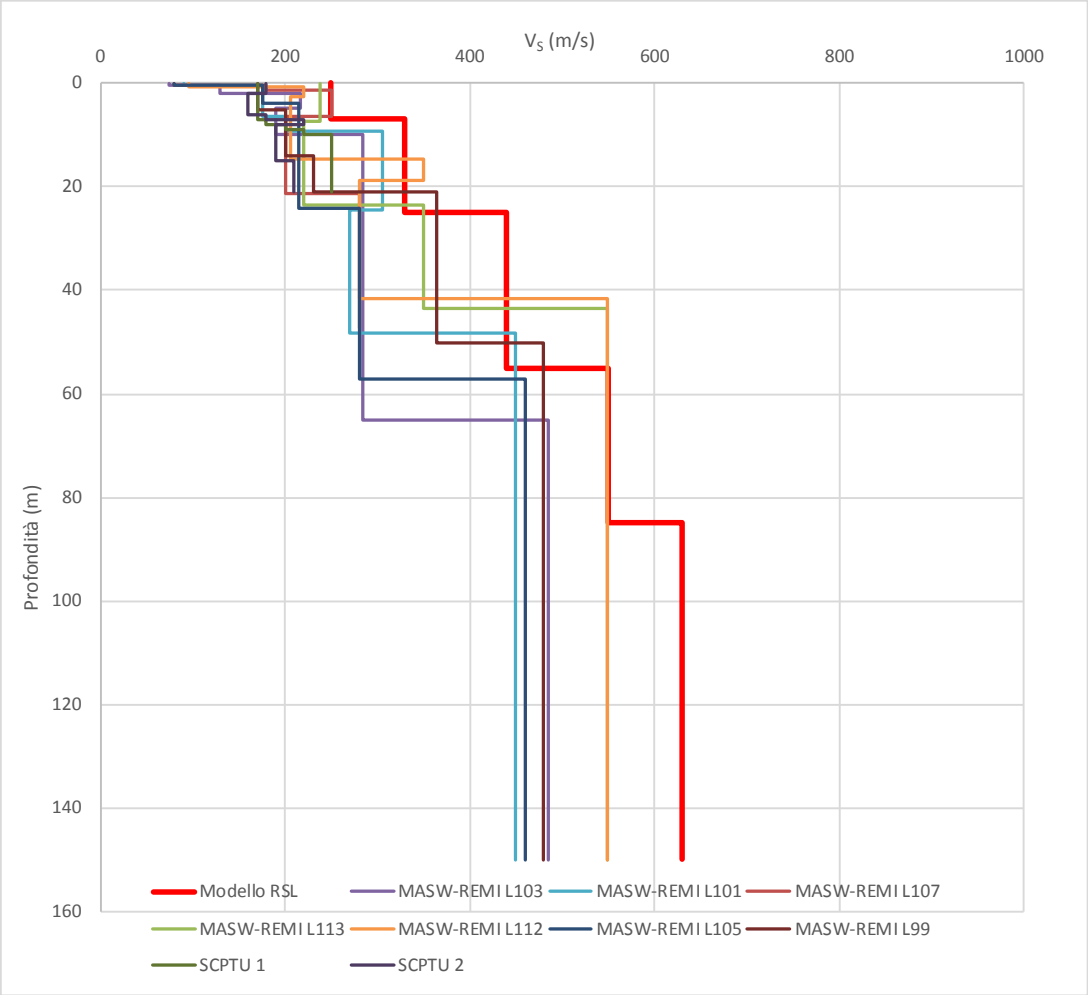


FIG. 59 – DISCRETIZZAZIONE DELLA VS LUNGO LA VERTICALE "CENTRO CITTÀ"

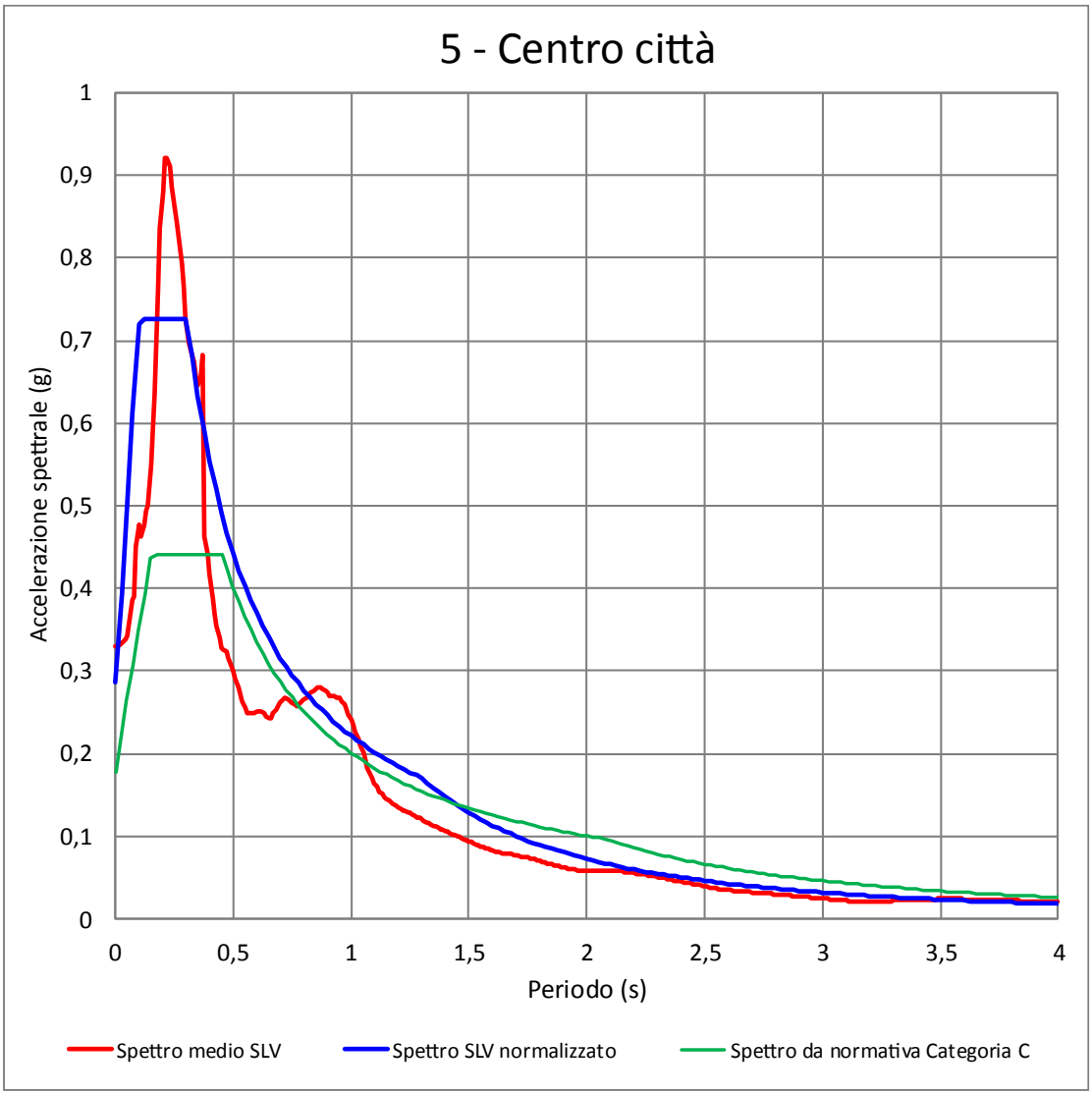


FIG. 60 - SPETTRO MEDIO DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE E SPETTRO MEDIO NORMALIZZATO PER LA VERTICALE "CENTRO CITTÀ" CONFRONTATI CON LO SPETTRO SEMPLIFICATO DA NORMATIVA PER LA CATEGORIA DI SOTTOSUOLO C

$a_{max}(T=0)$	F_o	Tc^*	h	S	Tb	Tc	Td	Cc
0.287	2.533	0.215	1.000	1.000	0.102	0.305	1.307	1.420

TAB. 24 – PARAMETRI NORMALIZZATI PER LA VERTICALE "CENTRO CITTÀ"

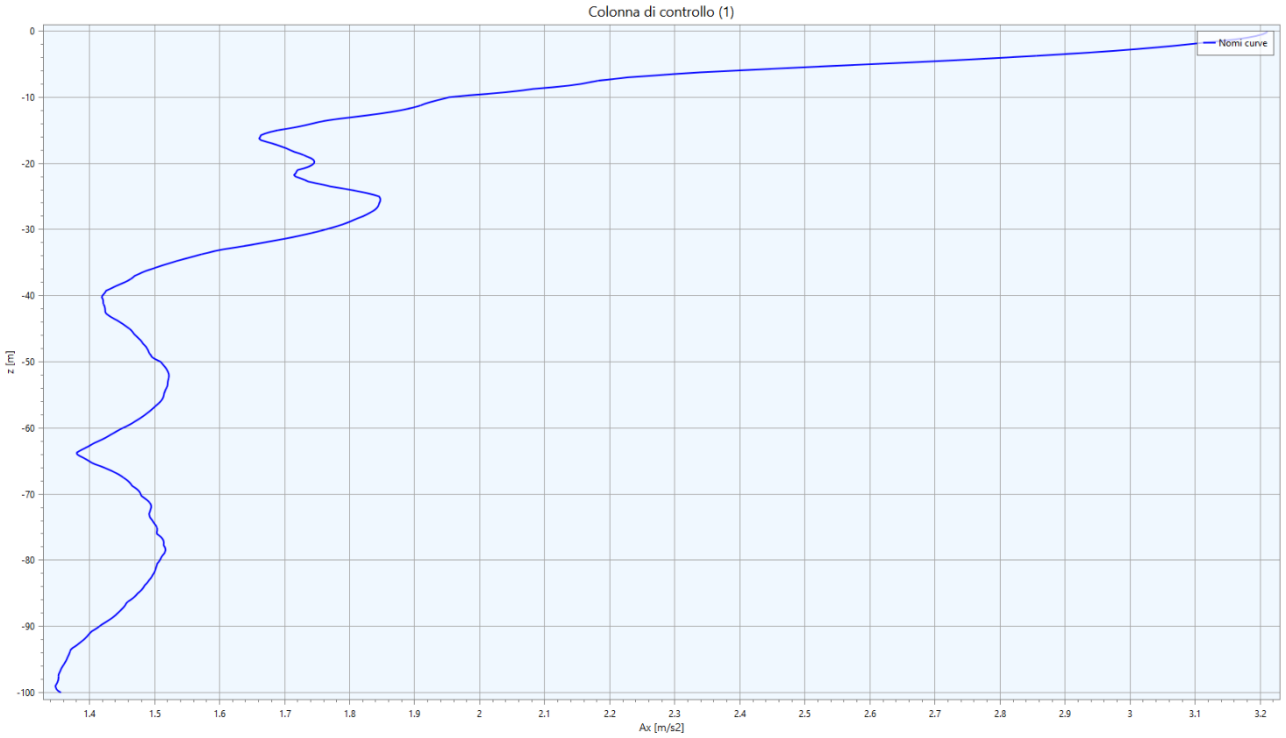


FIG. 61 – ACCELERAZIONE IN OUTPUT IN FUNZIONE DELLA PROFONDITÀ LUNGO LA VERTICALE "CENTRO CITTÀ"

Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore da abachi RER Margine tipo B	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	1.6	1.8	-11.11%
FA (0.4-0.8 s)	2.0	2.3	-13.04%
FA (0.7-1.1 s)	2.1	2.7	-22.22%
FA (0.5-1.5 s)	2.1	2.6	-19.23%
PGA/PGA_0	1.6	1.6	-
SI/SI_0 (0.1-0.5 s)	1.6	1.9	-15.79%
SI/SI_0 (0.5-1.0 s)	2.0	2.5	-20.00%
SI/SI_0 (0.5-1.5 s)	2.0	2.7	-25.93%

TAB. 25 - FATTORI DI AMPLIFICAZIONE CALCOLATI LUNGO LA VERTICALE "CENTRO CITTÀ"

5.6.6. RSL.6 per il sito "Quattro e Carpena"

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kN/m³)	Vs (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Argille	0.00	-5.00	5.00	18.00	200	Vucetic & Dobry, PI=30
Argille 2	-5.00	-12.00	7.00	18.50	260	Vucetic & Dobry, PI=15
Sabbie	-12.00	-70.00	58.00	20.00	360	Sand Seed & Idriss (1970)
Sabbie 2	-70.00	-90.00	20.00	20.00	550	Sand Seed & Idriss (1970)
Sabbie 3	-90.00	-110.00	20.00	20.50	650	Sand Seed & Idriss (1970)
Bedrock	-110.00	-	-	22.00	700	-

TAB. 26 – MODELLO GEOFISICO DELLA VERTICALE "QUATTRO E CARPENA"

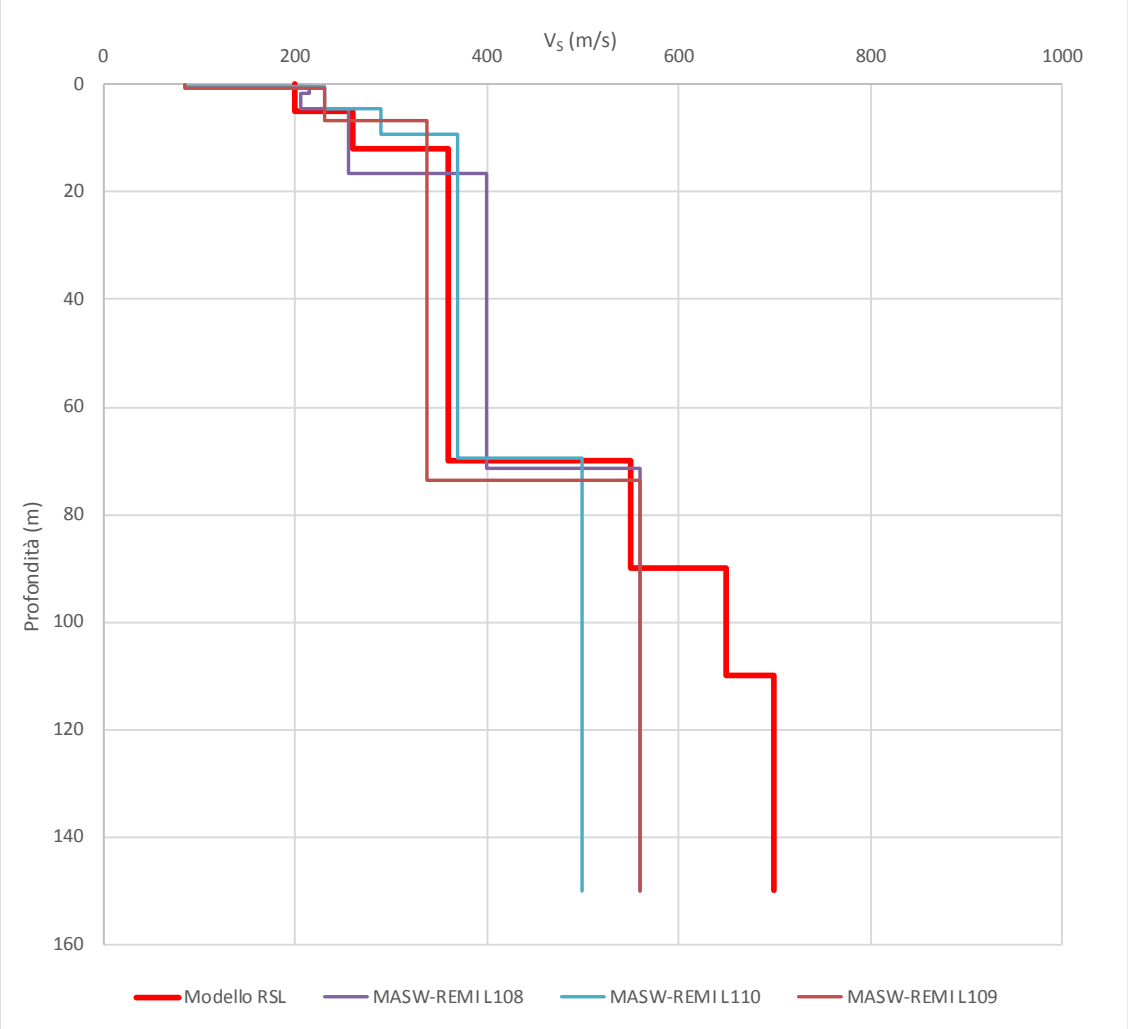


FIG. 62 – DISCRETIZZAZIONE DELLA VS LUNGO LA VERTICALE "QUATTRO E CARPENA"

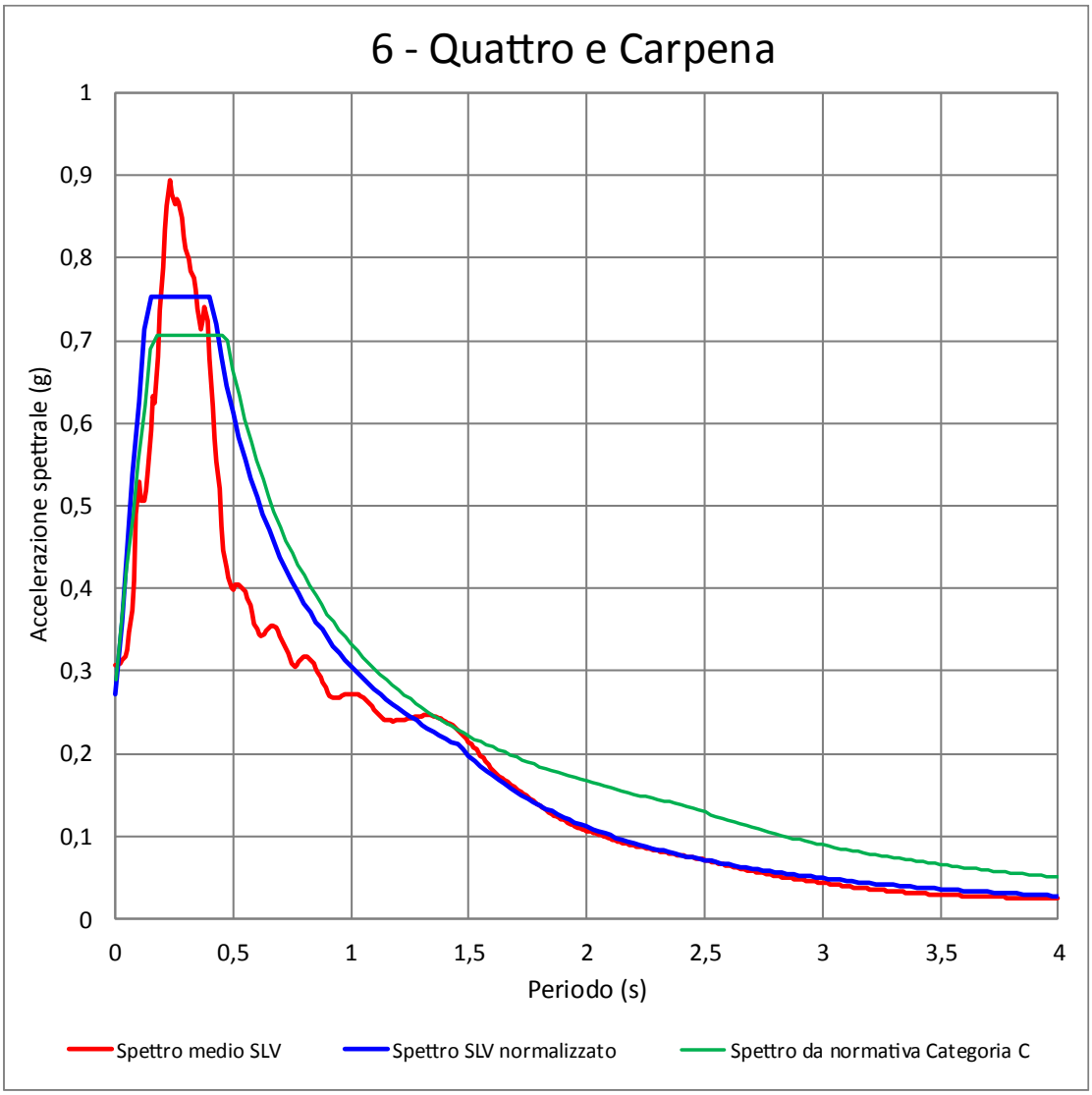


FIG. 63 - SPETTRO MEDIO DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE E SPETTRO MEDIO NORMALIZZATO PER LA VERTICALE "QUATTRO E CARPENA" CONFRONTATI CON LO SPETTRO SEMPLIFICATO DA NORMATIVA PER LA CATEGORIA DI SOTTOSUOLO C

$a_{max}(T=0)$	F_o	Tc^*	h	S	Tb	Tc	Td	Cc
0.271	2.774	0.287	1.000	1.000	0.136	0.407	1.454	1.420

TAB. 27 – PARAMETRI NORMALIZZATI PER LA VERTICALE "QUATTRO E CARPENA"

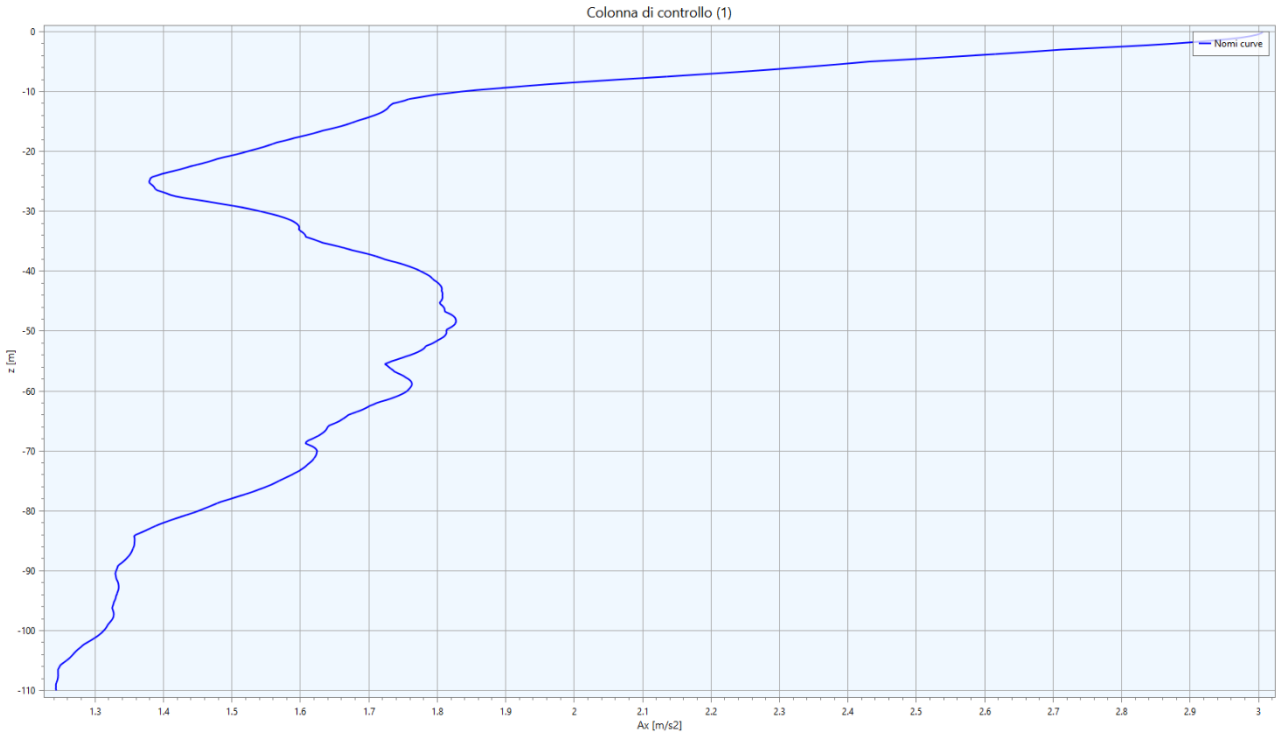


FIG. 64 – ACCELERAZIONE IN OUTPUT IN FUNZIONE DELLA PROFONDITÀ LUNGO LA VERTICALE "QUATTRO E CARPENA"

Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore da abachi RER Margine tipo A	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	1.5	2.1	-28.57%
FA (0.4-0.8 s)	1.5	2.6	-42.31%
FA (0.7-1.1 s)	1.7	2.3	-26.09%
FA (0.5-1.5 s)	1.7	-	-
PGA/PGA_0	1.5	2.0	-25.00%
SI/SI_0 (0.1-0.5 s)	1.5	2.3	-34.78%
SI/SI_0 (0.5-1.0 s)	1.5	2.5	-40.00%
SI/SI_0 (0.5-1.5 s)	1.7	-	-

TAB. 28 - FATTORI DI AMPLIFICAZIONE CALCOLATI LUNGO LA VERTICALE "QUATTRO E CARPENA"

5.6.7. RSL.7 per il sito "Villagrappa e San Lorenzo"

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kN/m³)	Vs (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Argille	0.00	-0.90	0.90	18.00	100	Vucetic & Dobry, PI=30
Argille 2	-0.90	-3.90	3.00	18.50	245	Vucetic & Dobry, PI=15
Argille 3	-3.90	-5.90	2.00	18.50	230	Vucetic & Dobry, PI=15
Sabbie	-5.90	-23.90	18.00	20.00	310	Sand Seed & Idriss (1970)
Sabbie 2	-23.90	-54.90	31.00	20.00	440	Sand Seed & Idriss (1970)
Sabbie 3	-54.90	-84.90	30.00	20.50	550	Sand Seed & Idriss (1970)
Bedrock	-84.90	-	-	22.00	630	-

TAB. 29 – MODELLO GEOFISICO DELLA VERTICALE "VILLAGRAPPA E SAN LORENZO"

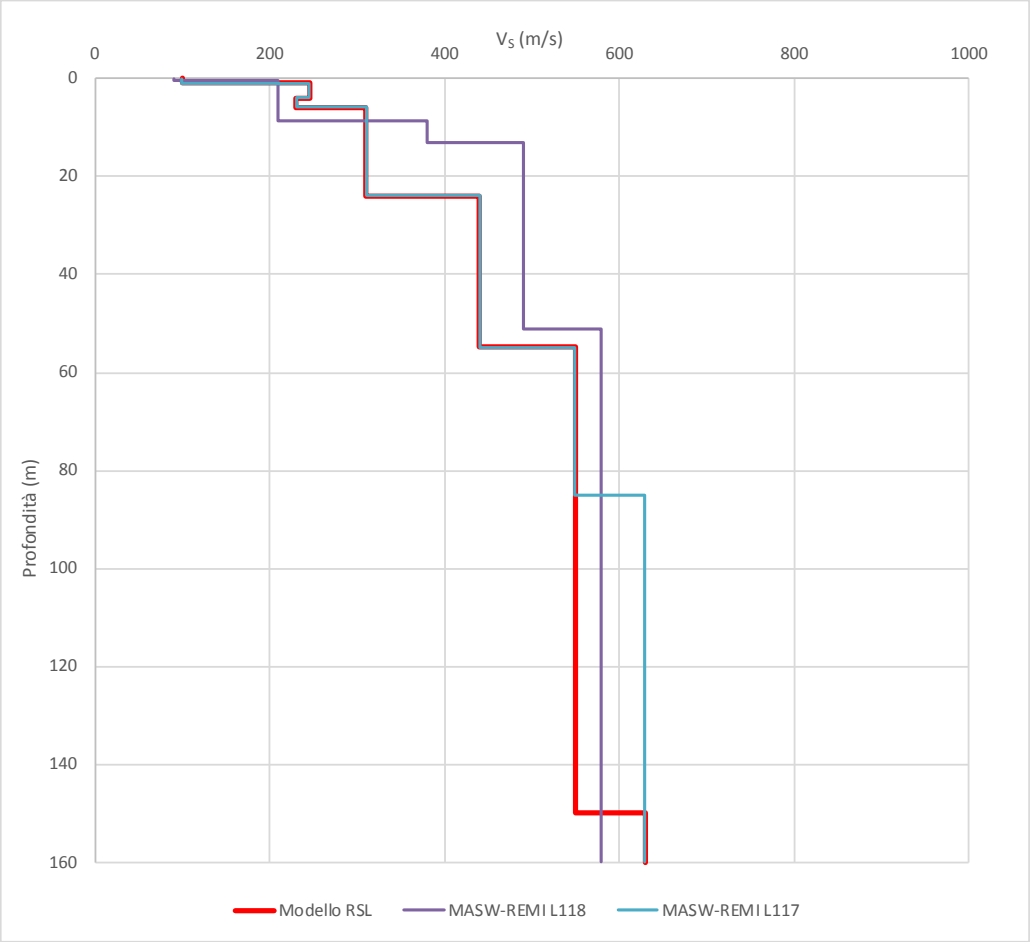


FIG. 65 – DISCRETIZZAZIONE DELLA VS LUNGO LA VERTICALE "VILLAGRAPPA E SAN LORENZO"

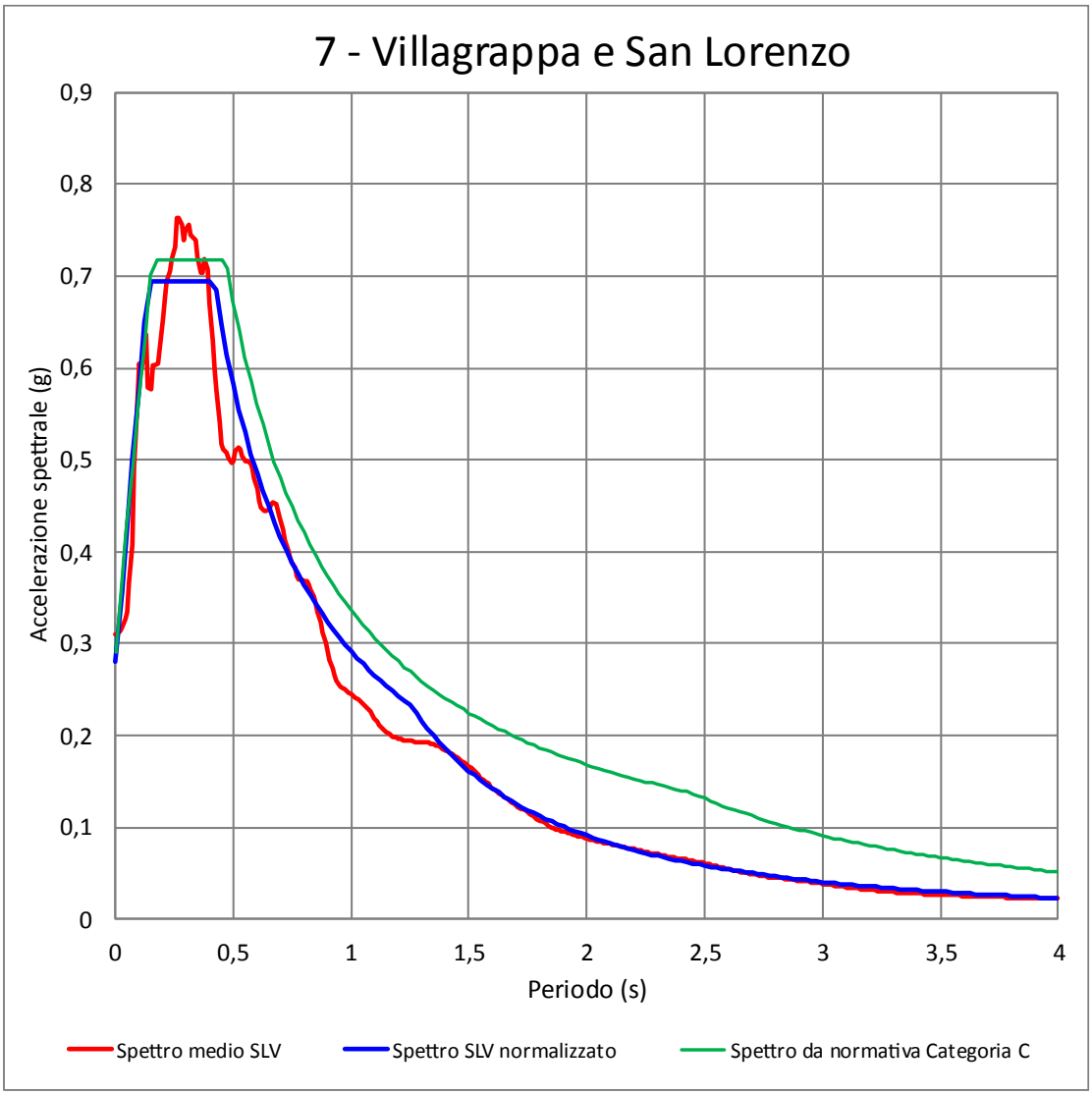


FIG. 66 - SPETTRO MEDIO DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE E SPETTRO MEDIO NORMALIZZATO PER LA VERTICALE "VILLAGRAPPA E SAN LORENZO" CONFRONTATI CON LO SPETTRO SEMPLIFICATO DA NORMATIVA PER LA CATEGORIA DI SOTTOSUOLO C

$a_{max}(T=0)$	F_o	Tc^*	h	S	Tb	Tc	Td	Cc
0.281	2.474	0.296	1.000	1.000	0.140	0.420	1.247	1.420

TAB. 30 – PARAMETRI NORMALIZZATI PER LA VERTICALE "VILLAGRAPPA E SAN LORENZO"

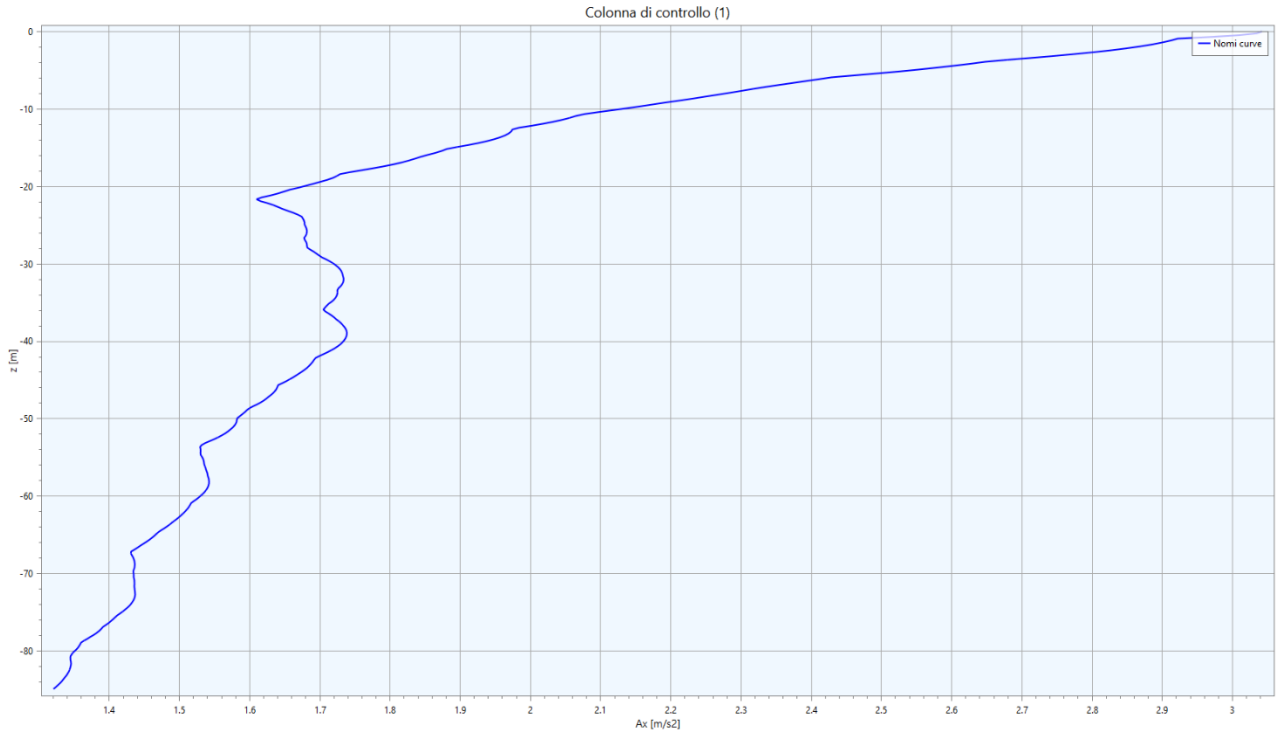


FIG. 67 – ACCELERAZIONE IN OUTPUT IN FUNZIONE DELLA PROFONDITÀ LUNGO LA VERTICALE "VILLAGRAPPA E SAN LORENZO"

Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore da abachi RER Coperture su substrato non rigido	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	1.5	1.8	-16.67%
FA (0.4-0.8 s)	1.8	1.4	28.57%
FA (0.7-1.1 s)	1.8	1.3	38.46%
FA (0.5-1.5 s)	1.7	-	-
PGA/PGA_0	1.5	2.0	-25.00%
SI/SI_0 (0.1-0.5 s)	1.5	1.7	-11.76%
SI/SI_0 (0.5-1.0 s)	1.8	1.4	28.57%
SI/SI_0 (0.5-1.5 s)	1.7	-	-

TAB. 31 - FATTORI DI AMPLIFICAZIONE CALCOLATI LUNGO LA VERTICALE "VILLAGRAPPA E SAN LORENZO"

5.6.8. RSL.8 per il sito "zona Ospedale"

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kN/m³)	Vs (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Argille	0.00	-1.10	1.10	18.00	120	Vucetic & Dobry, PI=30
Argille 2	-1.10	-18.10	17.00	18.50	240	Vucetic & Dobry, PI=15
Sabbie	-18.10	-52.10	34.00	20.00	450	Sand Seed & Idriss (1970)
Bedrock	-52.10	-	-	22.00	670	-

TAB. 32 – MODELLO GEOFISICO DELLA VERTICALE "ZONA OSPEDALE"

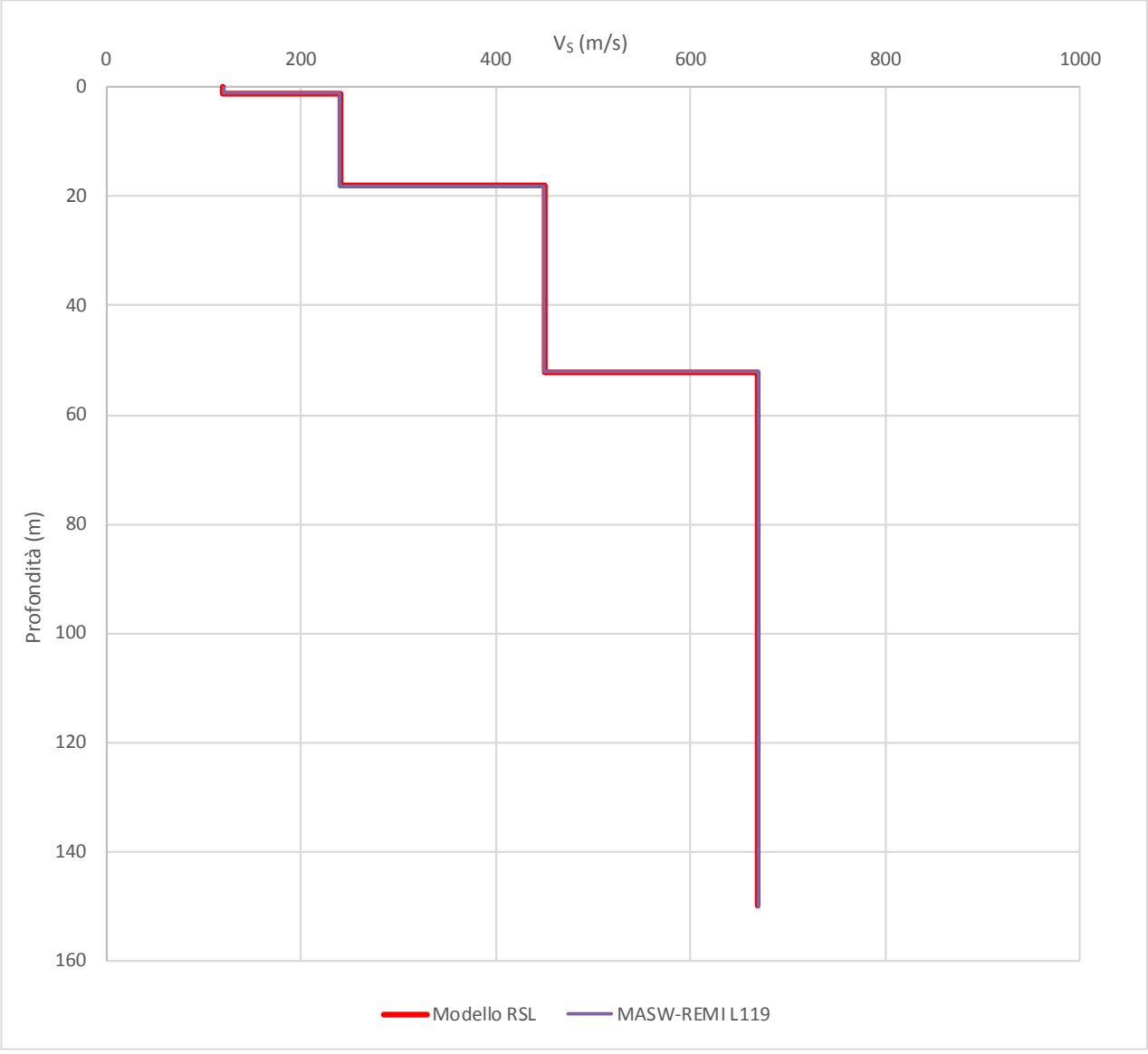


FIG. 68 – DISCRETIZZAZIONE DELLA VS LUNGO LA VERTICALE "ZONA OSPEDALE"

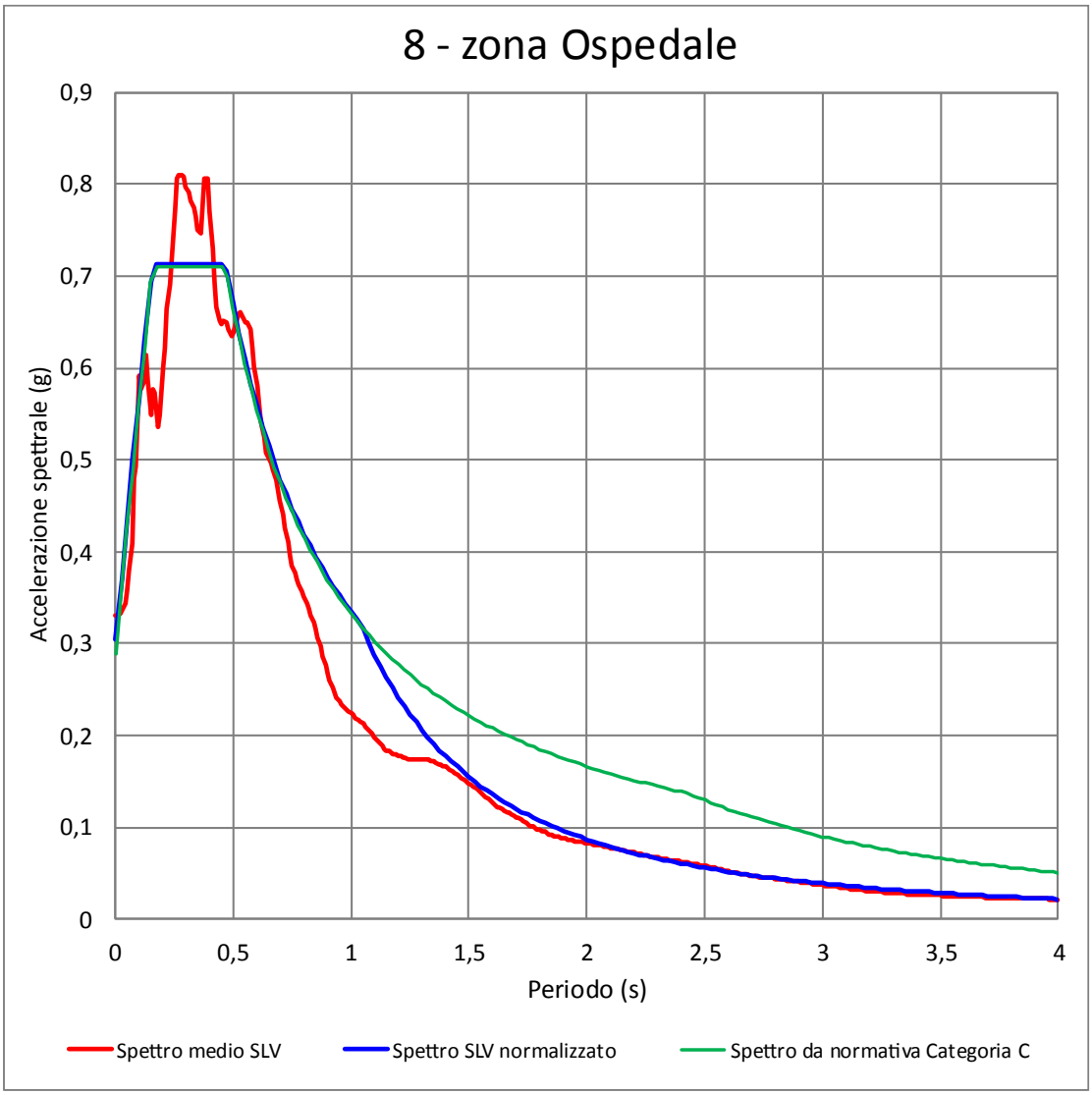


FIG. 69 - SPETTRO MEDIO DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE E SPETTRO MEDIO NORMALIZZATO PER LA VERTICALE "ZONA OSPEDALE" CONFRONTATI CON LO SPETTRO SEMPLIFICATO DA NORMATIVA PER LA CATEGORIA DI SOTTOSUOLO C

$a_{max}(T=0)$	F_o	Tc^*	h	S	Tb	Tc	Td	Cc
0.305	2.338	0.331	1.000	1.000	0.157	0.470	1.038	1.420

TAB. 33 – PARAMETRI NORMALIZZATI PER LA VERTICALE "ZONA OSPEDALE"

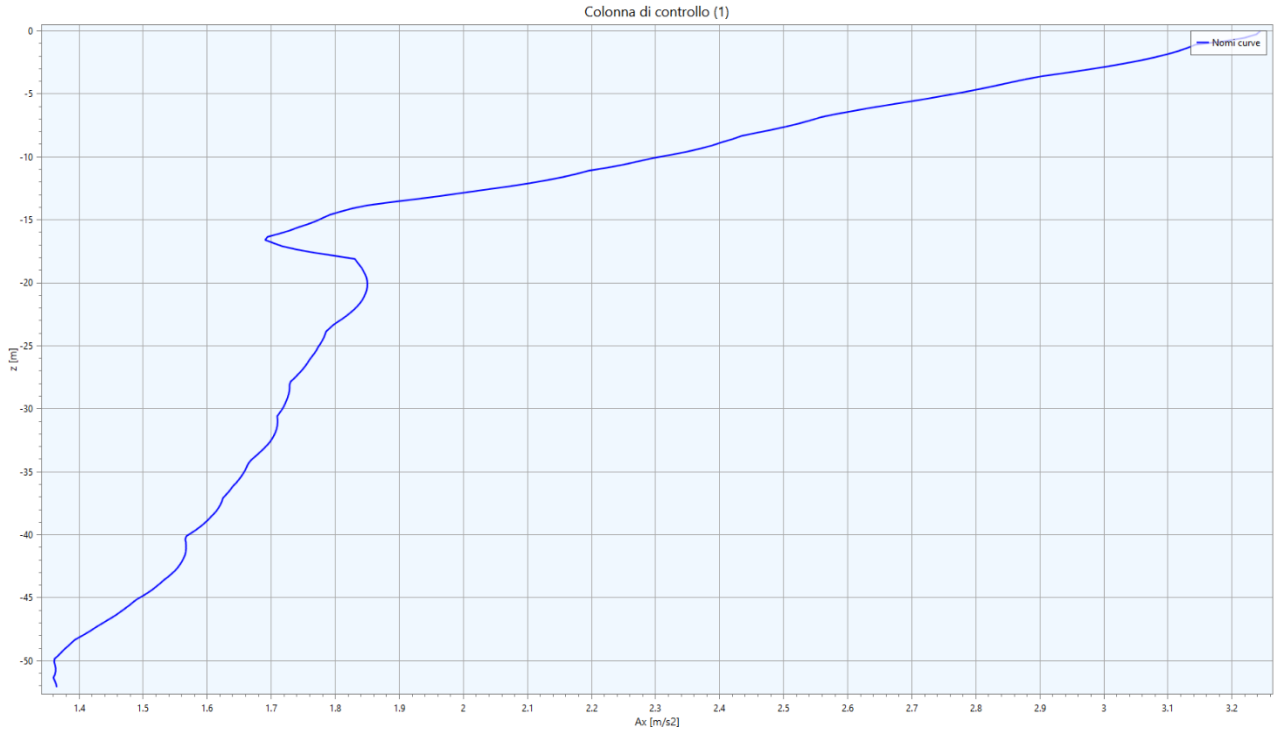


FIG. 70 – ACCELERAZIONE IN OUTPUT IN FUNZIONE DELLA PROFONDITÀ LUNGO LA VERTICALE "ZONA OSPEDALE"

Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore da abachi RER Coperture su substrato non rigido	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	1.6	1.8	-11.11%
FA (0.4-0.8 s)	2.1	1.4	50.00%
FA (0.7-1.1 s)	1.7	1.3	30.77%
FA (0.5-1.5 s)	1.7	-	-
PGA/PGA_0	1.4	2.0	-30.00%
SI/SI_0 (0.1-0.5 s)	1.4	1.7	-17.65%
SI/SI_0 (0.5-1.0 s)	1.7	1.4	21.43%
SI/SI_0 (0.5-1.5 s)	1.6	-	-

TAB. 34 - FATTORI DI AMPLIFICAZIONE CALCOLATI LUNGO LA VERTICALE "ZONA OSPEDALE"

5.6.9. RSL.9 per il sito "via Gandhi"

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kN/m³)	Vs (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Argille	0.00	-0.50	0.50	18.00	100	Vucetic & Dobry, PI=30
Argille 2	-0.50	-3.50	3.00	18.50	250	Vucetic & Dobry, PI=15

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kN/m³)	Vs (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Argille 3	-3.50	-7.50	4.00	18.50	220	Vucetic & Dobry, PI=15
Sabbie	-7.50	-25.50	18.00	20.00	330	Sand Seed & Idriss (1970)
Sabbie 2	-25.50	-60.50	35.00	20.50	440	Sand Seed & Idriss (1970)
Bedrock	-60.50	-	-	22.00	550	-

TAB. 35 – MODELLO GEOFISICO DELLA VERTICALE "VIA GANDHI"

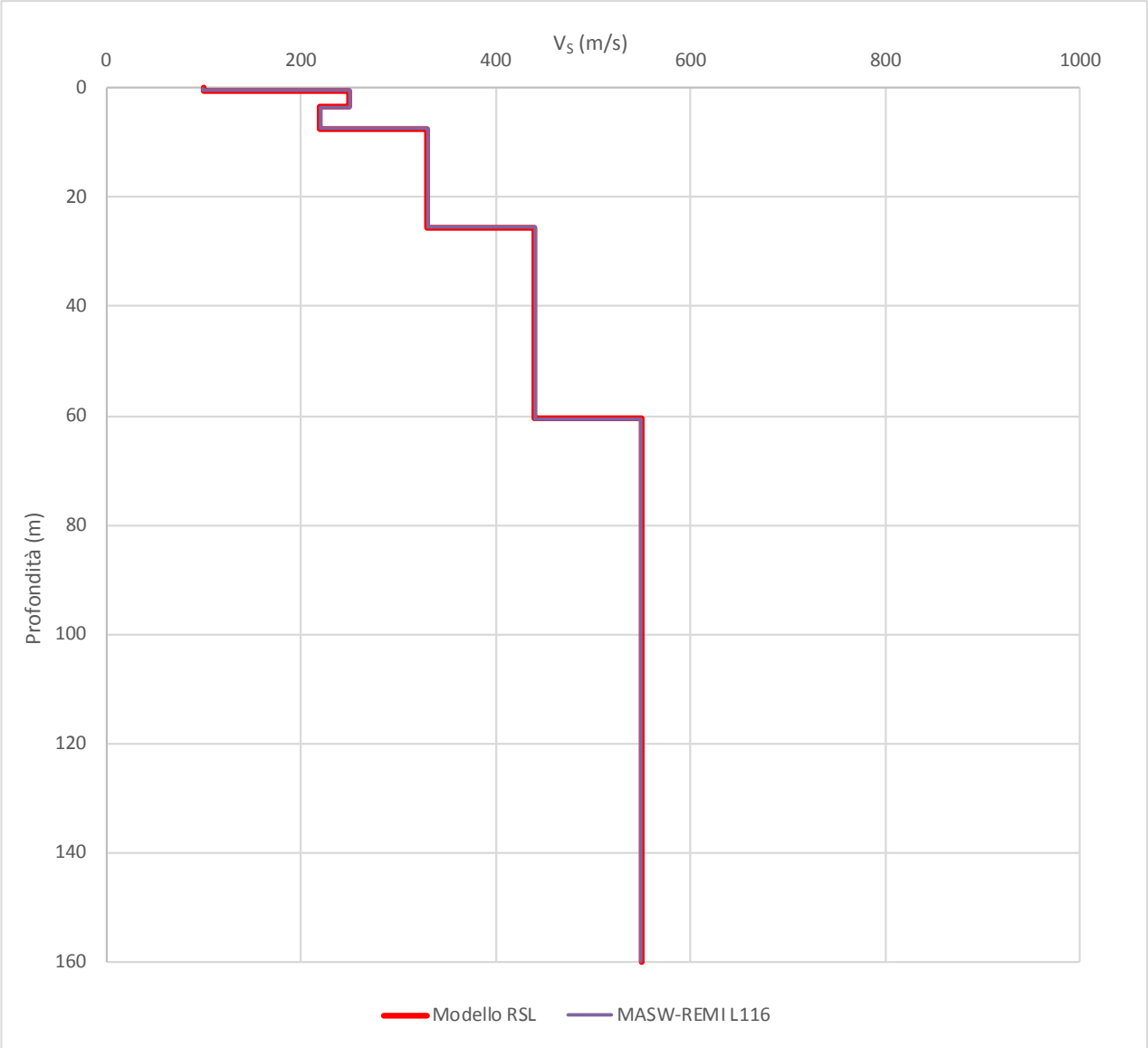


FIG. 71 – DISCRETIZZAZIONE DELLA VS LUNGO LA VERTICALE "VIA GANDHI"

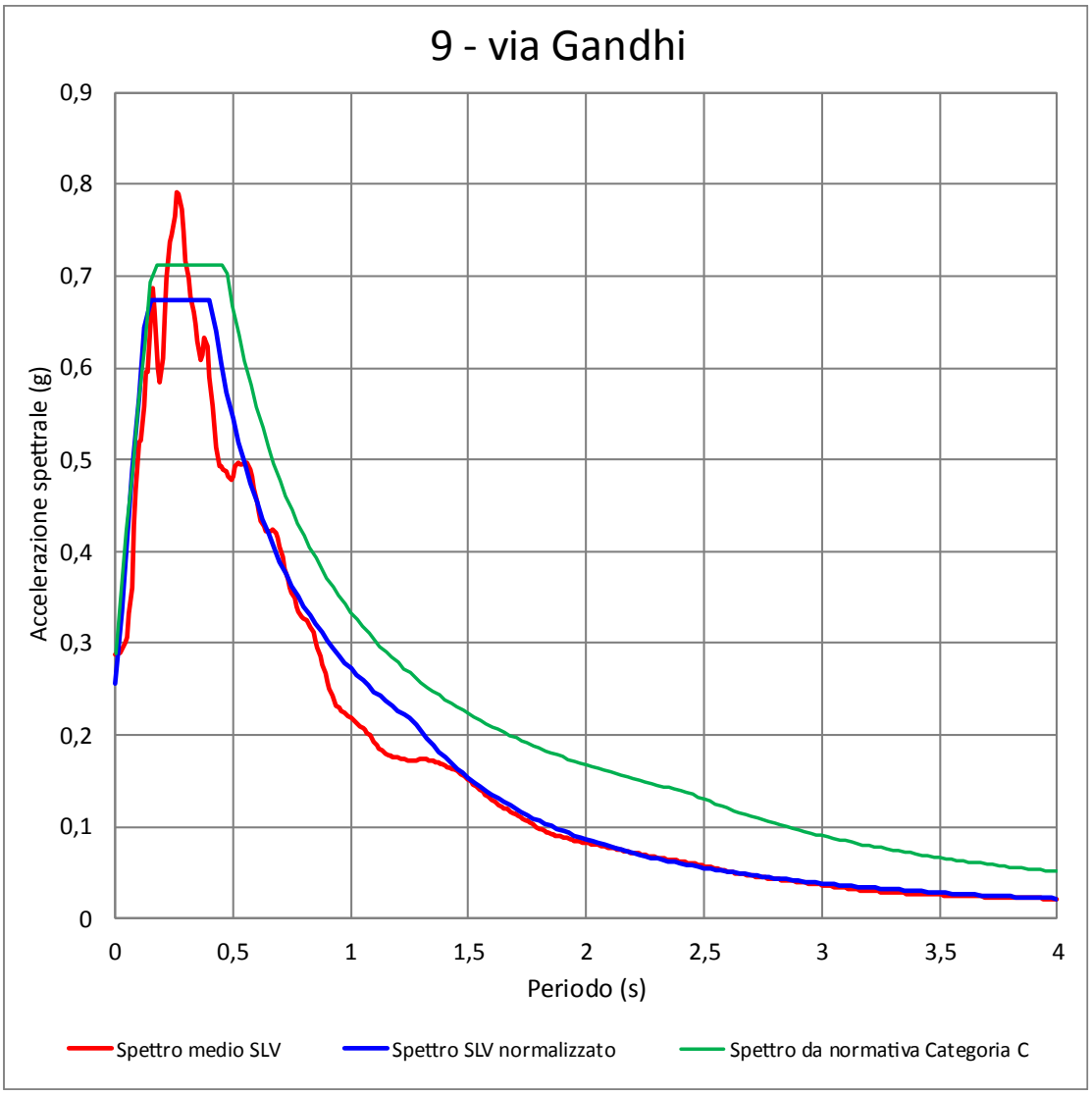


FIG. 72 - SPETTRO MEDIO DI RISPOSTA IN ACCELERAZIONE E SPETTRO MEDIO NORMALIZZATO PER LA VERTICALE "VIA GANDHI" CONFRONTATI CON LO SPETTRO SEMPLIFICATO DA NORMATIVA PER LA CATEGORIA DI SOTTOSUOLO C

a_{max} (T=0)	F_o	Tc*	h	S	Tb	Tc	Td	Cc
0.257	2.628	0.284	1.000	1.000	0.135	0.404	1.263	1.420

TAB. 36 – PARAMETRI NORMALIZZATI PER LA VERTICALE "VIA GANDHI"

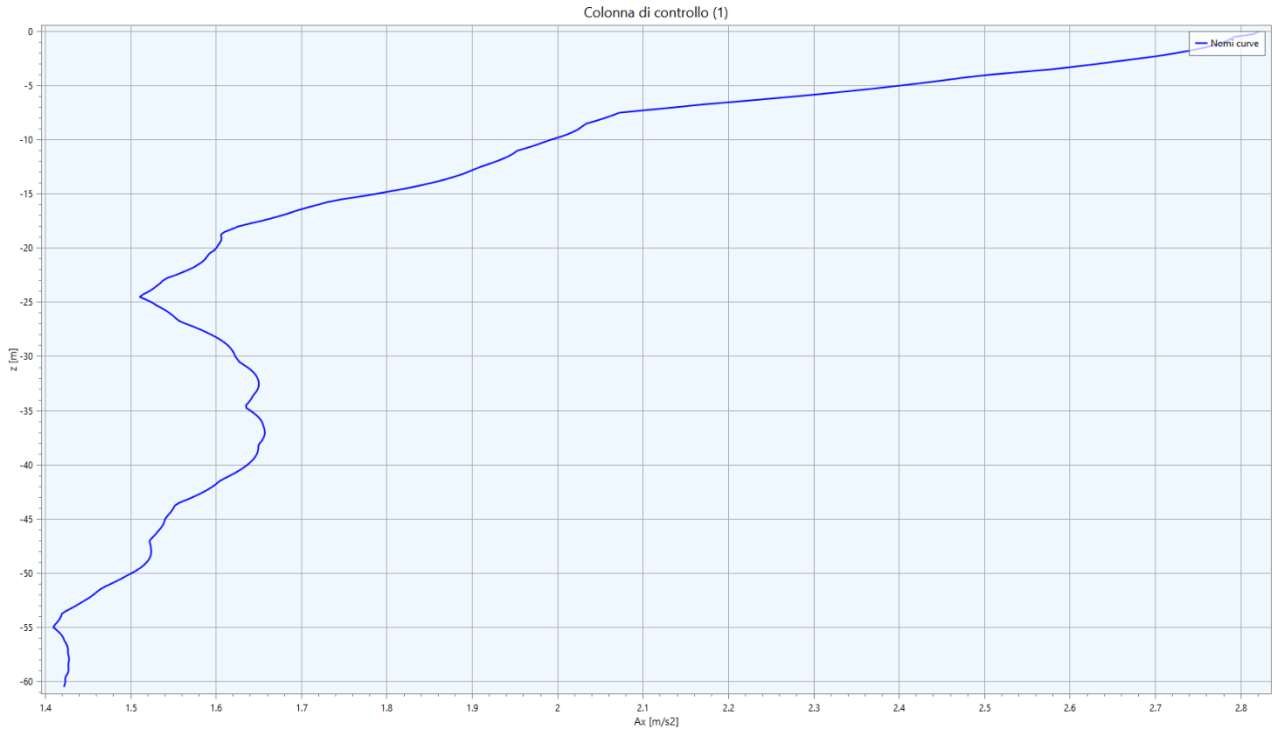


FIG. 73 – ACCELERAZIONE IN OUTPUT IN FUNZIONE DELLA PROFONDITÀ LUNGO LA VERTICALE "VIA GANDHI"

Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore da abachi RER Coperture su substrato non rigido	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	1.4	1.8	-22.22%
FA (0.4-0.8 s)	1.7	1.4	21.43%
FA (0.7-1.1 s)	1.6	1.3	23.08%
FA (0.5-1.5 s)	1.6	-	-
PGA/PGA_0	1.4	2.0	-30.00%
SI/SI_0 (0.1-0.5 s)	1.4	1.7	-17.65%
SI/SI_0 (0.5-1.0 s)	1.7	1.4	21.43%
SI/SI_0 (0.5-1.5 s)	1.6	-	-

TAB. 37 - FATTORI DI AMPLIFICAZIONE CALCOLATI LUNGO LA VERTICALE "VIA GANDHI"

5.7. Considerazioni sui risultati delle analisi di terzo livello

Nella successiva tabella vengono presentati in sintesi i raffronti percentuali tra i valori dei fattori di amplificazione calcolati con la RSL e quelli derivanti dall'applicazione degli abachi RER.

Le differenze percentuali positive (in verde) indicano valori più alti per i fattori da RSL rispetto a quelli degli abachi, mentre differenze negative (in rosso) il contrario. In sostanza le differenze percentuali negative indicano che gli abachi risultano più cautelativi della RSL.

La tabella utilizza, inoltre, l'effetto semaforo per evidenziare la maggiore o minore coerenza tra i fattori di amplificazione da RSL e quelli degli abachi.

	RSL1 Zona Nord	RSL2 Roncadella e Zona Fiera	RSL3 Villafranca	RSL4 La Selva	RSL5 Centro città	RSL6 Quattro e Carpena	RSL7 Villagrappa e San Lorenzo	RSL8 Zona Ospedale	RSL9 Via Gandhi
$FA_{SA1\ 0.1\text{-}0.5}$	-5.88%	-27.78%	-38.89%	-22.22%	-11.11%	-28.57%	-16.67%	-11.11%	-22.22%
$FA_{SA2\ 0.4\text{-}0.8}$	-14.81%	-25.93%	-44.44%	-30.43%	-13.04%	-42.31%	28.57%	50.00%	21.43%
$FA_{SA3\ 0.7\text{-}1.1}$	-28.13%	-25.00%	-50.00%	-40.74%	-22.22%	-26.09%	38.46%	30.77%	23.08%
$FA_{SA4\ 0.5\text{-}1.5}$	-29.03%	-29.03%	-64.52%	-38.46%	-19.23%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
FA_{PGA}	0.0%	-23.53%	-35.29%	-12.50%	0.0%	-25.00%	-25.00%	-30.00%	-30.00%
$FH_{SI1\ 0.1\text{-}0.5}$	-15.00%	-35.00%	-45.00%	-26.32%	-15.79%	-34.78%	-11.76%	-17.65%	-17.65%
$FH_{SI2\ 0.5\text{-}1.0}$	-23.33%	-26.67%	-53.33%	-32.00%	-20.00%	-40.00%	28.57%	21.43%	21.43%
$FH_{SI3\ 0.5\text{-}1.5}$	-36.36%	-33.33%	-51.52%	-40.74%	-25.93%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

TAB. 38 – RAFFRONTO TRA I RISULTATI DELLE ANALISI DI SECONDO E TERZO LIVELLO

L'analisi della Tab. 38 evidenzia che, in generale, gli abachi sovrastimano, di norma, lo scuotimento, in alcuni casi anche significativamente.

Gli unici casi in cui da analisi RSL sono risultati fattori di amplificazione superiori, solo per alcuni intervalli di periodo, a quelli da tabelle regionali sono a Villagrappa e San Lorenzo (RSL7), Zona Ospedale (RSL8) e in Via Gandhi (RSL9); sono tutti settori in cui le coperture sono per lo più fini con valori caratteristici di Vs bassi. Pertanto, sono aree in cui si osservano maggiori contrasti di velocità tra coperture e substrato.

5.8. Verifiche del rischio di liquefazione

Il rischio di liquefazione è stato valutato prendendo in considerazione le 24 verticali indagate nel presente studio mediante prove CPTU e SCPTU, integrate con le 20 prove (CPTU) effettuate nel precedente studio di microzonazione sismica di 2° livello (cfr. Fig. 74).

Per liquefazione s'intende un processo d'incremento della pressione del fluido interstiziale che causa, in un terreno non coesivo saturo (sabbia, limo non plastico), la diminuzione della resistenza a taglio a seguito dello scuotimento sismico, dando luogo a deformazioni permanenti significative.

La liquefazione consiste quindi in una diminuzione della resistenza del terreno, a seguito del raggiungimento della condizione di fluidità. La perdita totale della resistenza viene raggiunta quando la pressione dell'acqua che riempie gli interstizi arriva a uguagliare la pressione di confinamento, rendendo nulle le tensioni efficaci trasmesse attraverso le particelle solide. Una volta che il terremoto ha innescato il processo di liquefazione, la massa del suolo resta in movimento fino a che non raggiunge una nuova condizione di stabilità.

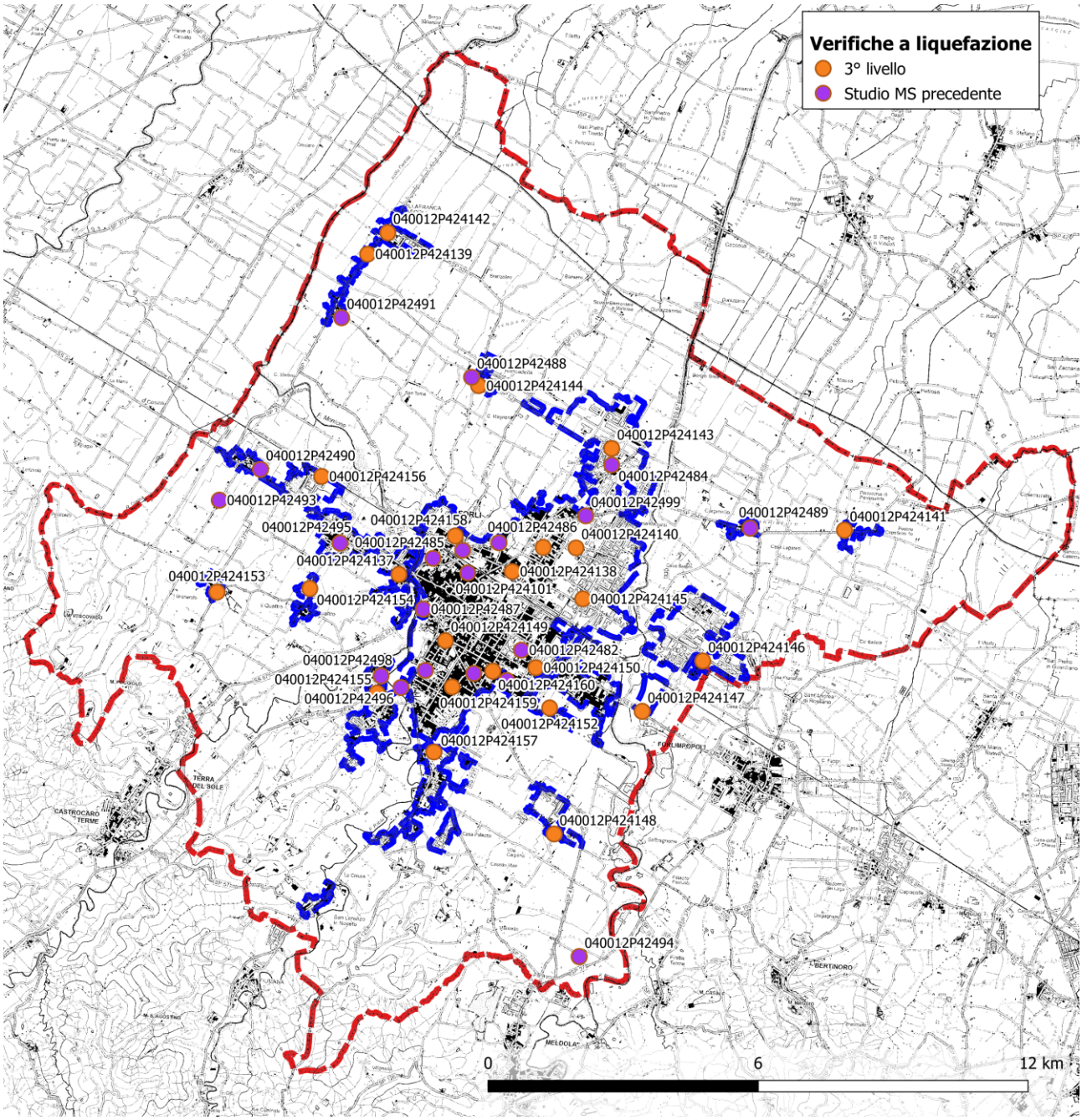


FIG. 74 – STRALCIO UBICAZIONE INDAGINI UTILIZZATE PER LE VERIFICHE A LIQUEFAZIONE

Il rischio di liquefazione può essere stimato con metodi semplificati da prove CPTU e SCPTU mediante il calcolo dell'indice del potenziale di liquefazione LPI di *Iwasaki et al.* (1982). Le prove CPTU sono preferibili alle semplici CPT per la migliore ripetibilità delle misure e per la continuità dei profili penetrometrici. L'indice LPI[15] è un parametro di sintesi che, mediante un valore numerico compreso tra 0 e 100, quantifica i possibili effetti della

[15] LPI = Liquefation Potential Index è tradotto con IL = Indice di Liquefazione nella cartografia di MS

liquefazione in superficie, tenendo conto di severità dell'azione sismica, e di profondità, spessore e valore del fattore di sicurezza degli strati liquefacibili.

Per poter valutare la severità degli effetti *Iwasaki* ha proposto la scala riportata in Tab. 39.

Valori di IL	***Rischio di liquefazione***
$I_L = 0$	Molto basso
$0 < I_L \leq 5$	Basso
$5 < I_L \leq 15$	Alto
$15 < I_L$	Molto alto

TAB. 39 – VALUTAZIONE DEL RISCHIO DI LIQUEFAZIONE SECONDO *IWASAKI*

Valutazioni più recenti riportate da *Sonmez* (2003), basate su sismi di magnitudo inferiore a quelli utilizzati da *Iwasaki* consigliano tuttavia di rimodulare le classi di pericolosità come riportato in Tab. 40.

LPI = 0.00 - Liquefaction risk null
LPI between 0.00 and 2.00 - Liquefaction risk low
LPI between 2.00 and 5.00 - Liquefaction risk moderate
LPI between 5.00 and 15.00 - Liquefaction risk high
LPI > 15.00 - Liquefaction risk very high

TAB. 40 – VALUTAZIONE DEL RISCHIO DI LIQUEFAZIONE SECONDO *SONMEZ*

L'indice LPI è calcolato con riferimento ad una verticale di prova. Gli effetti bi- e tri-dimensionali sono trascurati. Tale semplificazione può condurre talora a stime errate. In particolare, se la liquefazione in un sito è limitata a lenti isolate, la liquefazione in superficie può non manifestarsi anche per valori significativi di LPI. Viceversa, uno strato liquefatto sottile, profondo, molto diffuso ed esteso può determinare rottura del terreno e "*lateral spreading*" anche per bassi valori di LPI. La variabilità ed eterogeneità naturale delle condizioni stratigrafiche e geotecniche può spiegare la non sempre buona correlazione tra i valori dell'indice LPI e le evidenze di liquefazione.

L'indice LPI è definito nel modo seguente:

$$LPI = \int_0^{20} F\, W(LPIz)\, dz$$

Dove:

- F(z) è una variabile con valori compresi tra 0 e 1, definita ad ogni profondità $0 \leq z \leq 20_{rit}$ in funzione del valore che, a quella profondità, assume il fattore di sicurezza alla liquefazione FSL
- w(z) è un fattore di peso della profondità.

In sostanza il rischio di liquefazione tiene conto del fattore di sicurezza calcolato strato per strato, ma ne valuta la significatività su tutto lo spessore del deposito.

Il fattore di sicurezza alla liquefazione è definito nel modo seguente:

$$FSL = \frac{CRR_{7.5}}{CSR} \cdot MSF \cdot k_{\sigma}$$

dove:

$CRR_{7.5}$=Rapporto di resistenza ciclica per M=7.5 (*Ciclic Resistence Ratio*)

MSF= fattore di scala della magnitudo (*Magnitude Scale Factor*)

Kσ=Fattore di correzione per la pressione di confinamento

CSR = rapporto di tensione ciclica (*Ciclic Stress Ratio*)

Nelle verifiche effettuate nel presente studio, per il calcolo del CRR è stato utilizzato il metodo Idriss & Boulanger (2008) implementato dal programma CLIQ della *GeoLogismiki*.

In Fig. 75 viene presentata, in forma di *flow-chart*, la procedura di calcolo di CRR utilizzata dal programma per la verifica.

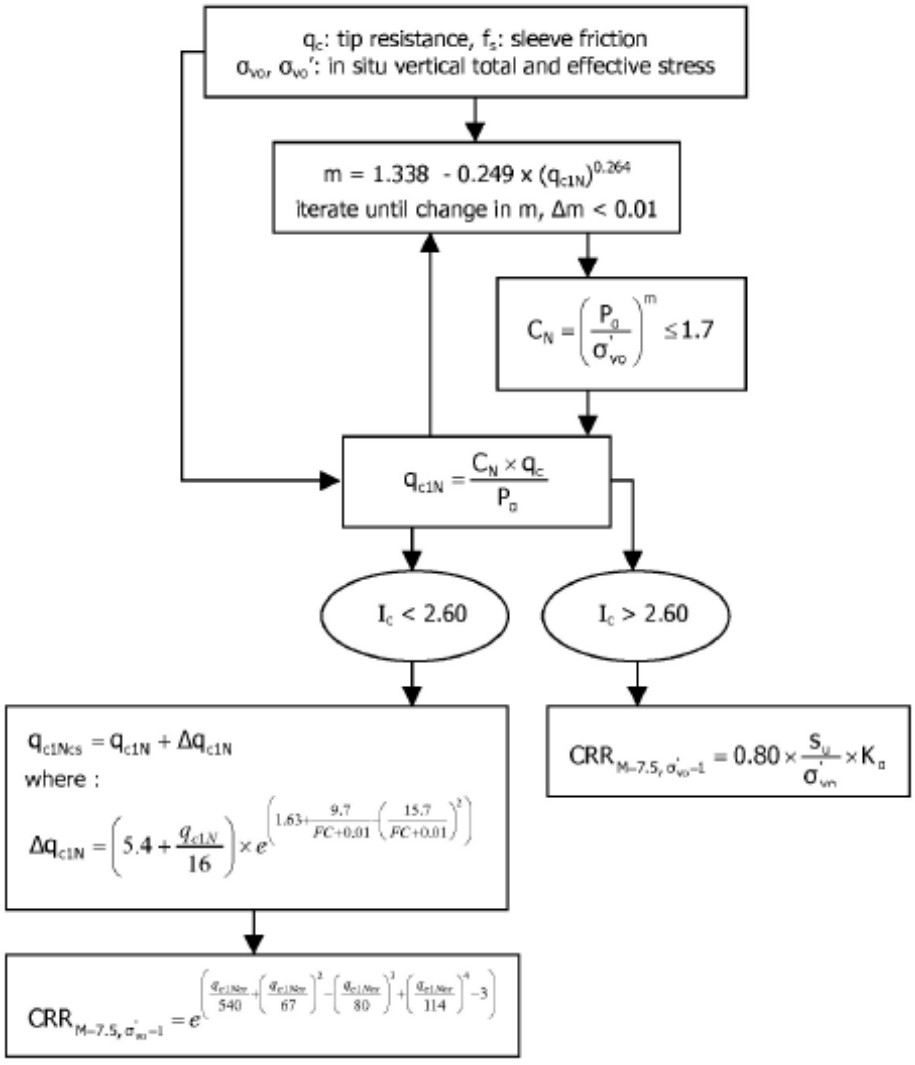


FIG. 75 - FLOW CHART DELLA PROCEDURA DI VERIFICA IDRISS & BOULANGER (2008)

Esaminando la zonazione Sismogenetica ZS9 dell'IMCS, il valore massimo delle zone di riferimento in cui è incluso il Comune di Forlì (Zone 912 e 914, cfr. Fig. 76) è pari a Mw=6.14. Si tratta di eventi sismici originati da movimenti di carattere misto seppure principalmente compressivi a NW e distensivi a SE.

Il maggior numero di terremoti che si verificano nella zona 914 presenta il proprio ipocentro a profondità comprese tra 12 e 20 km, con profondità efficace di 13 km, mentre quelli che si verificano nella zona 912 presenta il proprio ipocentro a profondità comprese tra 5 e 8 km, con profondità efficace di 7 km.

Sulla base dei meccanismi focali, per entrambe le zone, sono previsti valori "cautelativi" di massima magnitudo (Mwmax2) pari a = 6.14.

È questo, pertanto, il valore utilizzato, cautelativamente, per le verifiche a liquefazione.

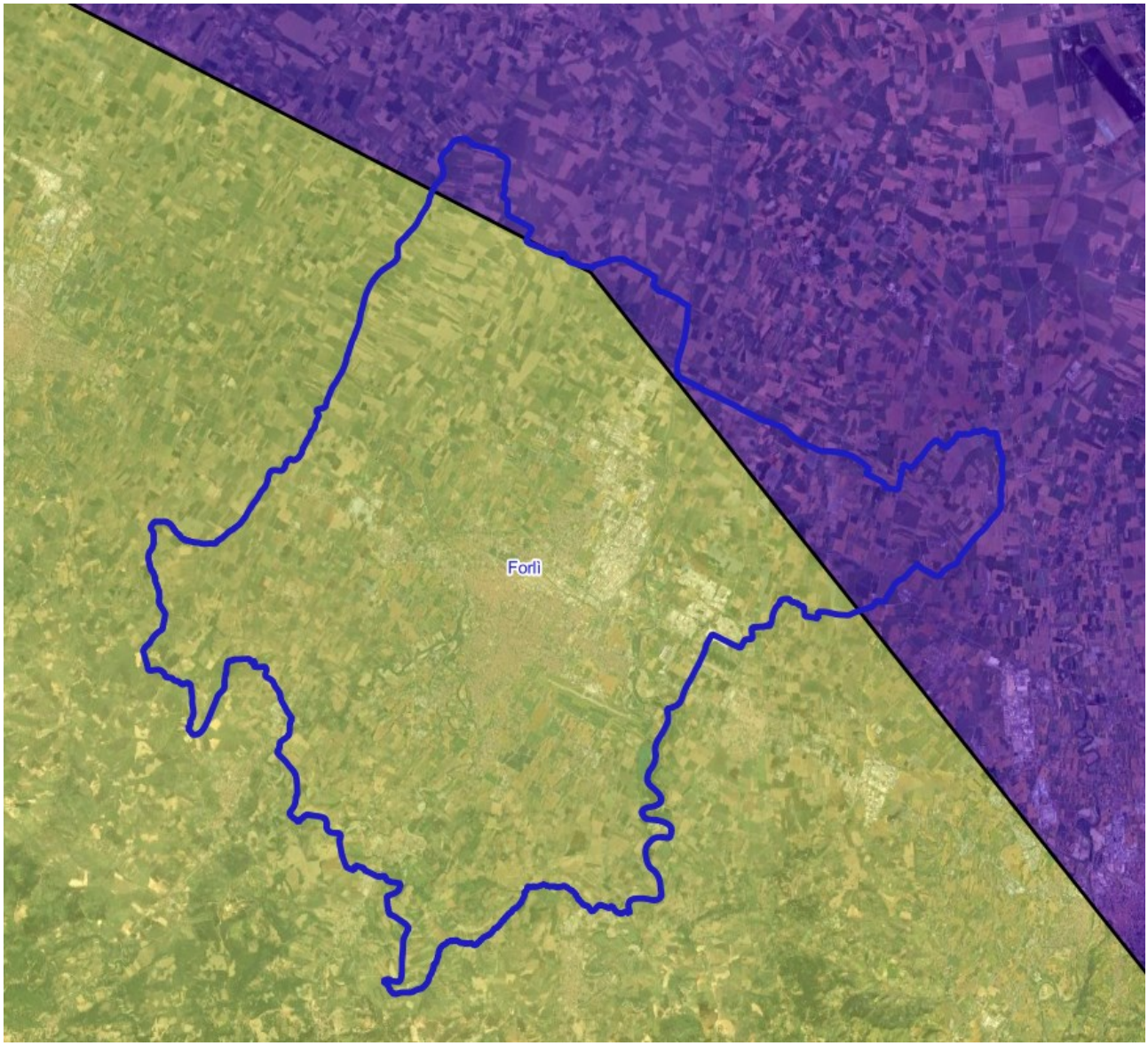


FIG. 76 – CLASSIFICAZIONE ZS9

Nelle verifiche, a titolo cautelativo, è stato impostato il livello di falda con terremoto in atto più alto di circa 1 metro rispetto a quello misurato in foro durante l'esecuzione della prova.

Infine l'accelerazione utilizzata è quella ricavata dall'analisi di risposta sismica locale più vicina alla verticale e coerente con la stratigrafia.

5.8.1. Analisi dei risultati

Per ciascuna prova è stato prodotto un report che contiene sia i grafici interpretativi della prova stessa (resistenze penetrometriche, litologia, ecc.), sia i grafici relativi alla liquefazione ed in particolare (cfr. Fig. 77):

- Il confronto tra CSR e CCR;
- La variazione del fattore di sicurezza con la profondità.

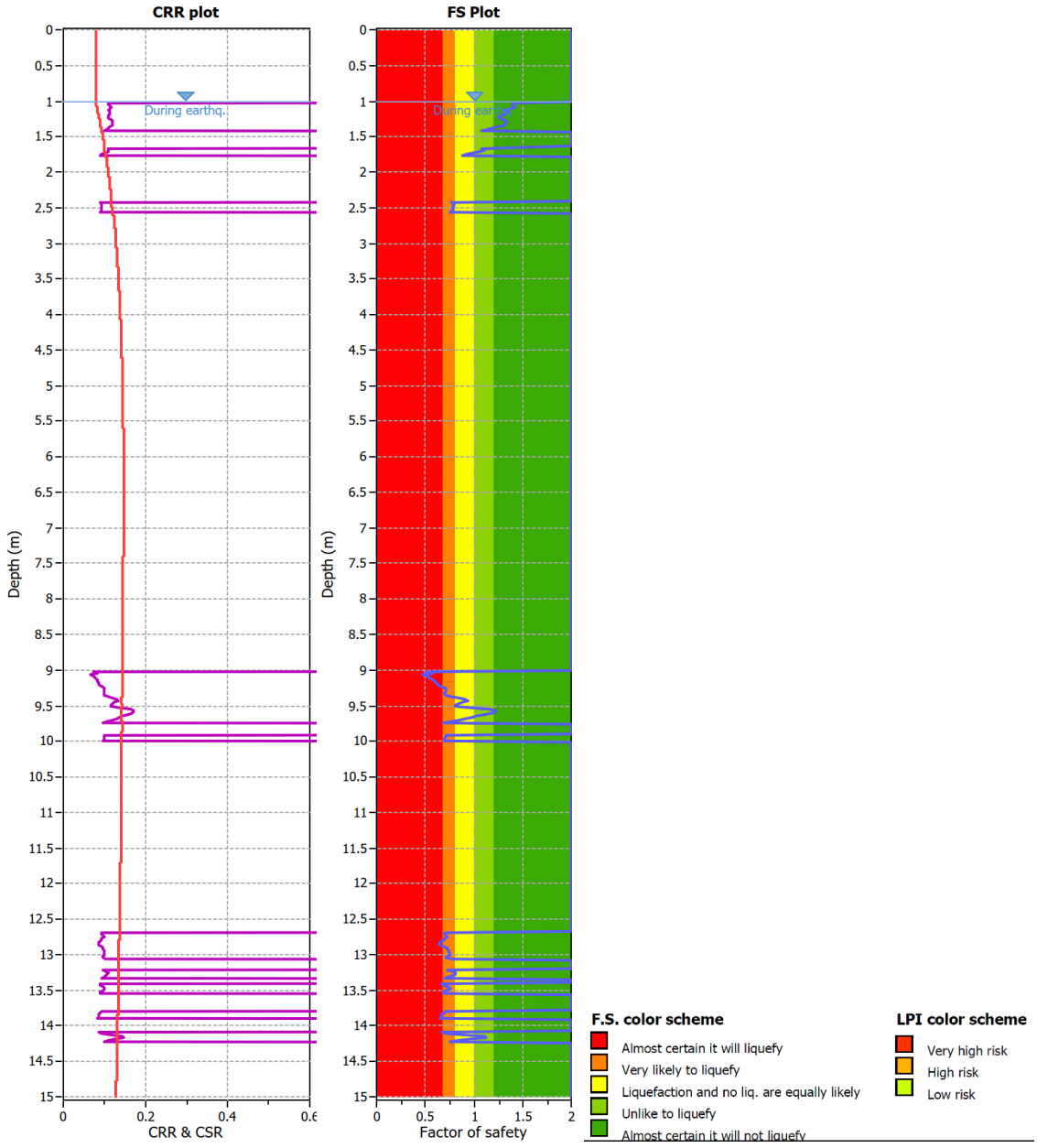


FIG. 77 - GRAFICI DI CSR-CRR E DEL FATTORE DI SICUREZZA FS VALUTATI PER LA PROVA 040012P424142 CPTU 1

Nel complesso, come era da attendersi, viste le caratteristiche litostratigrafiche del territorio, il rischio di liquefazione risulta da alto a basso in relazione alle caratteristiche deposizionali dei diversi siti indagati.

In Tab. 41 vengono rappresentati tutti i valori di LPI calcolati mediante il metodo di Idriss & Boulanger (2008).

Su un totale di n° 44 prove, solo 4 presentano un indice maggiore di 5 ricadendo all'interno della categoria "rischio di liquefazione alto", mentre 14 presentano valori compresi tra 2 e 5 e ricadono all'interno della categoria "rischio di liquefazione moderato" (classificazione secondo Sonmez, 2009).

Prova	*Codice prova*	*LPI*
CPTU1	040012P424142	2.293
CPTU1 - 2° livello	040012P42482	3.361
CPTU10	040012P424150	3.609
CPTU10 - 2° livello	040012P42491	1.153
CPTU11	040012P424151	0.236
CPTU11 - 2° livello	040012P42492	0.537
CPTU12	040012P424152	0.438
CPTU12 - 2° livello	040012P42493	0.237
CPTU13	040012P424153	4.679
CPTU13 - 2° livello	040012P42494	1.508
CPTU14	040012P424154	4.792
CPTU14 - 2° livello	040012P42495	1.761
CPTU15	040012P424155	0.048
CPTU15 - 2° livello	040012P42496	1.549
CPTU16	040012P424156	2.904
CPTU16 - 2° livello	040012P42496	5.179
CPTU17	040012P424157	6.579
CPTU17 ospedale - 2° livello	040012P42498	0.914
CPTU18	040012P424158	0.084
CPTU18 fiera - 2° livello	040012P42499	0.167
CPTU19	040012P424159	0.514
CPTU19 rotonda - 2° livello	040012P424100	0.609
CPTU2	040012P424143	3.042
CPTU2 - 2° livello	040012P42483	1.392
CPTU20	040012P424160	2.012
CPTU20 scuola - 2° livello	040012P424101	3.727
CPTU3	040012P424144	2.654
CPTU3 - 2° livello	040012P42484	0.983
CPTU4	040012P424145	0.1
CPTU4 - 2° livello	040012P42485	0.085
CPTU5	040012P424141	0
CPTU5 - 2° livello	040012P42486	0.938
CPTU6	040012P424146	4.108
CPTU6 - 2° livello	040012P42487	2.703

Prova	Codice prova	LPI
CPTU7	040012P424147	0.002
CPTU7 - 2° livello	040012P42488	3.558
CPTU8	040012P424148	5.193
CPTU8 - 2° livello	040012P42489	0.365
CPTU9	040012P424149	0.255
CPTU9 - 2° livello	040012P42490	0.681
SCPTU1	040012P424137	3.987
SCPTU2	040012P424138	0.59
SCPTU3	040012P424139	0.449
SCPTU4	040012P424140	6.455

TAB. 41 – VALORI DI LPI CALCOLATI

Dai risultati ottenuti è emerso che nella zona meridionale del territorio comunale di Forlì, di raccordo tra pianura e collina, la combinazione tra una falda profonda e depositi maggiormente ghiaiosi porta a indici bassi o nulli sul potenziale liquefacibile dei terreni. Al contrario, nel settore centro-settentrionale del comune, caratterizzato dalla frequente presenza di strati sabbiosi saturi, spessi almeno 1 metro nei primi 15 m da p.c., per lo più corrispondenti a paleoalvei, determina indici superiori con un rischio di liquefazione moderato. Fa eccezione l'estremità settentrionale del comune dove l'abbondante presenza di depositi limosi e argillosi porta ad escludere fenomeni di liquefazione.

Di conseguenza, l'evoluzione geomorfologica e la stratigrafia sono da considerare come fattori principali nella valutazione della diversa distribuzione del rischio di liquefazione al suolo.

Permane, pertanto, l'obbligo di verifica a liquefazione in fase di progettazione, come previsto dalle NTC.

6. CRITICITÀ DEL METODO

Lo studio di 3° livello è stato basato su un numero considerevole di indagini e prove che hanno consentito una buona definizione delle problematiche sul territorio.

È importante, tuttavia, precisare che i risultati in termini di amplificazione sismica riportati nei paragrafi precedenti sono riferiti ai soli modelli esposti nel par. 5.6, cioè a modelli che tengono conto della sola sismostratigrafia riscontrata nelle 9 aree in cui si disponeva di un modello geofisico sufficientemente approfondito.

Va segnalato, inoltre, che la microzonazione di terzo livello ha coperto una superficie di circa 33 Km^2, mentre la precedente microzonazione di secondo livello interessava l'intera superficie del territorio comunale per una estensione di circa 228 km^2.

Considerata la variabilità litologica della zona, soprattutto nel settore di raccordo pianura collina, gli studi effettuati non possono essere considerati esaustivi di tutti i potenziali assetti litostratimetrici e geofisici del territorio comunale di Forlì.

I risultati in termini di liquefazione, discussi nel par. 5.8, tengono anch'essi conto della stratigrafia riscontrata nel corso delle indagini e mettono in luce come il territorio del Comune di Forlì sia caratterizzato da rischio basso ad alto.

La problematica principale relativa ai metodi di analisi della risposta sismica locale utilizzati, a parte il problema ben noto dell'adozione del modello 1D, è la definizione del *bedrock* sismico.

6.1. Considerazioni sul bedrock sismico

La definizione del *bedrock* sismico, cioè del sismostrato che presenta velocità delle onde di taglio $V_S \geq 800$ m/s, costituisce un elemento di notevole importanza nell'ambito delle valutazioni di risposta sismica locale.

In letteratura (Martelli et alii[16], 2013 e Martelli et alii[17], 2014) è indicato che "*il maggiore contrasto di impedenza si ha in genere tra la base del Sintema Emiliano Romagnolo Superiore (AES), datata tra 350.000 e 450.000 anni, e la base del Subsintema AES6, datata circa 230.000-250.000 anni (RER e ENI-Agip, 1998)*".

Nello specifico, nell'area Romagnola normalmente viene collocato in corrispondenza delle formazioni di origine marina (Marcellini et al., 1998); tale scelta appare corretta per quanto riguarda la zona pedemontana mentre nelle zone in cui la copertura alluvionale è più spessa, tale assunzione diventa discutibile. Non si può infatti escludere che, per strati oltre una certa profondità, il carico litostatico abbia prodotto un grado di compattazione tale da conferire caratteristiche di rigidezza paragonabili a quelle di un *bedrock* sismico.

Oggi si tende ad individuare il *bedrock* sismico, soprattutto in pianura, in corrispondenza di un elevato contrasto di impedenza sismica, cioè laddove il rapporto tra le velocità dello strato superficiale e quello più profondo supera il valore di 2÷2.5.

In ogni caso, è bene evidenziare che il *bedrock* sismico, inteso come lo strato entro (e sotto) il quale la velocità delle onde sismiche permane superiore agli 800 m/s, risulta pressoché non individuabile nella zona studiata con i metodi diretti e, comunque, difficilmente raggiungibile anche con metodi indiretti, vista la sua elevata profondità.

Nel caso del territorio comunale di Forlì, per l'individuazione del *bedrock* sismico si è fatto affidamento ai risultati delle prove in array MASW-ReMi e HVSR eseguite appositamente per questo studio, adeguatamente correlate con le conoscenze geologiche e stratigrafiche disponibili. Inoltre, si è fatto riferimento anche alle indagini sismiche realizzate durante lo studio di Microzonazione Simica di 2° livello.

La quasi totalità delle indagini utilizzate, sia di nuova realizzazione che pregresse, evidenziano la presenza sul territorio comunale di Forlì di un substrato geologico non rigido, ossia caratterizzato da Vs < 800 m/s.

Come già visto, il Comune di Forlì è caratterizzato per una ampia parte (nord e centro) da sedimenti alluvionali fini argille e limi (AES8: Sintema Emiliano - Romagnolo superiore, Subsintema di Ravenna; AES8a: unità di Modena, Sintema Emiliano - Romagnolo superiore, Subsintema di Ravenna) con intercalazioni sabbiose. Nella zona centro-meridionale del territorio, tra 5 e 30 m di profondità, compaiono le ghiaie (AES7 e AES8). Queste costituiscono un riflettore sismico relativamente rigido, in grado di generare amplificazione per risonanza nei terreni fini sovrastanti a frequenze comprese tra 3 e 20 Hz. Di fatto si tratta del riflettore sismico più importante ai fini della Microzonazione Sismica nel territorio comunale.

In tale fascia, il *bedrock* sismico non rigido appare posizionato alla base del Sintema Emiliano-Romagnolo, ad una profondità dell'ordine dei 80÷150 m dal p.c.

Nella parte meridionale del comune, invece, il substrato geologico risulta affiorante o sub-affiorante ed è rappresentato dalle Argille Azzurre e le Sabbie di Imola. Si tratta, tuttavia, di un substrato non rigido in cui le velocità delle onde di taglio non superano valori di 600÷700 m/s.

[16] L. Martelli, L. Calabrese, G. Ercolessi, P. Severi, G. Tarabusi, D. Pileggi, S. Rosselli, L. Minarelli, F. Pergalani, M. Compagnoni, G. Vannucchi, C. Madiai, J. Facciorusso, V. Fioravante, D. Giretti, M. Mucciarelli, E. Priolo, G. Laurenzano – (2014) Cartografia speditiva dell'amplificazione e del rischio di liquefazione nelle aree epicentrali del terremoto dell'Emilia 2012 (ML=5.9). Atti del 32 convegno GNGTS 2013

[17] L. Martelli, P. Severi, G. Biavati, S. Rosselli, R. Camassi, E. Ercolani, A. Marcellini, A. Tento, D. Gerosa, D. Albarello, F. Guerrini, E. Lunedei, D. Pileggi, F. Pergalani, M. Compagnoni, V. Fioravante e D. Giretti (2014) *Analysis of the local seismic hazard for the stability tests of the main bank of the Po River (northern Italy)*, Boll. Geof. Teor. Appl., 55, 119-134

7. ELABORATI CARTOGRAFICI

7.1. Carta delle indagini

Nella Carta delle indagini, in scala 1:10.000, sono riportate le ubicazioni delle prove eseguite nell'ambito del presente lavoro (per i cui report si faccia riferimento all'Elaborato 7) e dei dati pregressi relativi a indagini geognostiche e/o sismiche raccolte presso l'Archivio comunale e inserite nel database geognostico a corredo dello studio.

Tale cartografia costituisce un aggiornamento di quella già redatta per gli studi di microzonazione di 2° livello.

Le prove sono state distinte in base alla tipologia in:

- sondaggio a carotaggio continuo
- sondaggio a distruzione di nucleo
- prova penetrometrica in foro (SPT)
- prova penetrometrica statica con punta meccanica (CPT)
- prova penetrometrica statica con punta elettrica (CPTE)
- prova penetrometrica statica con piezocono (CPTU)
- prova penetrometrica dinamica super pesante (DS)
- prova penetrometrica dinamica pesante (DP)
- prova penetrometrica dinamica leggera (DL)
- pozzo per acqua
- trincea o pozzetto esplorativo
- prova sismica in foro tipo Downhole
- prova sismica in foro tipo Crosshole
- prova penetrometrica con cono sismico
- stazione microtremore a stazione singola (HVSR)
- array sismico (ESAC\SPAC)
- MASW
- prova REfractionMIcrotremors REMI
- profilo sismico a rifrazione SR
- tomografia elettrica ERT

come raffigurato nella legenda riportata in stralcio nella seguente Fig. 78.

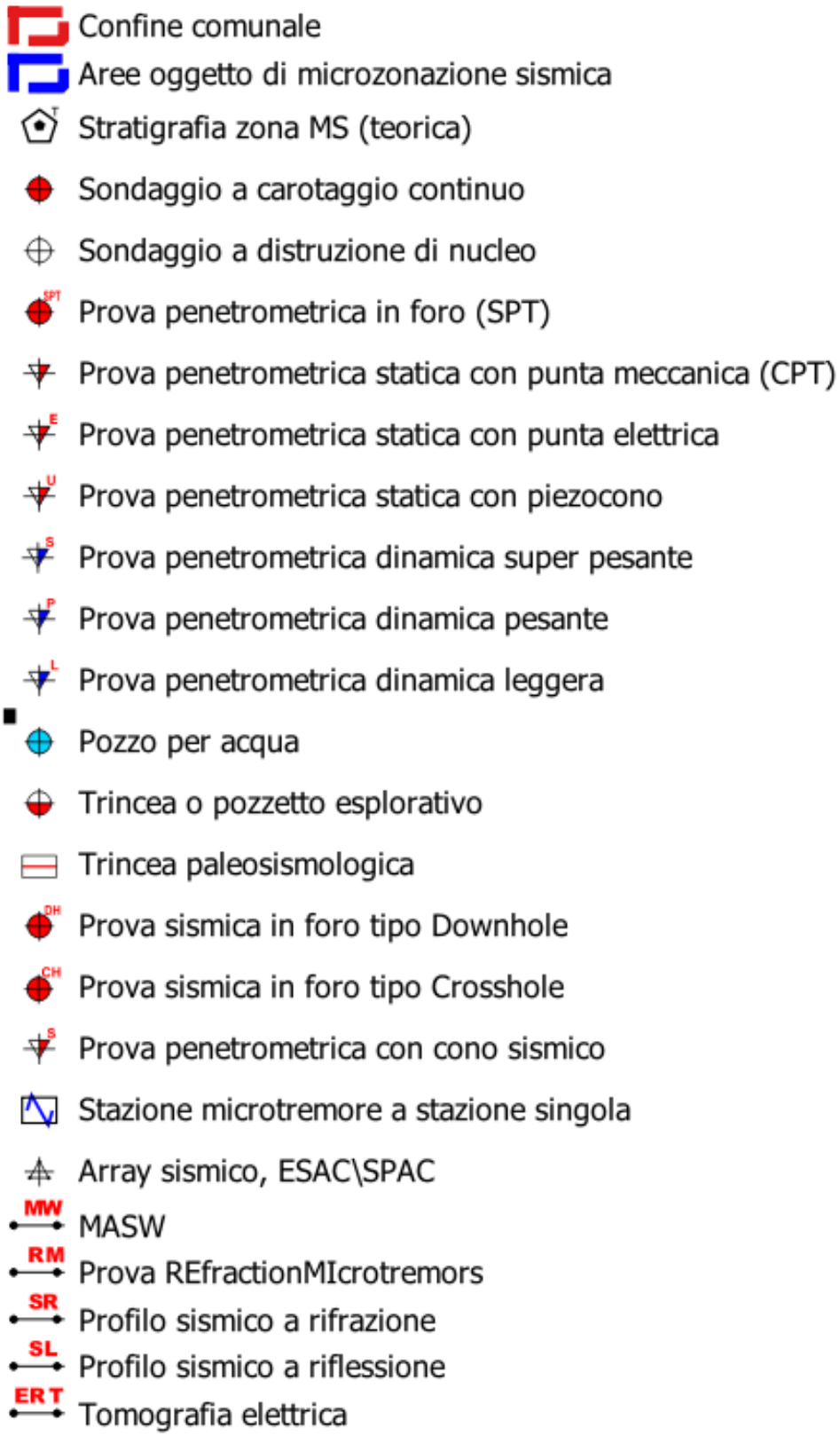


FIG. 78 – LEGENDA DELLA CARTA DELLE INDAGINI

Complessivamente, presso l'Ufficio Tecnico Comunale e dal database fornito dal Servizio Geologico Regionale, sono state acquisite le seguenti indagini:

- n. 206 sondaggi a carotaggio continuo
- n. 10 sondaggi a distruzione di nucleo
- n. 4 prove penetrometriche in foro (SPT)
- n. 370 prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT)
- n. 25 prove penetrometriche statiche con punta elettrica (CPTE)
- n. 86 prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU)
- n. 2 prove penetrometriche dinamiche super pesanti (DS)
- n. 4 prove penetrometriche dinamiche pesanti (DP)
- n. 50 prove penetrometriche dinamiche leggere (DL)
- n. 151 pozzi per acqua
- n. 7 trincee o pozzetti esplorativi
- n. 3 prove sismiche in foro tipo Downhole
- n. 3 prove sismiche in foro tipo Crosshole
- prova penetrometrica con cono sismico
- n. 227 stazioni microtremore a stazione singola (HVSR)
- n. 11 array sismico (ESAC\SPAC)
- n. 20 MASW
- n. 19 prove REfractionMIcrotremors REMI
- n. 1 profilo sismico a rifrazione SR
- n. 1 profilo sismico a riflessione SL

Ad integrazione di tali dati, è stata progettata ed eseguita una specifica campagna di indagine costituita da:

- n. 20 prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono (CPTU)
- n. 4 prove penetrometriche con piezocono sismico (SCPTU)
- n. 25 MASW-ReMi
- n. 27 stazioni di microtremore a stazione singola (HVSR)
- n. 1 sondaggio a carotaggio continuo
- n. 1 prova sismica Down-Hole
- n. 5 tomografie elettriche ERT

7.2. Carta Geologico-Tecnica per la microzonazione sismica (CGT_MS)

Nella Carta geologico-tecnica sono rappresentati gli elementi geologici e morfologici locali d'interesse per l'analisi della pericolosità sismica (in particolare quelli che possono modificare il moto sismico in superficie), quali: le tipologie delle coperture e del substrato geologico, le aree instabili e quelle potenzialmente soggette a dissesti e gli elementi tettonico-strutturali.

Nel presente studio, per la stesura della Carta geologico-tecnica, si è fatto riferimento, in particolare, alla seguente documentazione, opportunatamente verificata mediante sopralluoghi di campagna:

- Cartografia CARG Foglio 240-241 "Forlì-Cervia" alla scala 1:50.000, Servizio Geologico d'Italia;
- "Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale" della Provincia Forlì-Cesena adottato con delibera di Consiglio Provinciale n. 53971/127 del 14/07/2005 ed approvato con delibera del Consiglio Provinciale n. 68886/146 del 14/09/2006, entrato in vigore in data 11/10/2006;
- "Piano Strutturale Comunale" del Comune di Forlì, adottato con delibera di C.C. n. 121 del 27/11/2012 ed approvato con delibera di C.C. n. 112 del 24/09/2013;
- "Carta geologico-tecnica" redatta a supporto dello Studio di Microzonazione Sismica di 2° livello del Comune di Forlì.

Nella Carta Geologico-tecnica, come si osserva in Fig. 79, dovendo attenersi agli standard di rappresentazione degli SRAI, sulla base delle caratteristiche tessiturali e degli ambienti genetico-deposizionali, sono state distinte le seguenti tipologie di terreni di copertura:

- RI – Terreni contenenti resti di attività antropica;
- GM – Ghiaie limose, miscela di ghiaia, sabbia e limo;
- SM – Sabbie limose, miscela di sabbia e limo;
- ML – Limi inorganici, farina di roccia, sabbie fini limose o argillose, limi argillosi di bassa plasticità;
- CL – Argille inorganiche di medio-bassa plasticità, argille ghiaiose o sabbiose, argille limose, argille magre.

Sono stati altresì indicati gli ambienti genetico-deposizionali dei terreni di copertura distinguendo, tra quelli proposti negli standard:

- tf – terrazzo fluviale;
- es – argine/barre/canali;
- pi – piana inondabile;
- fd – falda detritica;
- ca – conoide alluvionale;
- cz – conoide di deiezione.

A parte, sono state rappresentate le aree in frana, distinte sia in base alla tipologia (scorrimento, colata, complessa e non definito) che allo stato di attività (attiva e quiescente).

In particolare, nel presente studio sono state inserite le perimetrazioni delle frane attivatesi a seguito degli eventi meteorologici di maggio 2023, rilevate sulla base di fotointerpretazione delle immagini aeree e satellitari ad alta risoluzione rese disponibili in fase post-evento, integrate localmente da rilevamenti specialistici e dati di Enti locali.

Tali dati, consultabili e scaricabili dal Geoportale della Regione Emilia-Romagna (cfr. https://geoportale.regione.emilia-romagna.it/approfondimenti/emergenza-maggio-23/emergenza-rer-maggio-2023-servizi) tengono conto delle modifiche di varie perimetrazioni, effettuate nel luglio 2024, a seguito di osservazioni di Enti territoriali o d'ufficio da parte della Regione, e adottate da parte dell'Autorità di bacino distrettuale del Fiume Po con Decreto del Segretario generale n.55/2024, pubblicato il 09/08/2024.

Quanto ai substrati geologici sono stati definiti:

ALS – Alternanza di litotipi stratificato

- FAA - Argille Azzurre

ISS – Incoerente o poco consolidato, stratificato

- IMO1 – Sabbie di Imola – membro di Monte Castellaccio

Sempre in Fig. 79, si osserva che nella Carta geologico-tecnica sono stati indicati anche:

- Elementi tettonico strutturali:
  - Faglia non attiva inversa certa
  - Faglia non attiva trascorrente/obliqua certa
  - Faglia non attiva cinematismo non definito certa

- Forme di superficie e sepolte:
  - Conoide alluvionale
  - Falda detritica
  - Orlo di terrazzo fluviale (10-20 m)
  - Asse di paleoalveo

- Elementi geologici e idrogeologici:
  - Pozzo o sondaggio che ha raggiunto il substrato geologico
  - Pozzo o sondaggio che non ha raggiunto il substrato geologico
  - Presenza della falda in aree con sabbie e/o ghiaie con indicazione della profondità (m) del tetto della falda

Infine, è stata indicata la traccia della sezione geologico-tecnica significativa e rappresentativa del modello del sottosuolo, ripresa da RER e utilizzata per l'individuazione del *bedorck* sismico (cfr. par. 5.3.2).

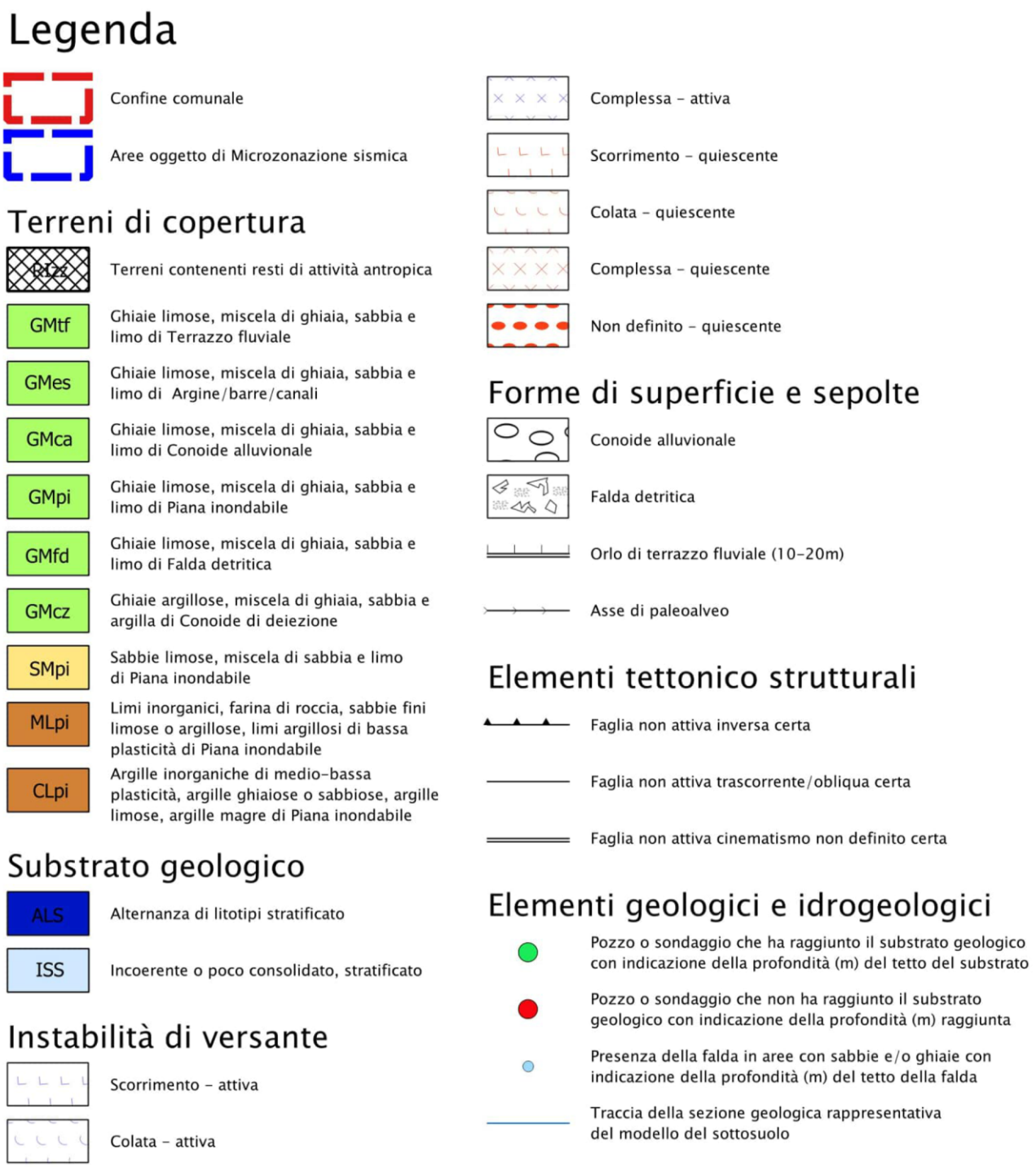


FIG. 79 – STRALCIO DA LEGENDA DELLA CARTA GEOLOGICO-TECNICA

7.3. Carta delle frequenze naturali dei terreni

Sulla base di tutti i dati tromografici disponibili, sia contenuti nell'Archivio comunale, sia di nuova acquisizione, è stata redatta la Carta delle frequenze naturali dei terreni.

In questa carta sono stati riportati tutti i punti di misura ritenuti significativi (203), con associati i risultati delle singole prove. In particolare, sono stati indicati il valore F del picco significativo, corrispondente alla frequenza di maggiore ampiezza e, quando presente, un secondo picco significativo (frequenza secondaria), meno evidente del primo (F_1).

Sono stati tralasciati i picchi con frequenze superiori ai 20 Hz, in quanto di scarso significato ai fini del presente studio.

Gli indirizzi tecnici a cui si è fatto riferimento prescrivono, per rendere graficamente più evidenti le variazioni in relazione alla posizione, di utilizzare colorazioni differenti per distinguere le prove a seconda della frequenza ottenuta, definendo le seguenti classi:

- $F \leq 0.6$
- $0.6 \text{ Hz} < F \leq 1 \text{ Hz}$
- $F \leq 1 \text{ Hz}$
- $1 \text{ Hz} < F < 2 \text{ Hz}$
- $2 \text{ Hz} < F \leq 8 \text{ Hz}$
- $F > 8 \text{ Hz}$

Inoltre, sono state utilizzate simbologie diverse a seconda che la prova sia caratterizzata, in corrispondenza della frequenza indicata, da un alto contrasto di impedenza (H/V> 3) o da più bassi contrasti di impedenza (ampiezza H/V≤3) come raffigurato nella legenda riportata in Fig. 80.

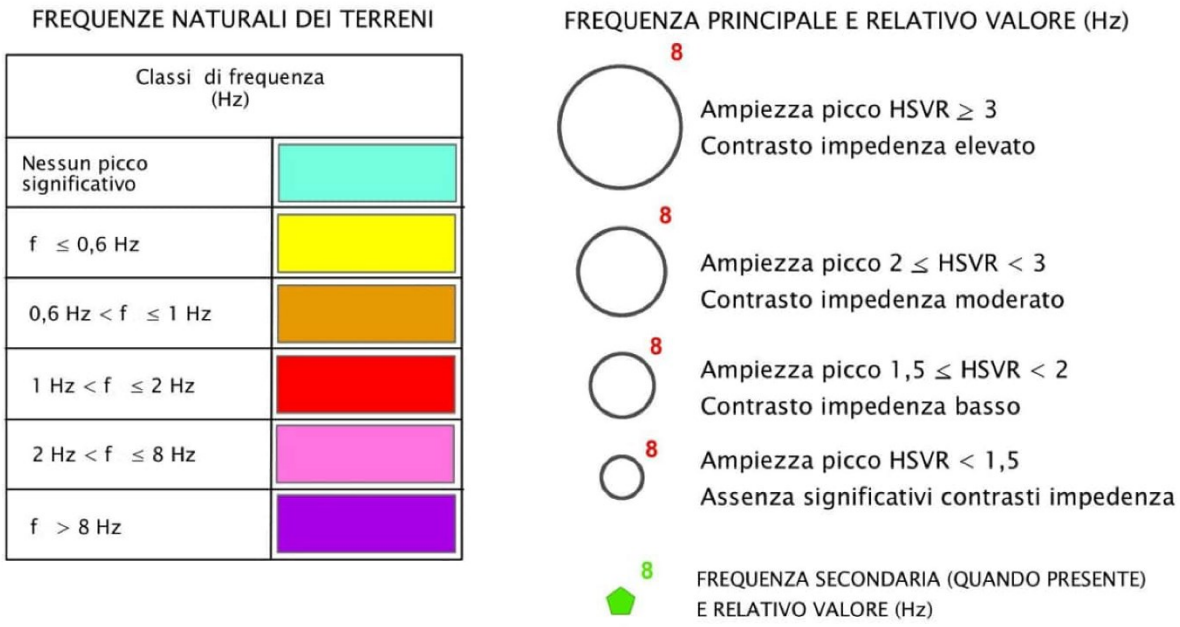


FIG. 80 – LEGENDA DELLA CARTA DELLE FREQUENZE

Di seguito, viene proposta una tabella riepilogativa dei risultati delle prove tromografiche eseguite in Comune di Forlì, specificando, per ciascuna di esse, frequenza e ampiezza dei picchi primari e secondari.

PROVA	Picco primario		Picco secondario	
	F	A	F1	A1
040012P42147	0,9	1,5		
040012P42148	1,6	1,9	6	1,4
040012P42150	1,8	2	16	1,3
040012P42152	1,4	1,9	9	1,1
040012P42154	1,25	2		
040012P42156	2,4	1,45		
040012P42158	5,66	2	1,2	1,5
040012P42159	1,3	2,1		
040012P42160	1,13	1,85		
040012P42161	5,85	2,2		
040012P42162	16,5	2,1	5,1	1,9
040012P42163	1	1,7		
040012P42166	1,25	1,95		
040012P42168	5	1,5		
040012P42170	1,3	2,7		
040012P42172	0,75	1,3		
040012P42174	1,16	2,05		
040012P42176	1,45	1,5		
040012P42177	0,9	1,8		
040012P42178	2,03	1,85		
040012P42179	1,25	3		
040012P42180	2,45	1,4		
040012P42182	0,85	1,75		
040012P42184	6,88	2,6		
040012P42185	0,94	2,85		
040012P42186	1,31	2,15		
040012P42187	1,72	2,15		
040012P42188	1,45	2,35		
040012P42189	0,75	2,1		
040012P42191	0,94	1,75		
040012P42192	1,95	2,05		
040012P42193	1	2,1		
040012P42194	0,9	2,4		
040012P42197	5,63	2,9		
040012P42199	2,3	1,6		
040012P42200	1,5	2,3		
040012P42202	7,16	1,9		
040012P42203	1,75	2,15		
040012P42204	1	3,85		
040012P42206	1,13	2,7		

PROVA	Picco primario		Picco secondario	
	F	A	F1	A1
040012P42207	1,2	2,25		
040012P42208	1,13	2,05		
040012P42209	1,3	2,05		
040012P42210	1,25	1,8		
040012P42211	0,94	3,95	4,95	2,85
040012P42212	1,35	1,3		
040012P42214	7,16	2		
040012P42215	8,04	1,7		
040012P42216	7,11	1,4		
040012P42217	4,93	1,3		
040012P42218	7,13	1,4		
040012P42220	0,25	2,45		
040012P42221	0,52	1,7		
040012P42223	5,95	1,75	8,37	1,63
040012P42227	1,7	2,4	7,8	1,25
040012P42228	19	1,4		
040012P42229	4,85	1,2	5,2	1,3
040012P42230	5,2	1,3	7	1,2
040012P42231	1,2	2,25		
040012P42232	0,95	2,2		
040012P42233	1	1,05		
040012P42234	1,07	3,1		
040012P42239	0,84	2,15		
040012P42241	1,65	1,2		
040012P42245	5,63	3,1		
040012P42246	4,08	1,45		
040012P42247	4,73	1,7		
040012P42248	0,79	1,8		
040012P42249	0,95	1,75		
040012P42250	1,1	1,35		
040012P42251	1,29	1,5		
040012P42252	1,03	2,8		
040012P42253	1,09	2,85		
040012P42254	1,06	1,55		
040012P42256	8,54	0,95		
040012P42257	0,78	2,3		
040012P42258	5,97	0,95		
040012P42259	15,44	1,45		
040012P42260	0,73	1,5		
040012P42262	0,96	2,1		
040012P42263	0,95	1,4		
040012P42264	2,6	1,7		

PROVA	Picco primario		Picco secondario	
	F	A	F1	A1
040012P42265	6,74	4,35		
040012P42267	1,22	1,55		
040012P42268	7,9	1,7		
040012P42269	1,06	1,7		
040012P42270	1,58	1,45		
040012P42271	7,12	3,85		
040012P42272	3,19	2,4		
040012P42273	0,74	1,6		
040012P42274	7,8	1,4		
040012P42275	0,98	1,9		
040012P42278	11,77	3,45		
040012P42279	1,31	1,55		
040012P42280	4,72	6,4		
040012P42281	5,67	1,8		
040012P42282	1,16	1,7		
040012P42283	1,09	2,05		
040012P42284	10,59	1,8		
040012P42285	1,08	1,95		
040012P42286	1,05	2,35		
040012P42287	1,05	3,15		
040012P42288	0,93	2,35		
040012P42289	1,81	2,1		
040012P42290	0,89	1,95		
040012P42293	1,11	3,85		
040012P42295	3,2	1		
040012P42296	2,9	1,25		
040012P42297	1	1,3		
040012P42298	1	2		
040012P42300	1,13	2,45		
040012P42302	1,1	2,5		
040012P42304	1,17	2,28		
040012P42308	1,45	2,1		
040012P42311	1	2		
040012P42312	1,3	1,8		
040012P42313	4,28	2,1	2,1	1,6
040012P42314	1,25	2,7		
040012P42318	4,74	1,4		
040012P42319	0,67	1,65		
040012P42333	1,03	3,6		
040012P42335	6,29	2,3		
040012P42336	5,95	2,4		
040012P42337	3,2	1,7		

PROVA	Picco primario		Picco secondario	
	F	A	F1	A1
040012P42338	2,85	1,65		
040012P42339	2,32	1,9		
040012P42341	6,83	2		
040012P42342	0,95	1,5		
040012P42344	0,95	1,6		
040012P42347	5,87	1,5		
040012P42352	7,16	1,9		
040012P42365	2,4	0,9		
040012P42371	1,3	1,4		
040012P42378	16,72	4,5		
040012P42380	2,9	1,5		
040012P42385	18,44	2,9		
040012P42404	0,91	1,6		
040012P42410	1,19	1,9		
040012P42411	1,72	1,8		
040012P424118	3,1	1,1		
040012P424119	1,4	1,06		
040012P42412	17,66	2,75		
040012P424120	0,68	1,3		
040012P424121	14,5	1,21		
040012P424122	1,1	2,45		
040012P424123	1,1	2,15		
040012P424124	14	2		
040012P424125	6,8	0,98		
040012P424126	3,35	2,35		
040012P424127	5,5	2,3		
040012P424128	4,3	1,4		
040012P424129	5	1,9		
040012P42413	0,16	7,2		
040012P424130	15	2,7		
040012P424131	0,95	2,55		
040012P424132	1,2	2,8		
040012P424133	0,5	8,5		
040012P424134	1,2	1,8		
040012P424135	2	1,5		
040012P424136	3,7	1,3		
040012P42414	1,03	1,7		
040012P42415	1,56	1,6		
040012P42416	0,56	1,85		
040012P424162	1,2	4,25		
040012P424163	1,3	2,5		
040012P424164	2,1	3,8		

PROVA	Picco primario		Picco secondario	
	F	A	F1	A1
040012P424165	0,95	2,5		
040012P424166	0,55	6,3		
040012P424167	1,25	3,5		
040012P424168	1,4	3,4		
040012P424169	0,55	5,5		
040012P42417	1,06	1,4		
040012P42418	0,94	1,9		
040012P42419	19,97	1,3		
040012P42420	5,5	1,9		
040012P42421	2	2		
040012P42422	19,97	2		
040012P42423	6,88	2,4		
040012P42424	3,19	1,95		
040012P42425	0,91	1,6		
040012P42426	19,97	1,9		
040012P42427	0,91	2,2		
040012P42428	0,94	2,4		
040012P42429	1,56	2,6		
040012P42436	1,16	1,85		
040012P42437	0,94	2,05		
040012P42439	0,22	1,8		
040012P42441	5,81	2		
040012P42444	19,97	4		
040012P42445	1,09	1,8		
040012P42446	19,97	2,1		
040012P42447	0,84	2,75		
040012P42448	0,94	2,7		
040012P42449	11,66	2,5		
040012P42451	1,1	3,9		
040012P42456	1,2	2,2		
040012P42459	1,8	1,9		
040012P42463	15,13	3,3		
040012P42467	1,1	2,05		
040012P42470	1	2,2		
040012P42472	1,25	2,3		
040012P42478	0,91	2,2		
040012P42481	1,35	2,1		

TAB. 42 – RIEPILOGO DEI RISULTATI DELLE PROVE TROMOGRAFICHE IN COMUNE DI FORLÌ

7.4. Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS)

La Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS), rappresenta il documento fondamentale del primo livello di approfondimento.

In questa cartografia, alla scala 1:10.000, l'intero territorio comunale viene distinto a seconda dell'appartenenza a una delle seguenti 3 categorie:

1. **Zone stabili.** Si tratta di zone con affioramento di un substrato rigido e morfologia pianeggiante o poco acclive, nelle quali non si ipotizzano effetti locali di alcuna natura e in cui non sono richiesti ulteriori approfondimenti.
2. **Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali.** Si tratta di aree in cui sono attese amplificazioni del moto sismico, causate dall'assetto litostratigrafico e/o morfologico locale.
3. **Zone di attenzione per instabilità.** Si tratta di zone nelle quali effetti sismici attesi e predominanti, oltre i fenomeni di amplificazione, sono riconducibili a deformazioni permanenti del territorio, quali instabilità di versante (frane attive e quiescenti), liquefazioni e densificazione.

Dalla lettura della Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica si osserva che, in Comune di Forlì, non è mai presente la categoria 1 – zone stabili, mentre si riscontrano differenti zone stabili suscettibili di amplificazioni locali e zone "di attenzione per instabilità".

7.4.1. Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

Zona 2001 (cfr. Fig. 81) – Successione stratigrafica costituita da substrato non rigido (Vs<800 m/s) di tipo ALS, ricoperto da una coltre di depositi eluvio-colluviali di spessore medio inferiore a 3 m.

Zona 2002 (cfr. Fig. 81) – Successione stratigrafica costituita da substrato non rigido (Vs<800 m/s) di tipo ISS, ricoperto da una coltre di depositi eluvio-colluviali di spessore medio inferiore a 3 m.

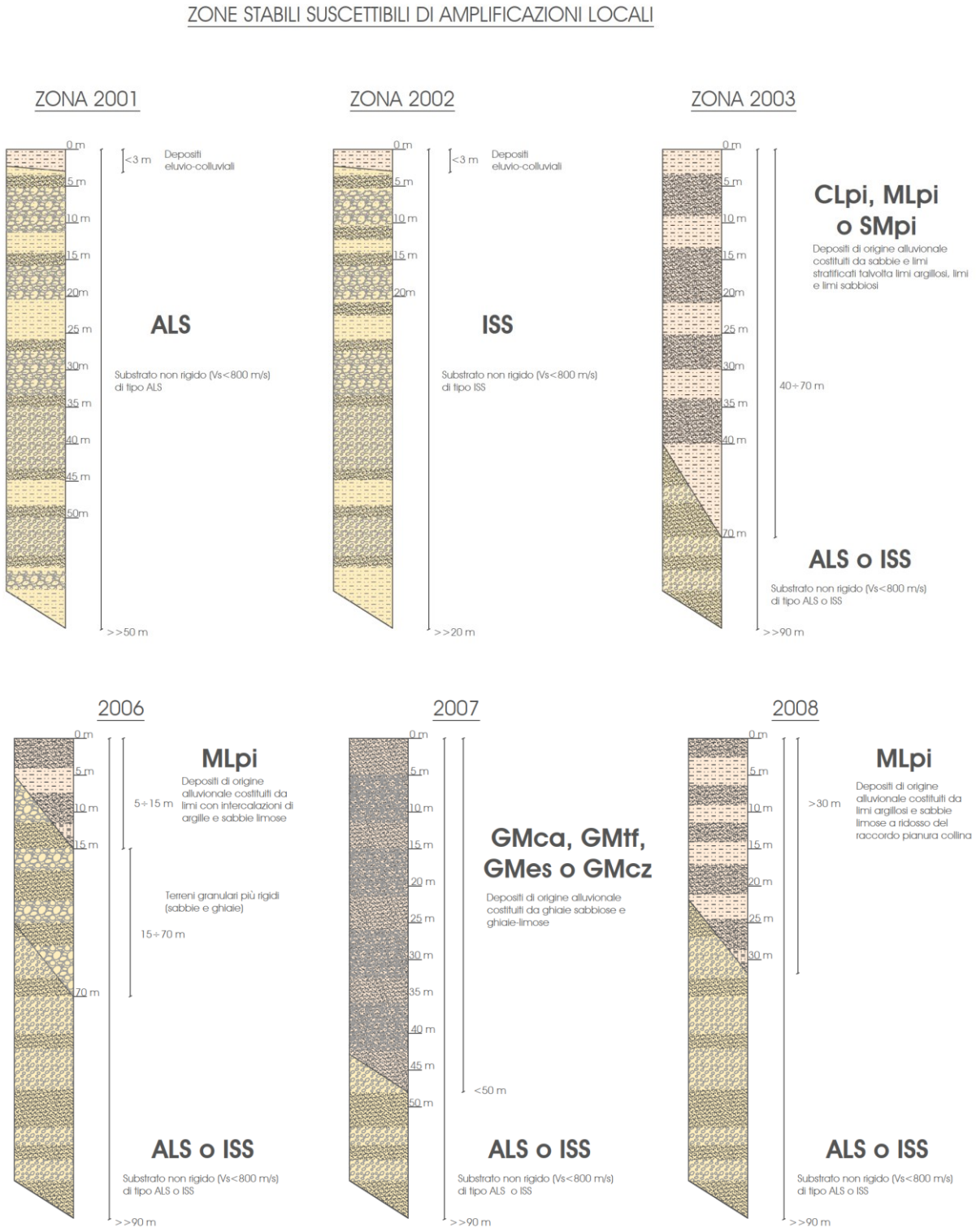
Zona 2003 (cfr. Fig. 81) – Successione stratigrafica costituita da una copertura di depositi di origine alluvionale, costituiti da sabbie e limi stratificati e talvolta limi argillosi, limi e limi sabbiosi, di spessore medio compreso tra 40 e 70 m, sotto la quale si rinviene un substrato geologico di tipo ALS o ISS.

Zona 2006 (cfr. Fig. 81) – Successione stratigrafica costituita da una copertura di depositi di origine alluvionale, costituiti da limi con intercalazioni di argille e sabbie limose, di spessore medio compreso tra 5 e 15 m, sovrastanti terreni granulari più rigidi, sotto i quali si rinviene un substrato geologico di tipo ALS o ISS.

Zona 2007 (cfr. Fig. 81) – Successione stratigrafica costituita da una copertura di depositi di origine alluvionale, costituiti da ghiaie sabbiose e ghiaie-limose, di spessore medio variabile generalmente inferiore a 50 m, sotto la quale si rinviene un substrato geologico di tipo ALS o ISS.

Zona 2008 (cfr. Fig. 81) – Successione stratigrafica costituita da una copertura di depositi di origine alluvionale, costituiti da limi argillosi e sabbie limose che si trovano a ridosso del raccordo pianura collina, di spessore medio variabile da pochi metri a maggiori di 30 m, sotto la quale si rinvengono i terreni più rigidi della zona 2007 o un substrato geologico di tipo ALS o ISS.

Zona 2009 (cfr. Fig. 81) – Successione stratigrafica costituita da una copertura di terreni contenenti resti di attività antropica derivante da riempimento di ex-cave, sotto la quale si rinvengono i diversi litotipi presenti nel territorio.



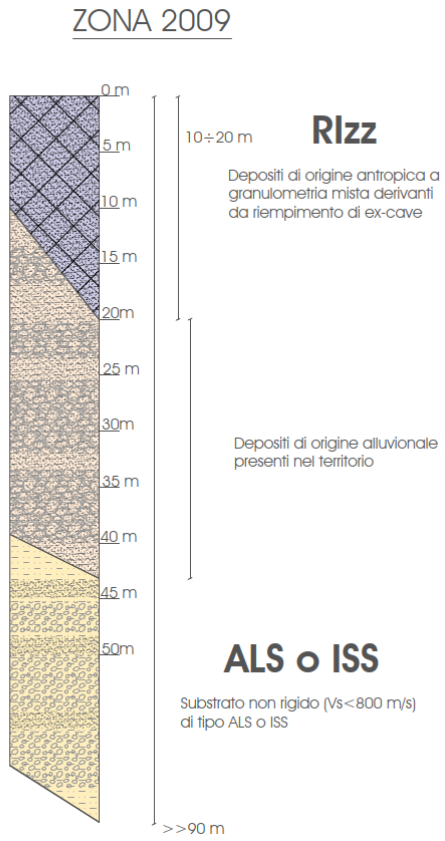


FIG. 81 – COLONNINE LITOSTRATIGRAFICHE SINTETICHE, RAPPRESENTATIVE DELLE MICROZONE SUSCETTIBILI DI AMPLIFICAZIONI LOCALI

7.4.2. Zone di attenzione per instabilità

Trattasi di zone di attenzione per instabilità di liquefazioni, così descritte:

Zona 2004 – ZA_{LQ} (cfr. Fig. 82Fig. 81) – Successione stratigrafica costituita da una copertura di depositi di origine alluvionale, costituiti dall'alternanza di numerosi livelli sabbiosi e livelli limosi, di spessore medio compreso tra 45 e 60 m. Il substrato geologico è di tipo ALS o ISS.

Zona 2005 – ZA_{LQ} (cfr. Fig. 82Fig. 81) – Successione stratigrafica costituita da una copertura di depositi di origine alluvionale, costituiti da sabbie e limi di spessore medio > 30 m. Il substrato geologico è di tipo ALS o ISS.

e della seguente una zona di attenzione per instabilità di versante:

Zona 2010 – ZA_{FR} (cfr. Fig. 82Fig. 81) – Successione stratigrafica costituita da una copertura di depositi di frana, di spessore non definibile, sotto la quale si rinviene un substrato non rigido (Vs<800 m/s) è di tipo ALS o ISS.

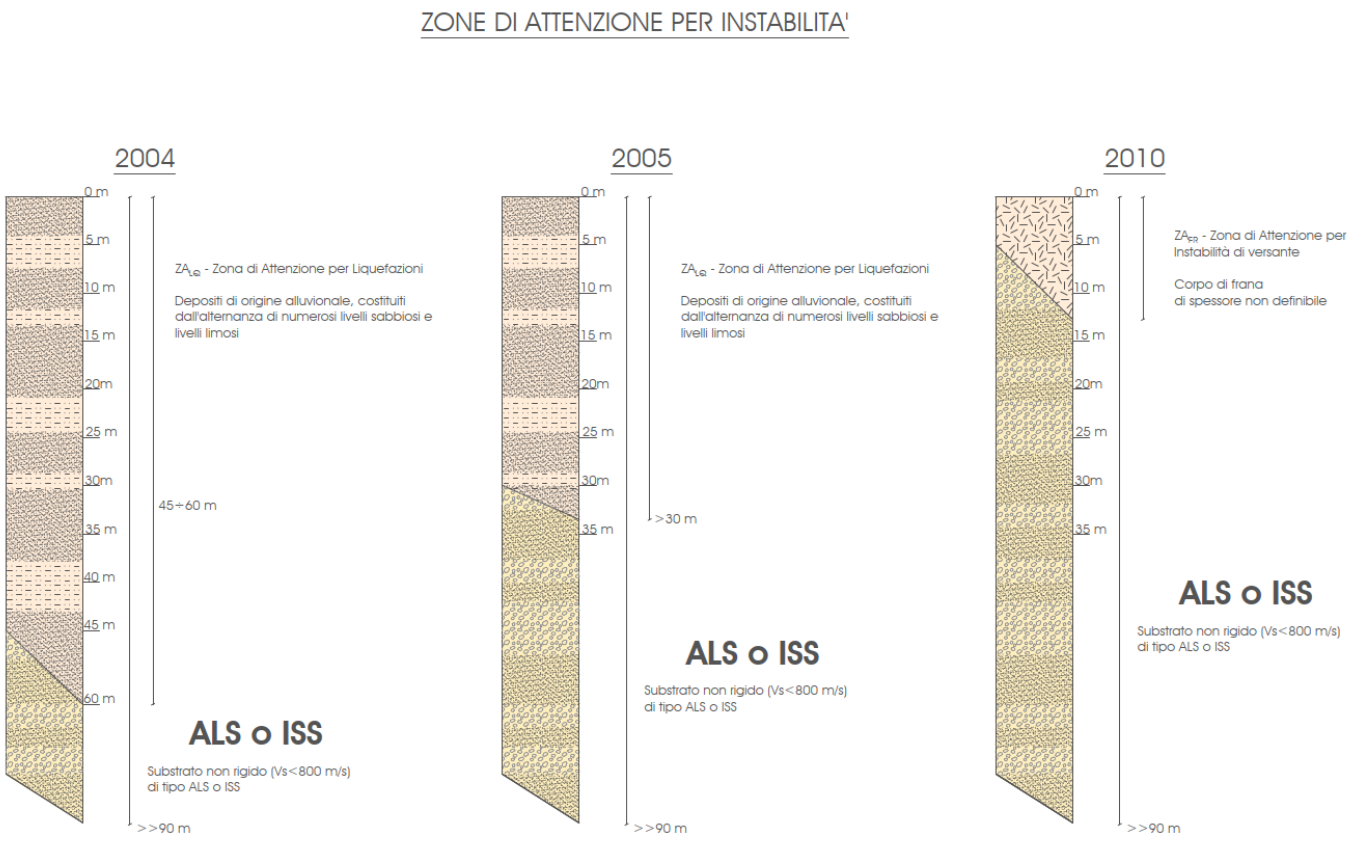


FIG. 82 - COLONNINE LITOSTRATIGRAFICHE SINTETICHE, RAPPRESENTATIVE DELLE ZONE DI ATTENZIONE PER INSTABILITÀ

7.5. Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs)

In ottemperanza ai riferimenti tecnici citati nelle premesse, è stata redatta una Carta delle velocità delle onde di taglio S (VS) riferita a tutte le aree oggetto di studio, alla scala 1:10.000.

In tale elaborato sono ubicati i punti di misura, distinguendoli a seconda della tipologia di prova effettuata (stazione microtremore a stazione singola HVSR, array sismico ESAC/SPAC, prova sismica in foro tipo Downhole, prova sismica in foro tipo Crosshole, prova penetrometrica con cono sismico, MASW, ReMi e prova tromografica) e indicando il corrispondente valore di Vs_H (in m/s), dove:

$$Vs_H = \frac{H}{\sum \frac{h_i}{Vs_i}}$$

H = spessore totale (in metri) dei terreni di copertura o profondità del *bedrock*
h_i = spessore (in metri) dello strato i-esimo (fino al *bedrock*)
Vs_i = velocità (in m/s) dello strato i-esimo (fino al *bedrock*);

o di Vs_{30} (sempre in m/s), dove:

$$Vs_{30} = \frac{30}{\sum \frac{h_i}{Vs_i}}$$

h_i = spessore (in metri) dello strato i-esimo (fino alla profondità di 30 m);
Vs_i = velocità (in m/s) dello strato i-esimo (fino alla profondità di 30 m).

In carta si osserva come sia stata utilizzata sempre la Vs30 in tutte le zone individuate nella Carta delle MOPS, ad eccezione di sole 5 misure per le quali si è fatto riferimento alla VsH.

7.6. Carta di microzonazione sismica

Nelle Carte di microzonazione sismica di Livello 3, in scala 1: 10.000, il territorio è suddiviso sulla base dei seguenti parametri rappresentativi dello scuotimento sismico, calcolati per un tempo di ritorno TR=475 anni, con smorzamento ζ=5% (cfr. capitolo 5):

- FA_{PGA} = PGA/PGA_0, dove PGA_0 è l'accelerazione massima orizzontale a periodo T=0 al suolo di riferimento e PGA e l'accelerazione massima orizzontale a periodo T=0 alla superficie del sito;
- FA_{SA} = SA/SA_0, dove SA_0 è l'integrale dello spettro di risposta in accelerazione al suolo di riferimento e SA è l'integrale dello spettro di risposta in accelerazione alla superficie del sito per prefissati intervalli di periodi T:
  - SA1 per 0.1s≤T≤0.5s,
  - SA2 per 0.4s≤T≤0.8s,
  - SA3 per 0.7s≤T≤1.1s,
  - SA4 per 0.5s≤T≤1.5s,
- FH_{SI} = SI/SI_0, dove SI_0 è l'integrale dello spettro di risposta in velocità (Intensità di Housner) al suolo di riferimento e SI l'integrale dello spettro di risposta in velocita (o corrispondente grandezza di Intensità di Housner) alla superficie del sito per prefissati intervalli di periodi T:
  - SI1 per 0.1s≤T≤0.5s,
  - SI2 per 0.5s≤T≤1.0s,
  - SI3 per 0.5s≤T≤1.5s.

In Fig. 83 è riportata la legenda utilizzata per accorpare i parametri di amplificazione per le Carte di microzonazione sismica, così come indicato negli standard di rappresentazione SRAI.

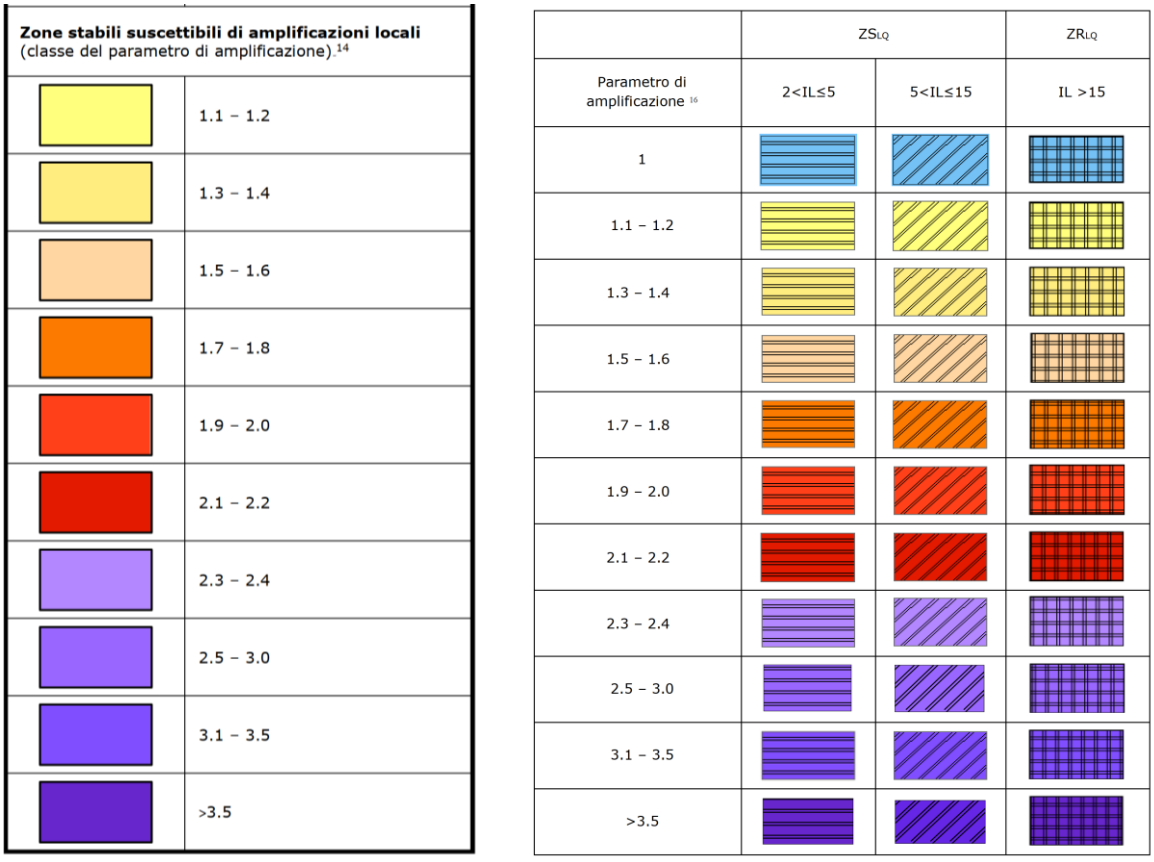


FIG. 83 – LEGENDA ADOTTATA PER L'ACCORPAMENTO DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE NELLE ZONE STABILI SUSCETTIBILI DI AMPLIFICAZIONI LOCALI E NELLE ZONE DI ATTENZIONE PER LIQUEFAZIONE

Inoltre, all'interno delle Carte di microzonazione sono stati inseriti i risultati delle prove di verifica alla liquefazione secondo la legenda di Fig. 84, descritte nel cap. 5.8, e facenti parte dell'Elaborato 8.

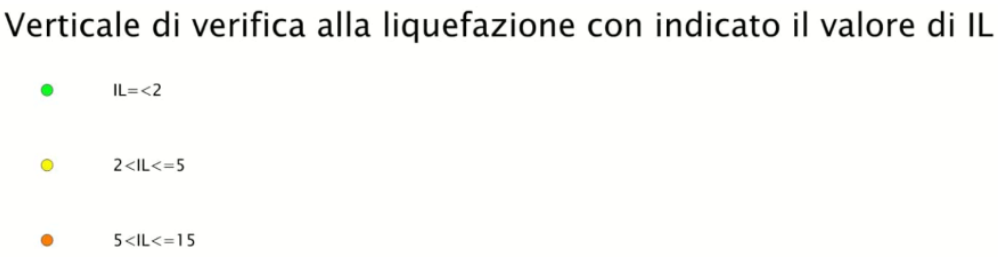


FIG. 84 – LEGENDA ADOTTATA PER LA VISUALIZZAZIONE DELLA VERIFICA ALLA LIQUEFAZIONE

7.7. Carta dello scuotimento atteso

Quali ultimi elaborati grafici, come prescritto dalla DGR 630/2019, sono state redatte delle carte della distribuzione sul territorio dei valori di H_{SM}, parametro che esprime lo scuotimento atteso al sito in valore assoluto (accelerazione in cm/s^2).

Tale parametro è definito come il prodotto dell'*Acceleration Spectrum Intensity* (ASI_{UHS}), valore integrale dello spettro di riferimento in accelerazione, calcolato per un determinato intervallo di periodi, diviso per ΔT e moltiplicato per il fattore di amplificazione in accelerazione (FA) calcolato per lo stesso intervallo di periodi:

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

Gli intervalli di periodi considerati sono:

- 0.1s≤T≤0.5s (cfr. Carta di microzonazione sismica - H_{SM})
- 0.4s≤T≤0.8s (cfr. Carta di microzonazione sismica - H_{SM} 0.4-0.8 s)
- 0.7s≤T≤1.1s (cfr. Carta di microzonazione sismica - H_{SM} 0.7-1.1 s)
- 0.5s≤T≤1.5s (cfr. Carta di microzonazione sismica - H_{SM} 0.5-1.5 s)

I valori di $ASI_{UHS}/\Delta T$, per 0.1s≤T≤0.5s, per i punti della griglia INGV, per un tempo di ritorno TR uguale a 475 anni (corrispondente a una probabilità di superamento del 10% in 50 anni), sono forniti dal file *all_4_coord.kmz, nella cartella Allegato_4.zip,* disponibile nella pagina web dedicata agli indirizzi per gli studi di microzonazione sismica a cura del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna.

Per gli altri intervalli di periodo sono, invece, stati calcolati, sempre per TR=475 anni, dallo spettro su suolo A utilizzando i dati di accelerazione spettrale (Se(T)) forniti da INGV[18] nell'ambito degli studi per la redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274.

In particolare, considerato che i dati di accelerazione spettrale vengono forniti per periodi di 0.10, 0.15, 0.30, 0.40, 0.50, 0.75, 1.50, 2.00 secondi, per valutare i valori di ASI negli intervalli di periodo sopra citati è stato necessario procedere a interpolazioni, per ottenere i valori a 0.7, 0.8 e 1.1 secondi.

Una volta calcolati, i valori di H_{SM} sono stati riportati nelle varie carte di scuotimento atteso, grazie a un'etichetta riferita a ciascun poligono esaminato; mentre il colore indica l'appartenenza dello stesso a una delle classi con intervallo pari a 100 definite dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna.

[18] Montaldo V., Meletti C., 2007. Valutazione del valore della ordinata spettrale a 1sec e ad altri periodi di interesse ingegneristico. Progetto DPC-INGV S1, Deliverable D3, http://esse1.mi.ingv.it/d3.html

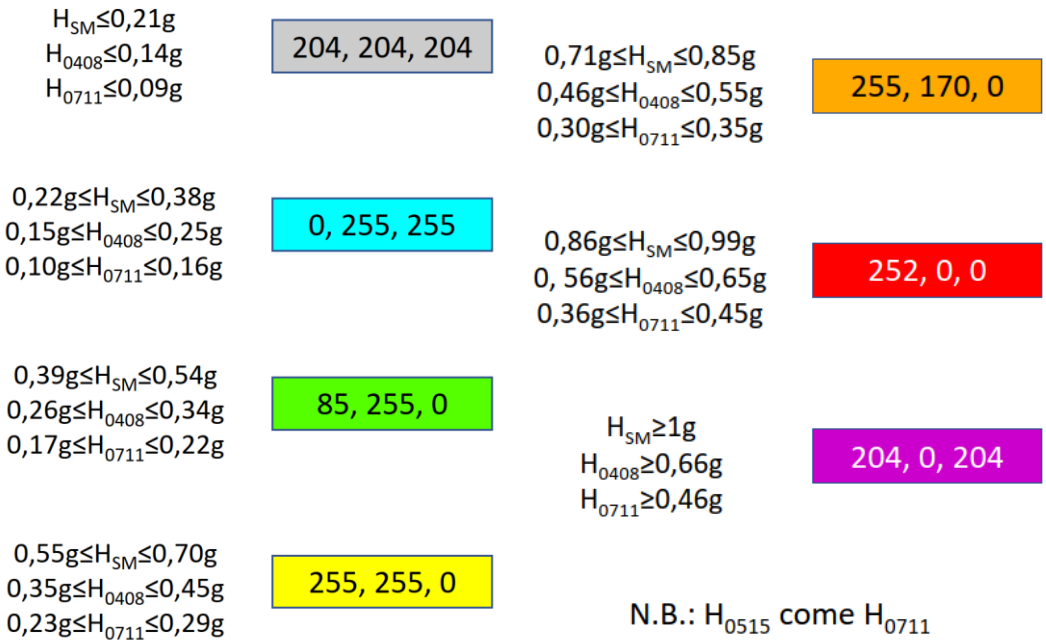


FIG. 85 – LEGENDA ADOTTATA PER L'ACCORPAMENTO DEI VALORI DI H_{SM}

8. BIBLIOGRAFIA

- Albarello D., Castellaro S. (2011): TECNICHE SISMICHE PASSIVE: INDAGINI A STAZIONE SINGOLA, Ingegneria Sismica Anno XXVIII - n. 2 – 2011, Appendice I e II, pp 50-62
- Castellarin A., Eva C., Giglia G. & Vai G.B. (1985): Analisi strutturale del fronte appenninico-padano. Giorn. Geol. Ser. 3, 47 (1-2), 47-46.
- Comune di Forlì (2007): Piano Strutturale Comunale (P.S.C.) – Quadro conoscitivo – Microzonazione sismica
- Comune di Forlì (2013): Piano Operativo Comunale (P.O.C.)
- DISS Working Group. (2015). Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), version 3.2.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). https://doi.org/10.6092/ingv.it-diss3.2.0
- DISS Working Group. (2021). Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), version 3.3.0. A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). https://doi.org/10.13127/diss3.3.0
- Electric Power Researtch Institute (EPRI), 1993, Guidilines for determining design basic ground motions, v. 1: Method and guidilines for estimating earthquales ground motion in eastern North America: EPRI Report TR-102293
- Galli P., Castenetto S. e Peronace E. (2012): Rilievo macrosismico MCS speditivo – Rapporto Finale. Dipartimento della Protezione Civile Nazionale, Roma, 26 pp.
- Gruppo di lavoro MS (2008): INDIRIZZI E CRITERI PER LA MICROZONAZIONE SISMICA. Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome - Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 3 vol. e Dvd https://www.protezionecivile.it/it/pubblicazione/indirizzi-e-criteri-la-microzonazione-sismica
- GUIDELINES FOR THE IMPLEMENTATION OF THE H/V SPECTRAL RATIO TECHNIQUE ON AMBIENT VIBRATIONS MEASUREMENTS, PROCESSING AND INTERPRETATION - SESAME European research project, December 2004
- Idriss, I.M. and Boulanger, R.W. (2004). Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes. Proceedings 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering. Berkeley, 32-56.
- Iwasaki, T., Tatsuoka, F., Tokida, K, and Yasuda, S, (1978), "A Practical Method for Assessing Soil Liquefaction Potential Based on Case Studies at Various Sites in Japan", 2nd International Conference on Microzonation for Safer Construction Research and Application, pp. 885-896,
- Marcellini A., Daminelli R., Milani D. e Pagani M. (2002), "Elementi di sismicità dell'area Forlì-Cesena ai fini del Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale" – Istituto per la Dinamica dei Processi Ambientali (CNR)
- Marcellini A., Martelli L, Tento A., Daminelli R. (2009): L'amplificazione sismica negli "indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica"
- Martelli L., P. Severi, G. Biavati, S. Rosselli, R. Camassi, E. Ercolani, A. Marcellini, A. Tento, D. Gerosa, D. Albarello, F. Guerrini, E. Lunedei, D. Pileggi, F. Pergalani, M. Compagnoni, V. Fioravante e D. Giretti (2014) Analysis of the local seismic hazard for the stability tests of the main bank of the Po River (northern Italy), Boll. Geof. Teor. Appl., 55, 119-134

- Meletti C. e Valensise G., (2004): ZONAZIONE SISMOGENETICA ZS9-APP. 2 AL RAPPORTO CONCLUSIVO. In: "Gruppo di Lavoro MPS (2004). Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo 2003". Rapporto per il Dipartimento della Protezione Civile, INGV, Milano-Roma, aprile 2004, 65 pp. + 5 appendici
- MICROZONAZIONE SISMICA, UNO STRUMENTO CONSOLIDATO PER LA RIDUZIONE DEL RISCHIO. L'esperienza della Regione Emilia-Romagna (2012) – Regione Emilia-Romagna, Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli
- Montaldo V., Meletti C., 2007. Valutazione del valore della ordinata spettrale a 1sec e ad altri periodi di interesse ingegneristico. Progetto DPC-INGV S1, Deliverable D3, http://esse1.mi.ingv.it/d3.html
- National Center for Earthquake Engineering Research (1998) - Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils.
- NOTE ILLUSTRATIVE DELLA CARTA GEOLOGICA D'ITALIA alla scala 1:50.000 – FOGLIO 240-241, Forlì-Cervia – REGIONE EMILIA-ROMAGNA, S.EL.CA. s.r.l., Firenze 2005
- Newmark NM, Hall WJ, Earthquake Spectra and Design, EERI Monograph Series, 1982
- NTC 2018: Aggiornamento delle "Norme Tecniche per le Costruzioni". Decreto 17/01/2018 del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. Suppl. Ord. G.U. n.42 del 20/02/2018
- Provincia di Forlì-Cesena (2010) – Variante integrativa al PTCP – Quadro conoscitivo Volume B "Il Sistema Naturale ed Ambientale"
- Rollins K.M., Evans M.D., Diehl N.B., Daily W.D. (1998) – Shear modulus and damping relationships for gravel. JGGE, 124, 396-405
- Seed H. B., Idriss I. M. – 1970 – Soil modul and damping factors for dynamic response analyses – University of California Berkeley Structural Engineers and Mechanics
- Sesame (2004): Guidiline For The Implementation Of The H/V Spectral Ratio Technique On Ambient Vibrations Measurements, Processing And Interpratation – European research project.
- Vucetic M., Dobry R. – 1991 – Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response - Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 117, Issue 1

9. ALLEGATI

Nel corso dello studio sono stati redatti, oltre alla presente relazione illustrativa, i seguenti elaborati grafici:

Elaborato		scala
1	Carta delle indagini	
1 1/6	*Carta delle indagini*	*scala 1:10.000*
1 2/6	*Carta delle indagini*	*scala 1:10.000*
1 3/6	*Carta delle indagini*	*scala 1:10.000*
1 4/6	*Carta delle indagini*	*scala 1:10.000*
1 5/6	*Carta delle indagini*	*scala 1:10.000*

Elaborato		scala
1 6/6	*Carta delle indagini*	*scala 1:10.000*
2	**Carta geologico-tecnica**	
2 1/6	*Carta geologico-tecnica*	*scala 1:10.000*
2 2/6	*Carta geologico-tecnica*	*scala 1:10.000*
2 3/6	*Carta geologico-tecnica*	*scala 1:10.000*
2 4/6	*Carta geologico-tecnica*	*scala 1:10.000*
2 5/6	*Carta geologico-tecnica*	*scala 1:10.000*
2 6/6	*Carta geologico-tecnica*	*scala 1:10.000*
3	**Carta delle frequenze naturali dei terreni**	
3 1/6	*Carta delle frequenze naturali dei terreni*	*scala 1:10.000*
3 2/6	*Carta delle frequenze naturali dei terreni*	*scala 1:10.000*
3 3/6	*Carta delle frequenze naturali dei terreni*	*scala 1:10.000*
3 4/6	*Carta delle frequenze naturali dei terreni*	*scala 1:10.000*
3 5/6	*Carta delle frequenze naturali dei terreni*	*scala 1:10.000*
3 6/6	*Carta delle frequenze naturali dei terreni*	*scala 1:10.000*
4	**Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS)**	
4 1/6	*Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS)*	*scala 1:10.000*
4 2/6	*Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS)*	*scala 1:10.000*
4 3/6	*Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS)*	*scala 1:10.000*
4 4/6	*Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS)*	*scala 1:10.000*
4 5/6	*Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS)*	*scala 1:10.000*
4 6/6	*Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS)*	*scala 1:10.000*
5	**Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs)**	
5 1/6	*Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs)*	*scala 1:10.000*
5 2/6	*Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs)*	*scala 1:10.000*
5 3/6	*Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs)*	*scala 1:10.000*
5 4/6	*Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs)*	*scala 1:10.000*
5 5/6	*Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs)*	*scala 1:10.000*
5 6/6	*Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs)*	*scala 1:10.000*
6.a	**Carta di microzonazione sismica - FA_{PGA}**	
6.a 1/6	*Carta di microzonazione sismica - FA_{PGA}*	*scala 1:10.000*
6.a 2/6	*Carta di microzonazione sismica - FA_{PGA}*	*scala 1:10.000*
6.a 3/6	*Carta di microzonazione sismica - FA_{PGA}*	*scala 1:10.000*
6.a 4/6	*Carta di microzonazione sismica - FA_{PGA}*	*scala 1:10.000*
6.a 5/6	*Carta di microzonazione sismica - FA_{PGA}*	*scala 1:10.000*
6.a 6/6	*Carta di microzonazione sismica - FA_{PGA}*	*scala 1:10.000*
6.b.1	**Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,1\text{-}0,5\ s}$**	
6.b.1 1/6	*Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,1\text{-}0,5\ s}$*	*scala 1:10.000*
6.b.1 2/6	*Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,1\text{-}0,5\ s}$*	*scala 1:10.000*
6.b.1 3/6	*Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,1\text{-}0,5\ s}$*	*scala 1:10.000*
6.b.1 4/6	*Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,1\text{-}0,5\ s}$*	*scala 1:10.000*
6.b.1 5/6	*Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,1\text{-}0,5\ s}$*	*scala 1:10.000*
6.b.1 6/6	*Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,1\text{-}0,5\ s}$*	*scala 1:10.000*

Elaborato		scala
6.b.2	**Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,4-0,8\ s}$**	
6.b.2 *1/6*	*Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,4-0,8\ s}$*	*scala 1:10.000*
6.b.2 *2/6*	*Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,4-0,8\ s}$*	*scala 1:10.000*
6.b.2 *3/6*	*Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,4-0,8\ s}$*	*scala 1:10.000*
6.b.2 *4/6*	*Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,4-0,8\ s}$*	*scala 1:10.000*
6.b.2 *5/6*	*Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,4-0,8\ s}$*	*scala 1:10.000*
6.b.2 *6/6*	*Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,4-0,8\ s}$*	*scala 1:10.000*
6.b.3	**Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,7-1,1\ s}$**	
6.b.3 *1/6*	Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,7-1,1\ s}$	*scala 1:10.000*
6.b.3 *2/6*	Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,7-1,1\ s}$	*scala 1:10.000*
6.b.3 *3/6*	Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,7-1,1\ s}$	*scala 1:10.000*
6.b.3 *4/6*	Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,7-1,1\ s}$	*scala 1:10.000*
6.b.3 *5/6*	Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,7-1,1\ s}$	*scala 1:10.000*
6.b.3 *6/6*	Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,7-1,1\ s}$	*scala 1:10.000*
6.b.4	**Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,5-1,5\ s}$**	
6.b.4 *1/6*	Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,5-1,5\ s}$	*scala 1:10.000*
6.b.4 *2/6*	Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,5-1,5\ s}$	*scala 1:10.000*
6.b.4 *3/6*	Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,5-1,5\ s}$	*scala 1:10.000*
6.b.4 *4/6*	Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,5-1,5\ s}$	*scala 1:10.000*
6.b.4 *5/6*	Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,5-1,5\ s}$	*scala 1:10.000*
6.b.4 *6/6*	Carta di microzonazione sismica - $FA_{SA\ 0,5-1,5\ s}$	*scala 1:10.000*
6.c.1	**Carta di microzonazione sismica - $FH_{SI\ 0,1-0,5\ s}$**	
6.c.1 *1/6*	Carta di microzonazione sismica - $FH_{SI\ 0,1-0,5\ s}$	*scala 1:10.000*
6.c.1 *2/6*	Carta di microzonazione sismica - $FH_{SI\ 0,1-0,5\ s}$	*scala 1:10.000*
6.c.1 *3/6*	Carta di microzonazione sismica - $FH_{SI\ 0,1-0,5\ s}$	*scala 1:10.000*
6.c.1 *4/6*	Carta di microzonazione sismica - $FH_{SI\ 0,1-0,5\ s}$	*scala 1:10.000*
6.c.1 *5/6*	Carta di microzonazione sismica - $FH_{SI\ 0,1-0,5\ s}$	*scala 1:10.000*
6.c.1 *6/6*	Carta di microzonazione sismica - $FH_{SI\ 0,1-0,5\ s}$	*scala 1:10.000*
6.c.2	**Carta di microzonazione sismica - $FH_{SI\ 0,5-1,0\ s}$**	
6.c.2 *1/6*	Carta di microzonazione sismica - $FH_{SI\ 0,5-1,0\ s}$	*scala 1:10.000*
6.c.2 *2/6*	Carta di microzonazione sismica - $FH_{SI\ 0,5-1,0\ s}$	*scala 1:10.000*
6.c.2 *3/6*	Carta di microzonazione sismica - $FH_{SI\ 0,5-1,0\ s}$	*scala 1:10.000*
6.c.2 *4/6*	Carta di microzonazione sismica - $FH_{SI\ 0,5-1,0\ s}$	*scala 1:10.000*
6.c.2 *5/6*	Carta di microzonazione sismica - $FH_{SI\ 0,5-1,0\ s}$	*scala 1:10.000*
6.c.2 *6/6*	Carta di microzonazione sismica - $FH_{SI\ 0,5-1,0\ s}$	*scala 1:10.000*
6.c.3	**Carta di microzonazione sismica - $FH_{SI\ 0,5-1,5\ s}$**	
6.c.3 *1/6*	Carta di microzonazione sismica - $FH_{SI\ 0,5-1,5\ s}$	*scala 1:10.000*
6.c.3 *2/6*	Carta di microzonazione sismica - $FH_{SI\ 0,5-1,5\ s}$	*scala 1:10.000*
6.c.3 *3/6*	Carta di microzonazione sismica - $FH_{SI\ 0,5-1,5\ s}$	*scala 1:10.000*
6.c.3 *4/6*	Carta di microzonazione sismica - $FH_{SI\ 0,5-1,5\ s}$	*scala 1:10.000*
6.c.3 *5/6*	Carta di microzonazione sismica - $FH_{SI\ 0,5-1,5\ s}$	*scala 1:10.000*
6.c.3 *6/6*	Carta di microzonazione sismica - $FH_{SI\ 0,5-1,5\ s}$	*scala 1:10.000*
6.d	**Carta di microzonazione sismica – H_{SM}**	
6.d *1/6*	Carta di microzonazione sismica – H_{SM}	*scala 1:10.000*

Elaborato		scala
6.d 2/6	Carta di microzonazione sismica – H_{SM}	*scala 1:10.000*
6.d 3/6	Carta di microzonazione sismica – H_{SM}	*scala 1:10.000*
6.d 4/6	Carta di microzonazione sismica – H_{SM}	*scala 1:10.000*
6.d 5/6	Carta di microzonazione sismica – H_{SM}	*scala 1:10.000*
6.d 6/6	Carta di microzonazione sismica – H_{SM}	*scala 1:10.000*
6.e.1	**Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,4\text{-}0,8\ s}$**	
6.e.1 *1/6*	Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,4\text{-}0,8\ s}$	*scala 1:10.000*
6.e.1 *2/6*	Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,4\text{-}0,8\ s}$	*scala 1:10.000*
6.e.1 *3/6*	Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,4\text{-}0,8\ s}$	*scala 1:10.000*
6.e.1 *4/6*	Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,4\text{-}0,8\ s}$	*scala 1:10.000*
6.e.1 *5/6*	Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,4\text{-}0,8\ s}$	*scala 1:10.000*
6.e.1 *6/6*	Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,4\text{-}0,8\ s}$	*scala 1:10.000*
6.e.2	**Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,7\text{-}1,1\ s}$**	
6.e.2 *1/6*	Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,7\text{-}1,1\ s}$	*scala 1:10.000*
6.e.2 *2/6*	Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,7\text{-}1,1\ s}$	*scala 1:10.000*
6.e.2 *3/6*	Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,7\text{-}1,1\ s}$	*scala 1:10.000*
6.e.2 *4/6*	Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,7\text{-}1,1\ s}$	*scala 1:10.000*
6.e.2 *5/6*	Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,7\text{-}1,1\ s}$	*scala 1:10.000*
6.e.2 *6/6*	Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,7\text{-}1,1\ s}$	*scala 1:10.000*
6.e.3	**Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,5\text{-}1,5\ s}$**	
6.e.3 *1/6*	Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,5\text{-}1,5\ s}$	*scala 1:10.000*
6.e.3 *2/6*	Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,5\text{-}1,5\ s}$	*scala 1:10.000*
6.e.3 *3/6*	Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,5\text{-}1,5\ s}$	*scala 1:10.000*
6.e.3 *4/6*	Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,5\text{-}1,5\ s}$	*scala 1:10.000*
6.e.3 *5/6*	Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,5\text{-}1,5\ s}$	*scala 1:10.000*
6.e.3 *6/6*	Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,5\text{-}1,5\ s}$	*scala 1:10.000*

Inoltre, alla presente Relazione, è stato allegato l'Elaborato 7 – Nuove indagini, contenente le indagini di nuova esecuzione, e l'Elaborato 8 – Verifiche a liquefazione.