



PROTEZIONE CIVILE
Presidenza del Consiglio dei Ministri
Dipartimento della Protezione Civile



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 Sasso Marconi



<p>Regione Emilia-Romagna</p>	<p>Soggetto realizzatore</p>  <p>Direzione tecnica Dott. Geol. Carlo Caleffi Dott. Geol. Francesco Cerutti Collaboratori Dott. Geol. Alessandro Ferrari Dott.ssa Geol. Melinda Raimondo Dott. Lorenzo Dalle Luche</p>	<p>Data Settembre 2022</p> <p>MS3</p>
-----------------------------------	--	--



INDICE

1.	Introduzione	4
1.1	Articolazione dello studio	6
2.	Definizione della pericolosità di base e degli eventi di riferimento	9
2.1	Sismicità del territorio	9
2.2	Sequenza sismica emiliana del 2012	13
2.3	Caratteristiche sismotettoniche	14
2.4	Classificazione sismica comunale.....	22
2.5	Il rischio sismico definito nel PTM della Città Metropolitana di Bologna	24
3.	Assetto geologico e geomorfologico dell'area	26
3.1	Inquadramento geologico	26
3.1.1	Geologia delle aree studiate.....	34
3.2	Inquadramento geomorfologico.....	35
4.	Indagini ed analisi	37
4.1	Prove sismiche di tipo HVSR	37
4.2	Prove sismiche di tipo MASW	39
4.3	Prove sismiche di tipo ERT.....	43
5.	Analisi di risposta sismica locale	45
5.1	Pericolosità sismica di base	46
5.2	Segnali in input	47
5.3	Modello geofisico del sottosuolo.....	47
5.3.1	Litologia	48
5.3.2	Determinazione della V_s e del bedrock sismico	48
5.3.3	Curve di variazione dello smorzamento (D) e della rigidità (G/G_0) in funzione della deformazione.....	48
5.1	Procedura di analisi RSL.....	50
5.1.1	Metodo lineare equivalente	50
5.1.2	Soluzione alla singola iterazione mediante FEM.....	52
5.1.3	Smorzamento.....	53
5.1.4	Procedimento iterativo	54
5.1.5	Interpretazione dei risultati.....	54
5.2	Analisi dei risultati.....	54
5.3	Risultati della modellazione numerica	58
5.3.1	RSL per il sito "Zona artigianale Pontecchio Marconi" (037057L15 – MASW 1)	58
5.3.2	RSL per il sito "Parco San Massimiliano Kolbe" (037057L16 – MASW 2)	61
5.3.3	RSL per il sito "Via Pontecchio" (037057L19 – MASW 3)	64
5.3.4	RSL per il sito "Istituto Professionale B. Ferrarini" (037057L18 – MASW 4.....	67



5.3.5	RSL per il sito “Parco pubblico Via Achillini” (037057L17 – MASW 5)	70
5.4	Considerazioni sui risultati delle analisi di terzo livello	73
5.5	Considerazioni sul bedrock sismico	74
6.	Modello del sottosuolo con relative interpretazioni e incertezze	76
7.	Elaborati cartografici	83
7.1	Carta delle indagini	83
7.2	Carta Geologico-Tecnica per la microzonazione sismica	84
7.3	Carta delle frequenze naturali dei terreni	88
7.4	Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS)	91
7.5	Carta della velocità delle onde di taglio S (Vs)	95
7.6	Carte di microzonazione sismica	97
7.7	Carte dello scuotimento atteso	100
8.	Bibliografia	101
9.	Allegati	104

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	3 di 104



1. INTRODUZIONE

Nella presente Relazione vengono descritte le attività svolte e i risultati ottenuti nel corso dello *Studio di microzonazione sismica di livello 2, con locali approfondimenti di livello 3 del Comune di Sasso Marconi*, effettuato su incarico del Comune di Sasso Marconi (cfr. Determinazione n° 409 del 09/11/2021) e finanziato con contributi di cui alla Delibera di Giunta Regionale dell'Emilia-Romagna n. 182223 del 18/11/2020.

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 A2 "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. 780/2021" della deliberazione di Giunta regionale n. 1885 del 15/11/2021 "OCDPC 20 maggio 2021, n. 780 - Attuazione dell'art.2, comma 1, lett. a) e comma 2. Approvazione dei criteri per l'attribuzione, la concessione e la liquidazione di contributi e per la realizzazione e presentazione degli elaborati relativi a studi di Microzonazione Sismica e Analisi della Condizione Limite per l'Emergenza" (da qui in avanti "Allegato A2 della delibera regionale")
- "Microzonazione sismica - Standard di rappresentazione e archiviazione informatica" - Versione 4.2, Roma, dicembre 2020 - Elaborato 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")

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	4 di 104



- Atto di coordinamento tecnico per gli studi di microzonazione sismica ai sensi della LR 24/2017 approvato con DGR 476/2021¹ e integrato con DGR 564/2021² (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.

Il presente studio di Microzonazione Sismica, attuato in conformità a quanto stabilito dai riferimenti tecnici sopraelencati e dal disciplinare d’incarico, è articolato nei seguenti tre livelli di approfondimento:

- **PRIMO LIVELLO DI APPROFONDIMENTO, finalizzato a:**
 - individuare le aree suscettibili di effetti locali in cui effettuare le successive indagini di microzonazione sismica;
 - definire il tipo di effetti attesi;
 - indicare, per ogni area, il livello di approfondimento necessario;
 - descrivere le caratteristiche delle unità geologiche del sottosuolo, in termini di litologia, stratigrafia, tettonica e geometria per definire il modello geologico di base per la microzonazione sismica.

- **SECONDO LIVELLO DI APPROFONDIMENTO, con le seguenti finalità:**
 - verifica delle condizioni di pericolosità indicate dal 1° livello e conferma o eventuale nuova perimetrazione delle aree ove effettuare la microzonazione sismica;
 - suddivisione dettagliata del territorio, in base all’amplificazione attesa, secondo aree con maggiore o minore pericolosità sismica, riferita a una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni;
 - conferma o migliore definizione delle aree, indicate dal 1° livello, in cui si ritengono necessari approfondimenti di 3° livello con l’indicazione delle indagini e analisi da effettuare.

- **TERZO LIVELLO DI APPROFONDIMENTO, con le seguenti finalità:**
 - conferma delle condizioni di pericolosità indicate dai precedenti livelli di approfondimento ed eventuale nuova perimetrazione in cui effettuare la MS;
 - valutazione più approfondita della risposta sismica locale, in termini di amplificazione e/o stima degli indici di rischio, nelle seguenti situazioni:
 - a) aree soggette a liquefazione e densificazione;

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.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	5 di 104



- b) aree instabili e potenzialmente instabili;
- c) aree in cui le coperture hanno spessore fortemente variabile, come ad esempio nelle aree pedemontane e di fondovalle a ridosso dei versanti; in tali condizioni sono raccomandate analisi bidimensionali;
- d) aree suscettibili di effetti differenziali (zone di contatto laterale tra litotipi con caratteristiche fisico - meccaniche molto diverse, zone di faglia attiva e capace, zone con cavità sepolte).

Nella prima fase di studio è stato preso in esame l'intero Comune. Quindi, una volta raccolti e valutati i dati pregressi, in accordo con l'Amministrazione Comunale, ci si è concentrati sul territorio urbanizzato e urbanizzabile, come definito dagli strumenti urbanistici vigenti, ovvero, il Piano Strutturale Comunale (P.S.C.) e il Piano Operativo Comunale (P.O.C.) del Comune di Sasso Marconi.

Conseguentemente, lo studio ha interessato sia il centro urbano di Sasso Marconi che le principali frazioni, quali: Borgonuovo di Pontecchio, Pontecchio Marconi, Fontana e Tignano, in località Loreto.

Nel corso dell'incarico sono stati redatti oltre alla presente relazione gli elaborati elencati 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 A2 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 Articolazione dello studio

Lo studio di microzonazione 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 Sasso Marconi;
2. individuazione delle aree rappresentative di una situazione stratigrafica tipo definita nell'analisi precedente;
3. pianificazione della nuova campagna d'indagini;
4. realizzazione di n° 41 prove HVSR per la determinazione della frequenza caratteristica del terreno;

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	6 di 104



5. realizzazione di n° 5 prove MASW per la stima della velocità delle onde sismiche e il completamento del quadro sismostratigrafico;
6. realizzazione di n° 5 profili geoelettrici per migliorare la ricostruzione del modello geologico locale;
7. realizzazione, con i dati delle nuove indagini e secondo gli indirizzi tecnici e gli standard più recenti, delle seguenti cartografie:
 - Carta delle indagini
 - Carta geologico-tecnica
 - Carta delle frequenze naturali dei terreni
 - Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS)
 - Carta delle velocità delle onde di taglio S (V_s)
8. valutazione della risposta sismica locale in n° 5 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. 5.0.1 di STACEC;
9. calcolo dei fattori di amplificazione, per i n° 5 siti indagati, per un tempo di ritorno $TR=475$ anni, con smorzamento $\zeta=5\%$, 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 è 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 $0,1s \leq T \leq 0,5s$,
 - $SA2$ per $0,4s \leq T \leq 0,8s$,
 - $SA3$ per $0,7s \leq T \leq 1,1s$,
 - $SA4$ per $0,5s \leq T \leq 1,5s$;
 - $FH_{SI} = SI/SI_0$, 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 velocità (o corrispondente grandezza di Intensità di *Housner*) alla superficie del sito per prefissati intervalli di periodi T :
 - $SI1$ per $0,1s \leq T \leq 0,5s$,
 - $SI2$ per $0,5s \leq T \leq 1,0s$,
 - $SI3$ per $0,5s \leq T \leq 1,5s$.
10. Redazione delle cartografie di microzonazione sismica 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:

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	7 di 104



- $0,1s \leq T \leq 0,5s$ (cfr. Elaborato 6.d.1 - Carta di microzonazione sismica - H_{SM}),
- $0,4s \leq T \leq 0,8s$ (cfr. Elaborato 6.d.2 - Carta di microzonazione sismica - $H_{SM 0,4-0,8 s}$),
- $0,7s \leq T \leq 1,1s$ (cfr. Elaborato 6.d.3 - Carta di microzonazione sismica - $H_{SM 0,7-1,1 s}$),
- $0,5s \leq T \leq 1,5s$ (cfr. Elaborato 6.d.4 - Carta di microzonazione sismica - $H_{SM 0,5-1,5 s}$),

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	8 di 104



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

2.1 Sismicità del territorio

Nella valutazione 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 Sasso Marconi 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 nella Tabella 2-1 dove sono stati elencati gli eventi di maggior intensità al sito (Int.), in scala MCS, il giorno (Gi), l’ora (Ho), il minuto (Mi) e, eventualmente, il secondo (Se), 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 (I_o) e la magnitudo momento (M_w).

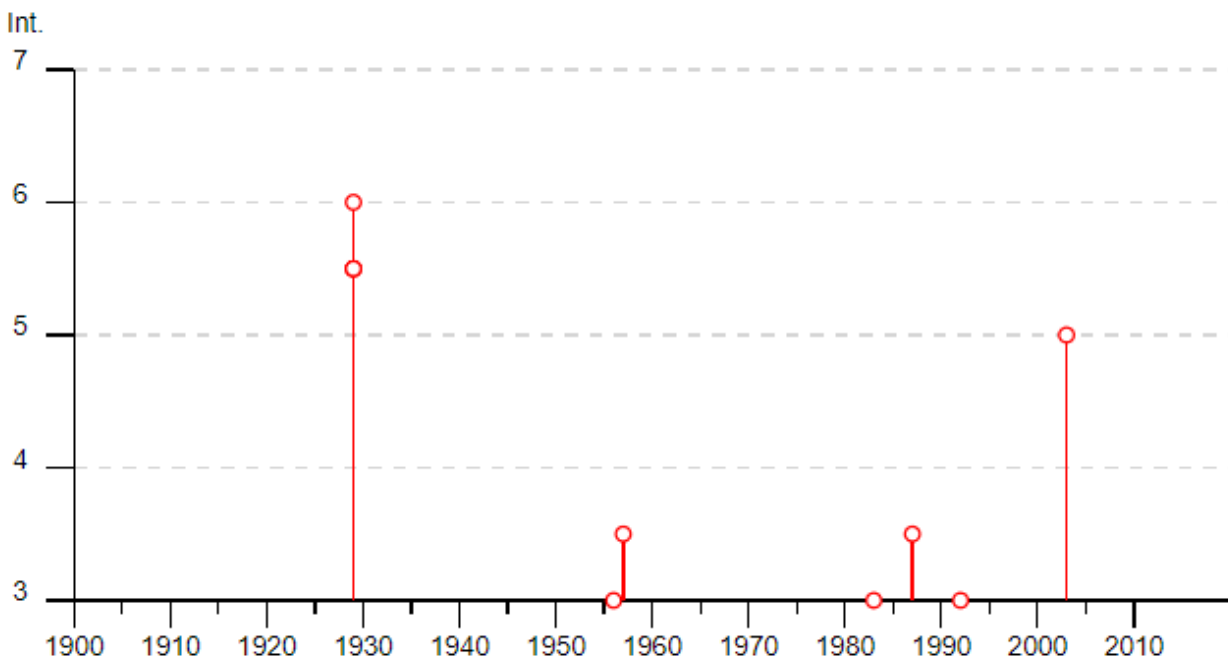


Figura 2-1 - Eventi di maggiore intensità censiti nel comune di Sasso Marconi

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>

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	9 di 104



Effetti	In occasione del terremoto del									
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
5-6	1929	04	19	22	40		Bolognese	12	5-6	4.54
6	1929	04	20	01	10		Bolognese	109	7	5.36
5-6	1929	04	22	08	26		Bolognese	41	6-7	5.10
5-6	1929	04	28	19	40		Bolognese	20	6	4.73
3	1956	04	26	03	00	0	Appennino bolognese	89	6	4.74
3-4	1957	08	27	11	54		Appennino modenese	58	5	4.73
3	1983	11	09	16	29	5	Parmense	850	6-7	5.04
2-3	1986	12	06	17	07	1	Ferrarese	604	6	4.43
3-4	1987	05	02	20	43	5	Reggiano	802	6	4.71
3	1992	04	17	11	59	0	Appennino bolognese	56	4-5	4.11
NF	1995	08	24	17	27	3	Appennino pistoiese	56	6	4.45
NF	2000	05	08	12	29	5	Faentino	126	5	4.67
NF	2000	05	10	16	52	1	Faentino	151	5-6	4.82
2	2000	06	18	07	42	0	Pianura emiliana	304	5-6	4.40
NF	2002	06	08	20	13	0	Frignano	115	4	4.23
NF	2002	06	18	22	23	3	Frignano	186	4	4.30
NF	2002	06	19	22	11	1	Frignano	52	3	4.03
5	2003	09	14	21	42	5	Appennino bolognese	133	6	5.24
NF	2005	07	15	15	17	1	Forlivese	173	4-5	4.29

Tabella 2-1 - Massimi eventi sismici verificatisi a Sasso Marconi

Dalla lettura dei dati si evidenzia che il massimo evento sismico censito a Sasso Marconi si è verificato il 20 aprile 1929 con epicentro nel Bolognese e un'intensità del VI 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 Sasso Marconi è stato soggetto a terremoti di intensità massima minore o uguale al VIII grado della scala MCS.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	10 di 104

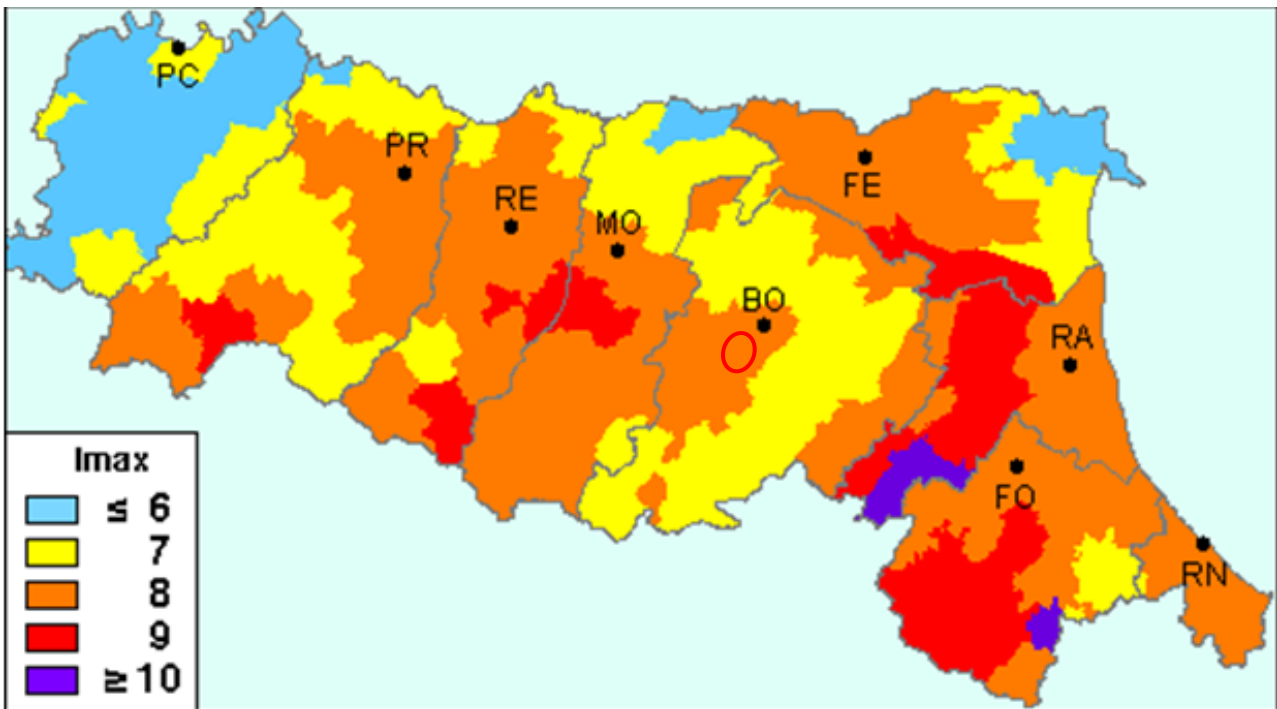


Figura 2-2 - Carta della massima intensità macrosismica in Emilia-Romagna

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.

Come si nota dalla Figura 2-3, in cui sono rappresentati gli epicentri dei principali terremoti ($M_w \geq 4$) 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.

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.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	11 di 104

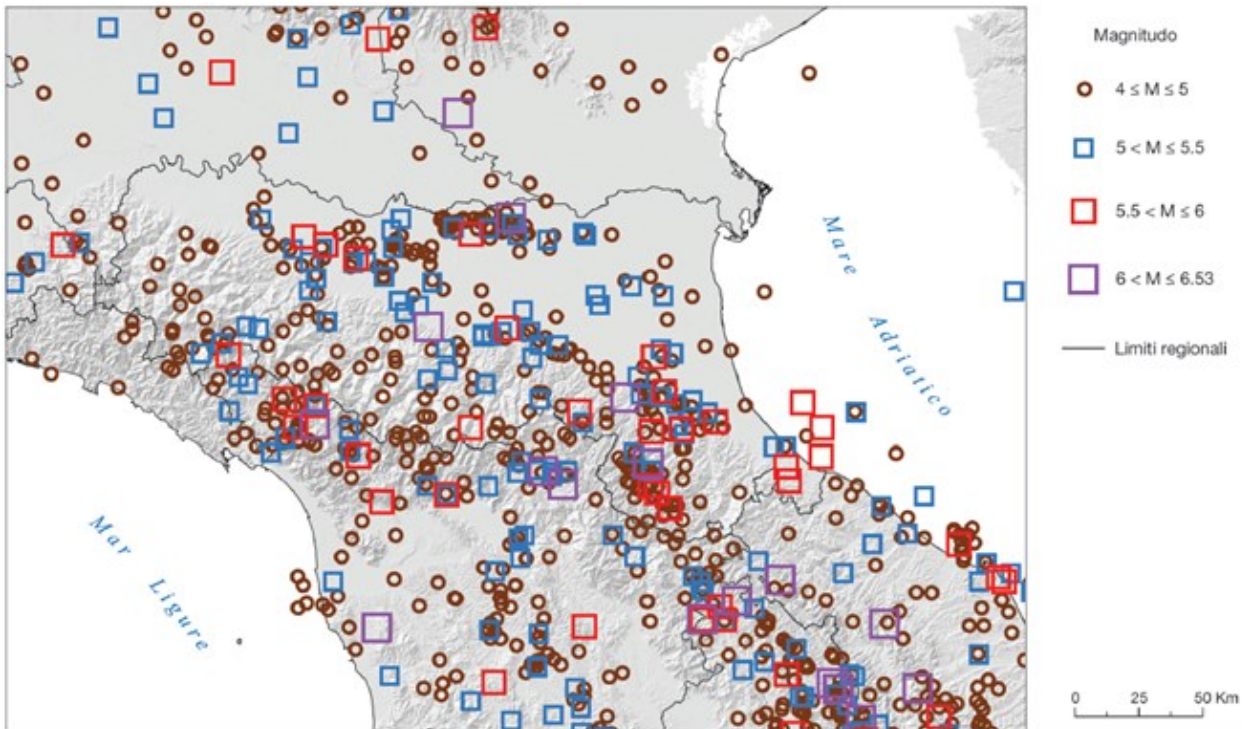


Figura 2-3 – Epicentri dei principali terremoti ($M_w \geq 4$) che hanno interessato l'Emilia-Romagna dall'anno 1000 al 2014 (Rovida et al., 2016; ISIDe Working Group, 2015)

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. Figura 2-4), 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.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	12 di 104

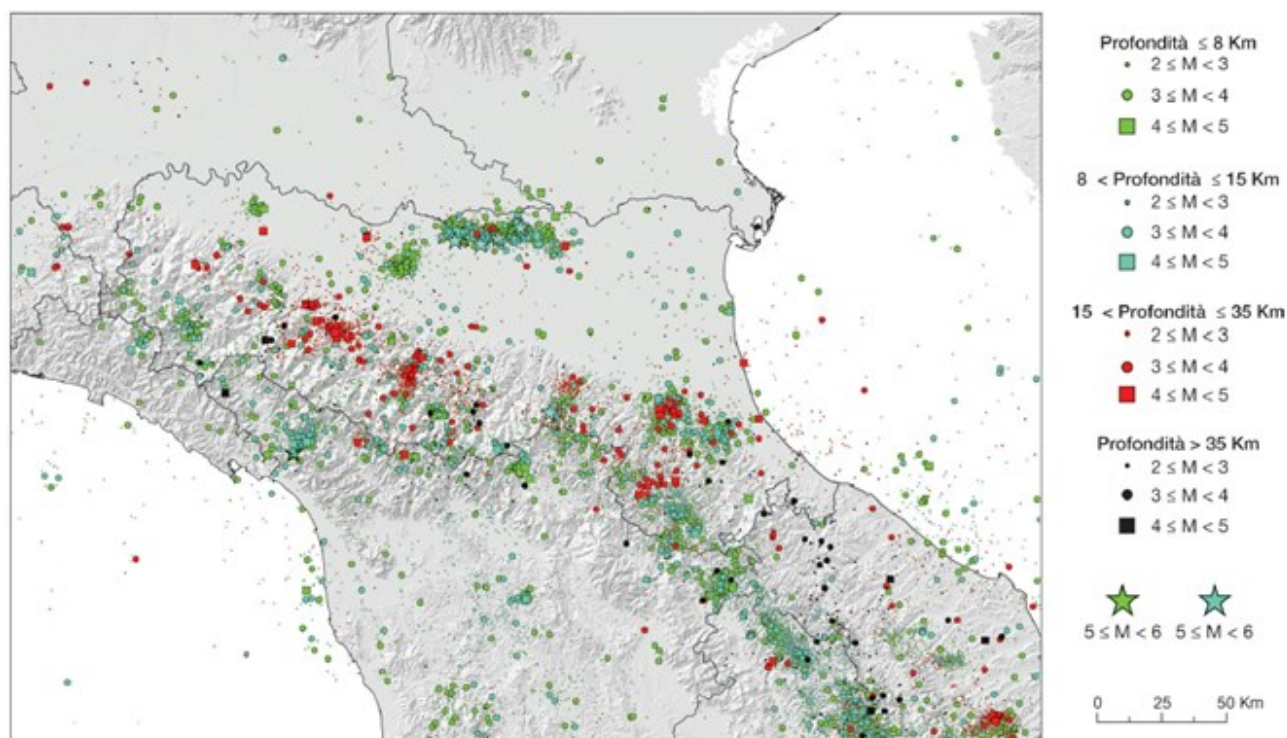


Figura 2-4 – Mappa dei terremoti strumentali $M_w \geq 2$ (ISIDe Working group, 2015)

2.2 Sequenza sismica emiliana del 2012

Nei mesi di maggio-giugno 2012 una vasta porzione della Pianura Padana⁴ è stata interessata da una sequenza sismica caratterizzata da due forti scosse principali (stelle rosse in Figura 2-5).

La prima, avvenuta il 20 maggio alle 4:03 ora italiana di magnitudo $M=5.9$ a una profondità di 6.3 km, ha colpito l'area tra Finale Emilia e San Felice sul Panaro; la seconda scossa, avvenuta il 29 maggio alle 9:00 ora italiana, con una magnitudo $M=5.8$ e profondità di 10.2 km, è stata localizzata circa 12 km a sud-ovest della precedente.

L'area delle repliche si è estesa in direzione est-ovest per più di 50 km, ed è stata caratterizzata dall'occorrenza di 5 eventi di magnitudo $M \geq 5.0$ (stelle grigie in Figura 2-5) e più di 1800 con magnitudo $M > 1.5$ (cerchi verdi in Figura 2-5).

I dati della sequenza indicano che si sono attivate due faglie inverse, facenti parte del sistema tettonico compressivo dell'area, sepolte al di sotto di una spessa copertura di sedimenti della piana del Po.

I maggiori effetti locali riscontrati sono risultati amplificazione del moto sismico e fenomeni di liquefazione, questi ultimi diffusi soprattutto in corrispondenza di rami

⁴ Compresa tra le Province di Reggio Emilia, Modena, Bologna e Ferrara

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	13 di 104



abbandonati dei fiumi appenninici (Reno, Panaro e Secchia) e, subordinatamente, del Po⁵. In termini di amplificazione, si sono invece registrate massime accelerazioni orizzontali al sito (Pga) che hanno superato 0,2 g e in alcune aree anche 0,3 g.

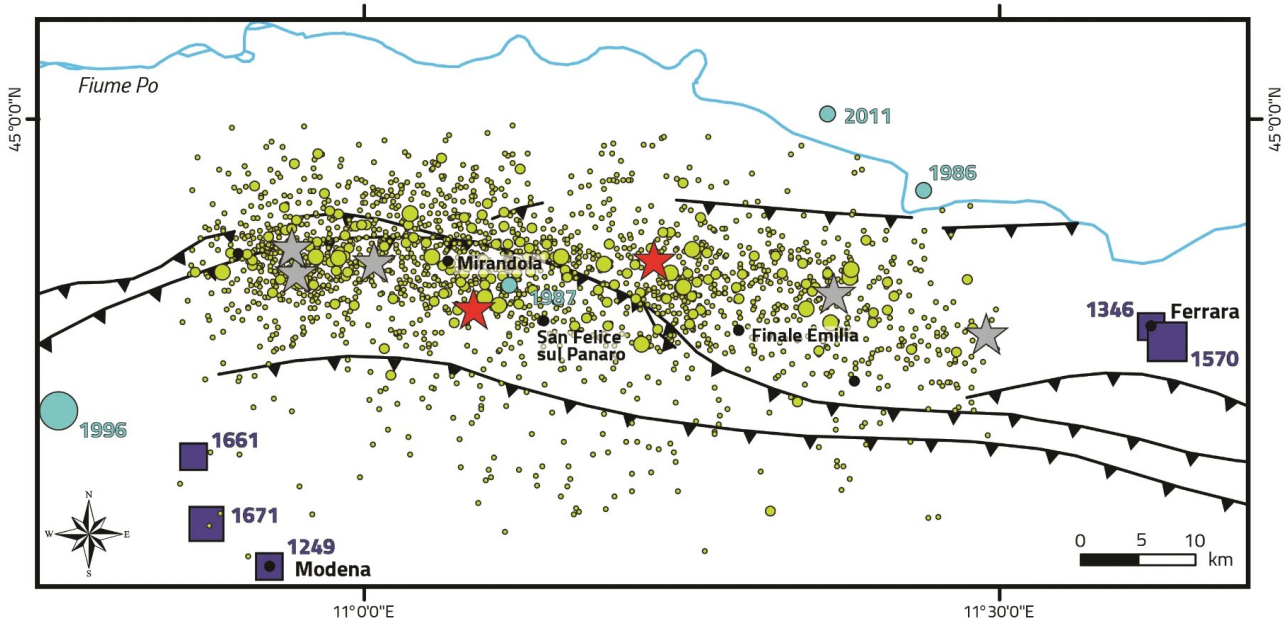


Figura 2-5 - Localizzazione della sequenza emiliana del 2012 e sismicità storica strumentale nell'area. (modificato da EMERGEO W.G., NHSS, 2013)

Il DBMI15 non attribuisce nessun valore di intensità per il Comune di Sasso Marconi riferibile alla sequenza emiliana del 2012, in quanto i rapporti dei rilievi macrosismici eseguiti (Galli et al., 2012) citano solo i Comuni più settentrionali per quanto riguarda la Provincia di Bologna (ora Città Metropolitana di Bologna).

2.3 Caratteristiche sismotettoniche

Per avere un quadro degli elementi che concorrono alla pericolosità sismica del territorio comunale di Sasso Marconi 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

⁵ Fonte: “Microzonazione sismica e analisi delle CLE delle aree epicentrali dei terremoti della Pianura Emiliana maggio-giugno 2012” – Relazione Illustrativa a cura di L. Martelli e M. Romani e “Rilievo macrosismico MCS speditivo – Rapporto Finale” a cura di P. Galli, S. Castenetto e E. Peronace.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	14 di 104



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 Figura 2-6 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 i 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.

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 Figura 2-7 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, di seguito

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	15 di 104



trattato), il database delle sorgenti sismogenetiche italiane, potenzialmente in grado di generare sismi con magnitudo superiore a M 5.5 nell'area italiana⁶.

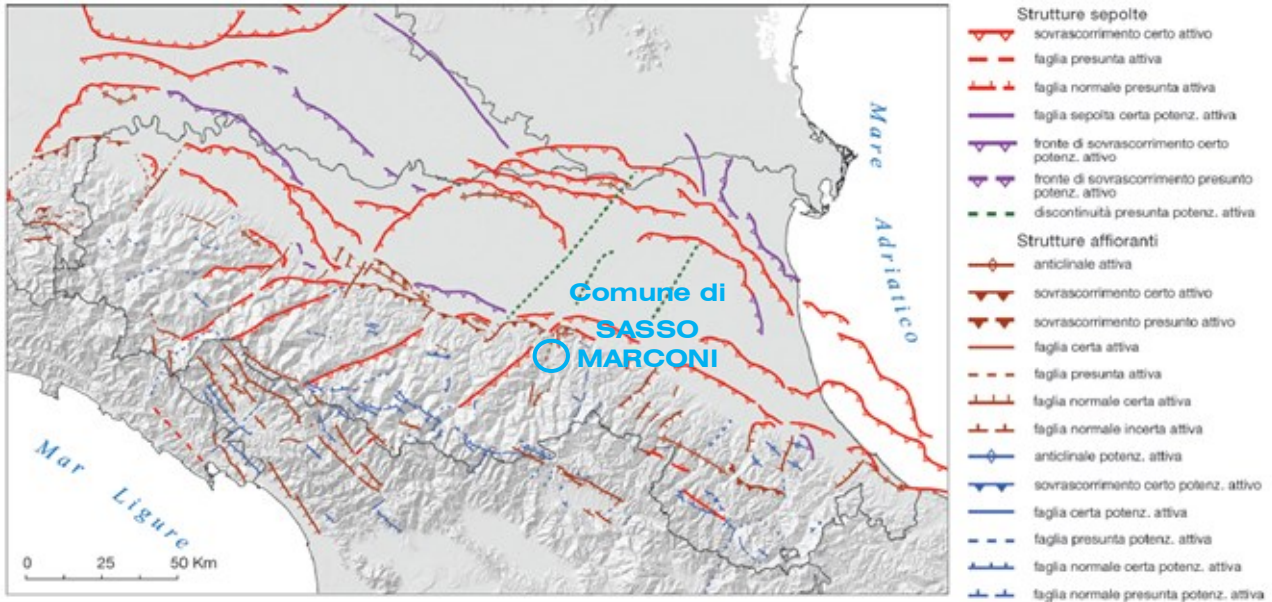


Figura 2-6 – Mappa di sintesi delle strutture tettoniche attive e potenzialmente attive riportate nella “Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna ed aree limitrofe”

⁶ 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](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.04.014)

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	16 di 104

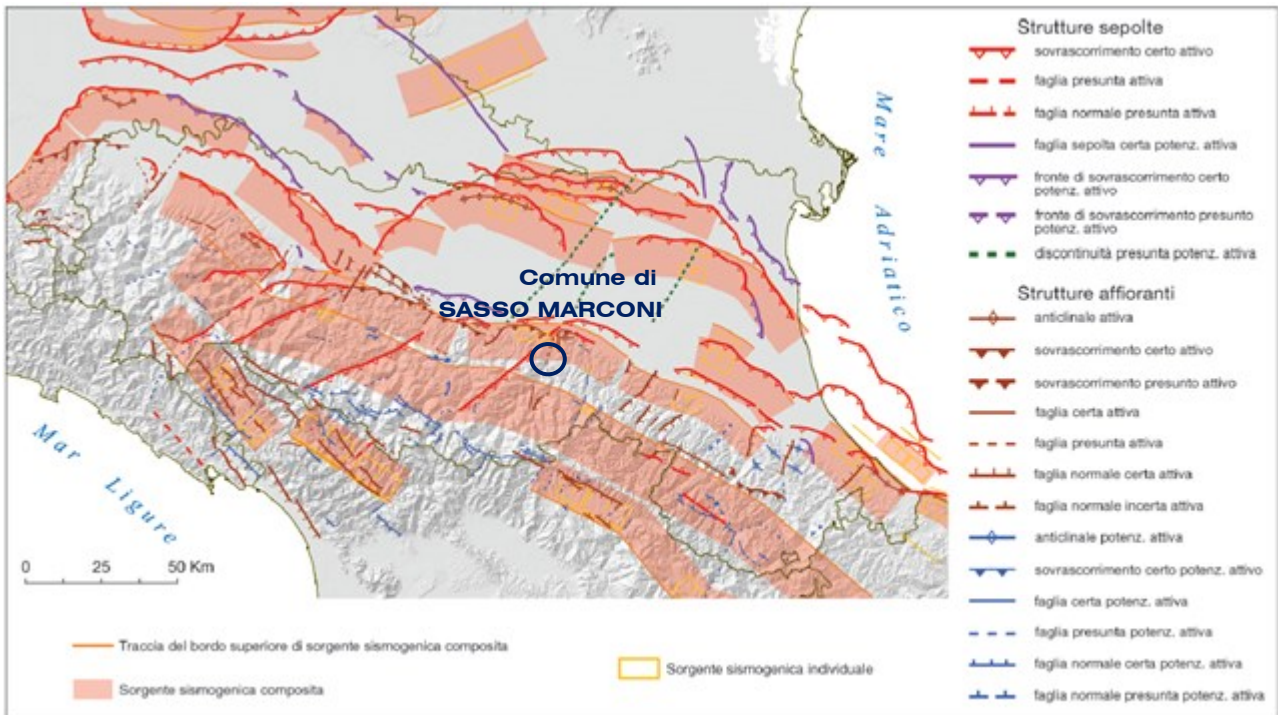


Figura 2-7 – Mappa di confronto tra le strutture tettoniche attive e potenzialmente attive riportate nella “Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna ed aree limitrofe” e le zone sismogenetiche del DISS 3.2

A riguardo, è interessante osservare che il Comune di Sasso Marconi ricade in parte nella sorgente sismogenetica composta ITCS047 “Castelvetro di Modena-Castel San Pietro Terme”, individuata nel catalogo DISS 3.2, ritenuta capace di generare terremoti di magnitudo pari a 6.0, con meccanismi di *thrust* ad una profondità compresa tra 2 e 8 km; *thrust* indicati come attivi (cfr. anche Figura 2-8).

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	17 di 104

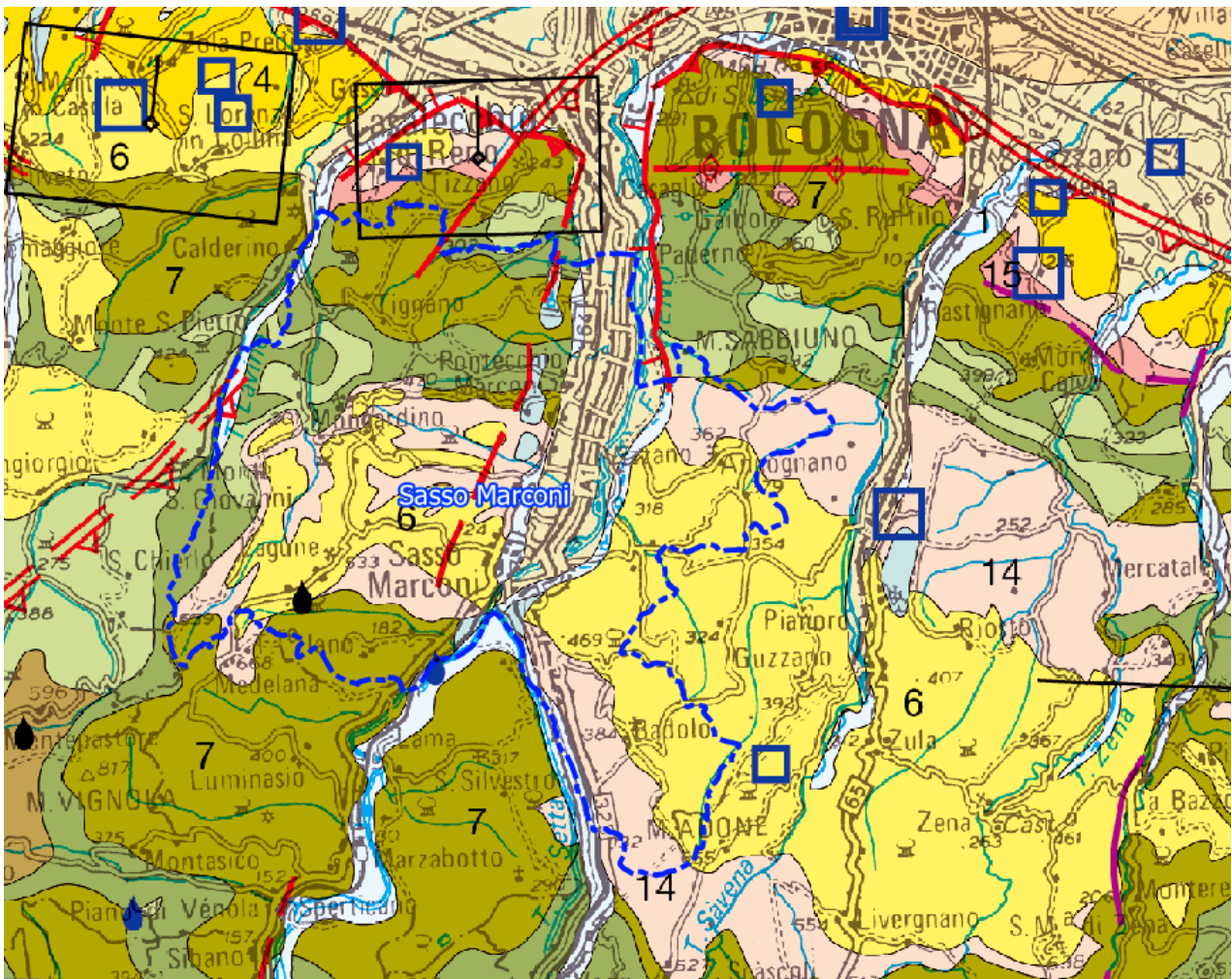


Figura 2-8 - Stralcio della “Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna ed aree limitrofe”

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 Figura 2-9 messa a confronto con le strutture attive e potenzialmente attive riconosciute, il Comune di Sasso Marconi ricade in zona sismogenetica con meccanismi di rottura prevalentemente di tipo trascorrente (*strike strip fault*).

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	18 di 104

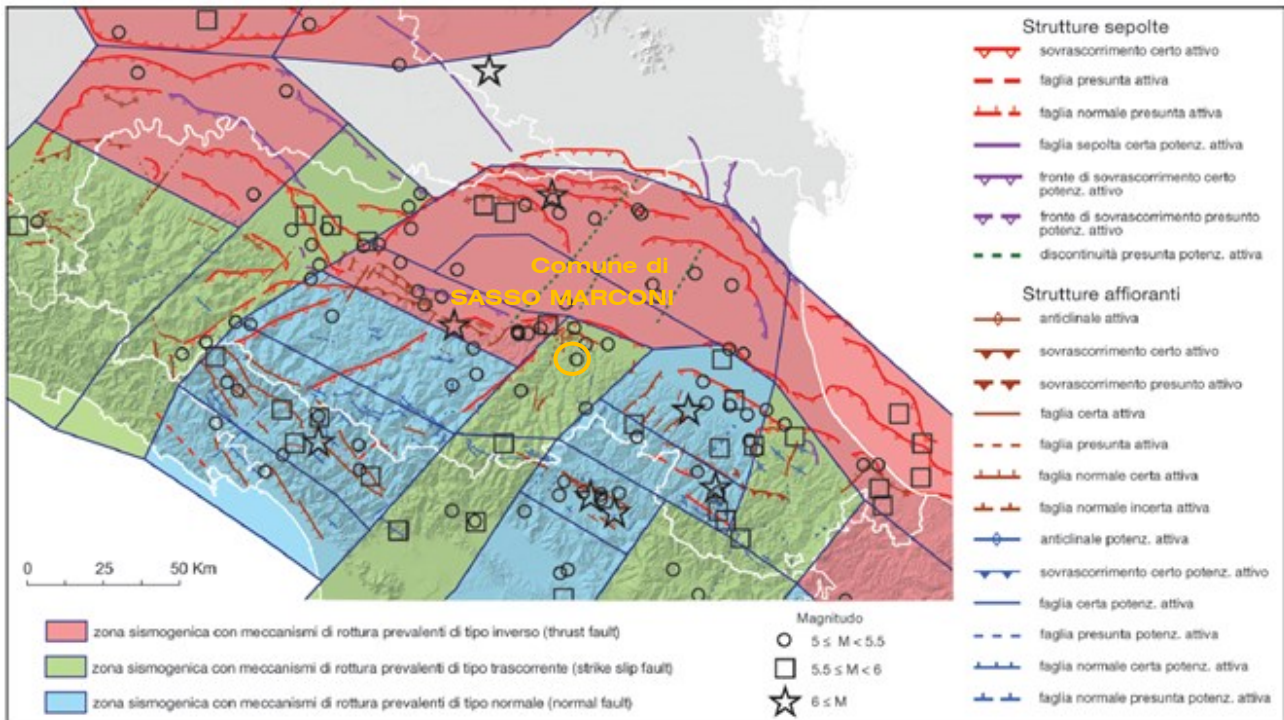


Figura 2-9 – Mappa di confronto tra le strutture attive e potenzialmente attive riconosciute e la zonazione sismogenetica proposta da Martelli et alii (2017)

Più precisamente (cfr. Figura 2-10), rientra nella Zona 10 Reno – Setta, contraddistinta dalle seguenti caratteristiche sismotettoniche:

- *Orientazione delle principali faglie attive: S/45-60*
- *Geometria principale delle faglie attive: inversa*
- *Profondità ipocentrale: 15-35 km*
- *Magnitudo massima osservata: 5.5*
- *Magnitudo massima calcolata: 5.73 ± 0.30*

e che viene così descritta:

- *Zona che si estende dal crinale tosco-emiliano al margine appenninico bolognese, caratterizzata da una minore frequenza di terremoti, generalmente di media intensità, e da strutture trasversali alla catena con componente trascorrente. La profondità degli ipocentri è molto variabile, da 5 a 35 km, con gli eventi estensionali concentrati nella porzione più superficiale (< 15 km). Lungo il margine appenninico sono presenti evidenze di attività di strutture compressive, con direzione di massima compressione (assi P) circa N-S, fortemente immergenti verso sud (45°-60°); in questo settore gli ipocentri si concentrano a profondità tra 15 e 35 km. La magnitudo storica massima è $M=5.5$; corrisponde al settore orientale della zona ZS9 913, compreso tra le valli dei fiumi Reno e Sillaro.*

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	19 di 104

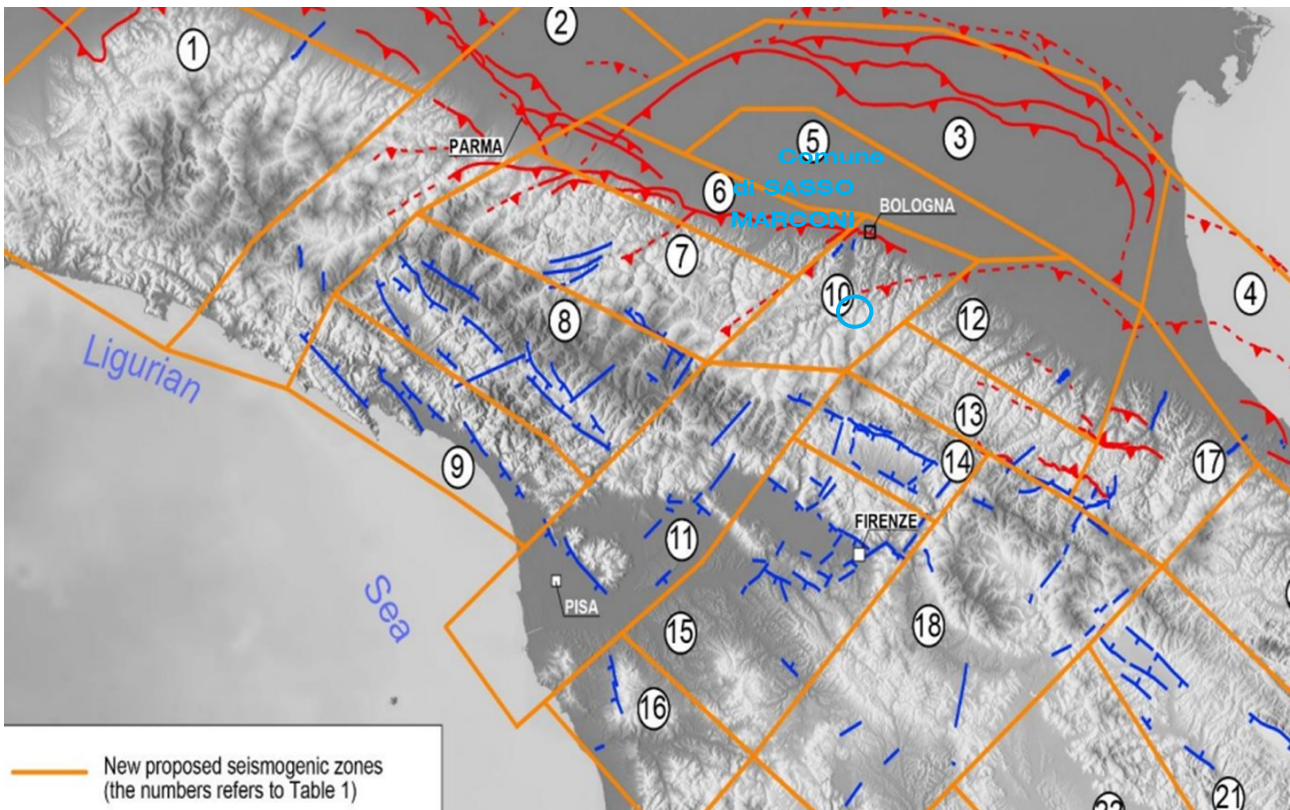


Figura 2-10 - Zone sismogenetiche proposte da Martelli et al. (2017) e loro numerazione

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 Figura 2-11, il Comune di Sasso Marconi ricade, all’estremità orientale della zona 913, denominata *“Appennino Emiliano-Romagnolo”*.

Detta zona è contraddistinta da eventi sismici di magnitudo medio-bassa (la massima magnitudo rilevata è $M_d = 4.80$), con cinematiche attese di carattere misto seppure principalmente compressivi a NW.

Il maggior numero di terremoti che si verificano nella zona 913 presenta il proprio ipocentro a profondità comprese tra 12 e 20 km, con profondità efficace di 13 km.

Sulla base dei meccanismi focali, sono previsti valori “cautelativi” di massima magnitudo (M_{wmax2}) pari a = 6.14.

Va, infine, precisato che nel 2021 è stata pubblicata la versione 3.3.0 del DISS⁷, che ha modificato in maniera significativa la magnitudo massima attesa (M_w) per la sorgente sismogenetica che interessa la porzione settentrionale del territorio comunale (la ITCS047 “Castelvetro di Modena – Castel San Pietro Terme”) aumentandola da 6.0 a 6.8.

⁷ 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>

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	20 di 104

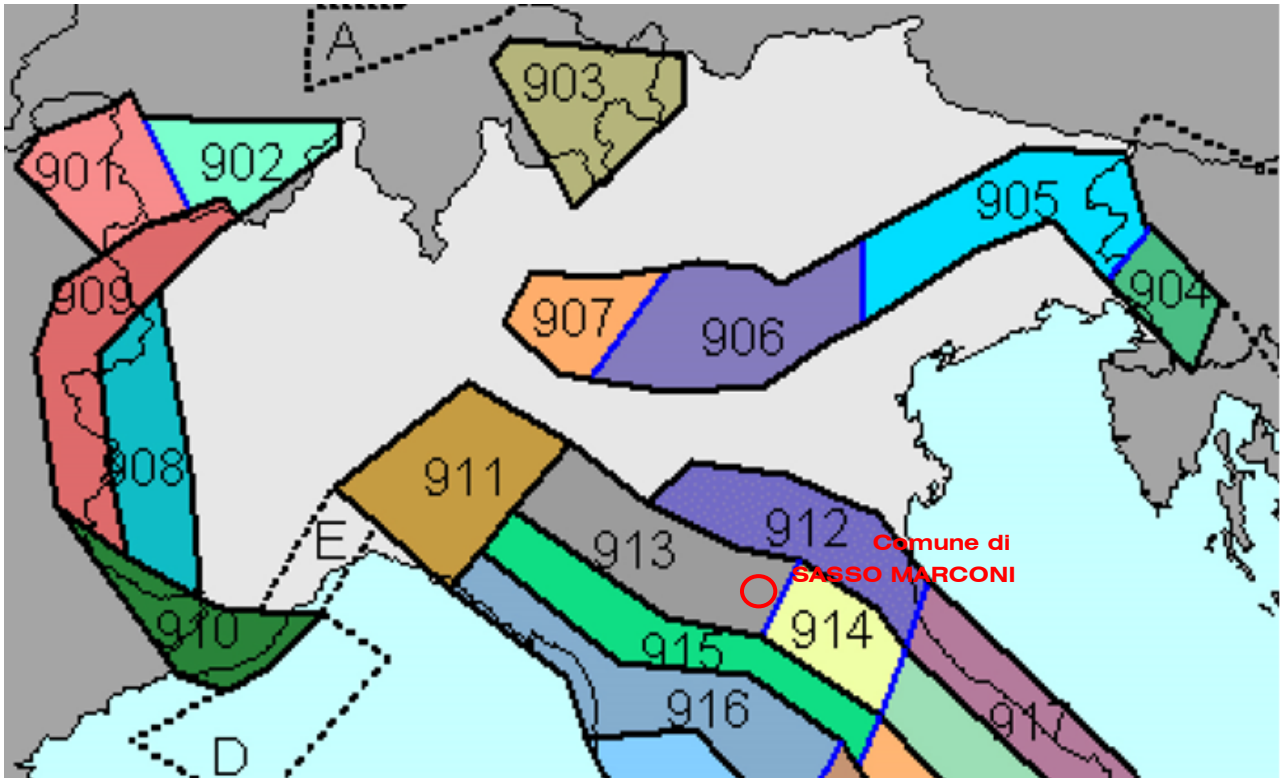


Figura 2-11 - Stralcio della Zonazione sismogenetica ZS9 (2004)



Figura 2-12 - Stralcio del DISS 3.3.0

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	21 di 104



2.4 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 della giunta regionale 23 luglio 2018 n. 1164 aggiorna la classificazione sismica di prima applicazione dei comuni dell’Emilia-Romagna, riclassificando il territorio. Secondo tale aggiornamento, come indicato in (Figura 2-13), il comune di Sasso Marconi, è stato identificato in zona 3 (a sismicità bassa), cui corrispondono valori di accelerazione di picco orizzontale del suolo (a_g), con probabilità di superamento del 10% in 50 anni, compresi tra $0,05 \cdot g$ e $0,15 \cdot g$ (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.

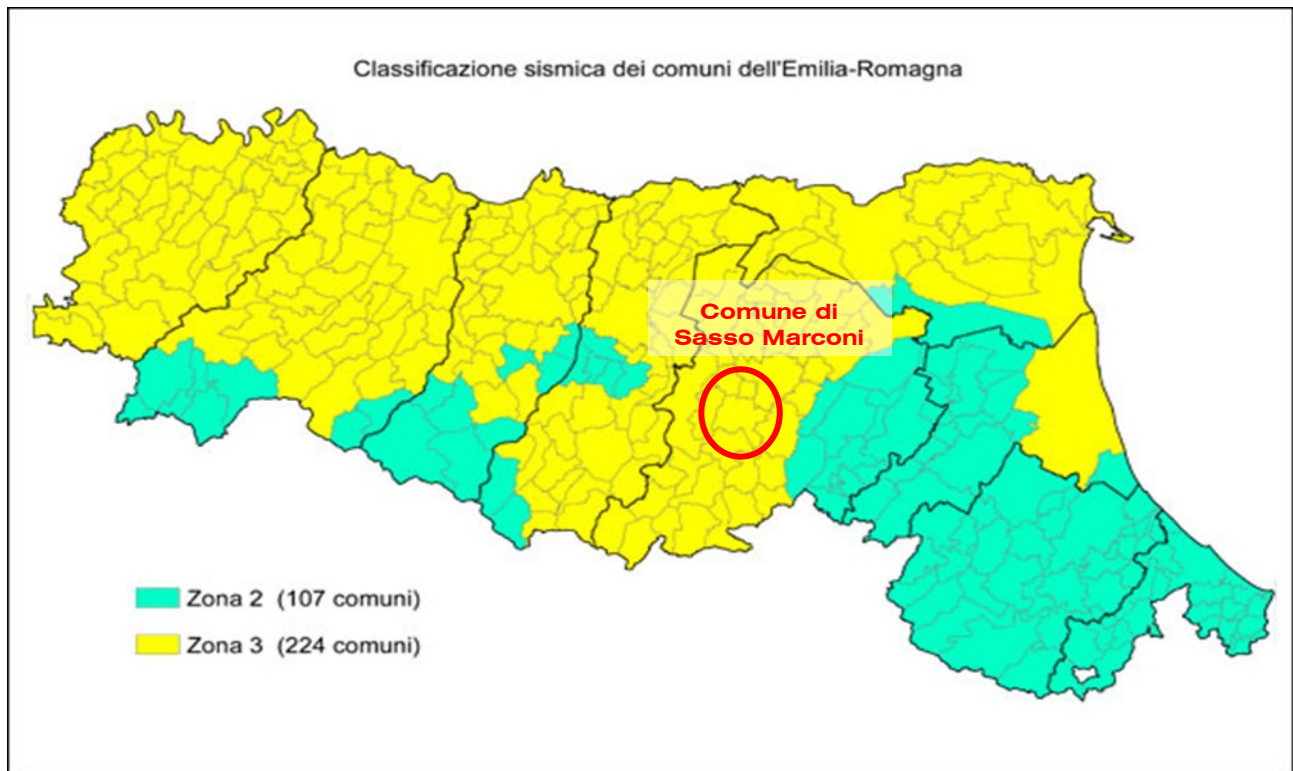


Figura 2-13 - Classificazione sismica dei Comuni della Regione Emilia-Romagna

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	22 di 104



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 Sasso Marconi valori di accelerazione (a_g) con probabilità di superamento del 10% in 50 anni compresi tra: $a_g = 0,150$ e $0,175$ g (ricavato dalle mappe interattive di pericolosità sismica dell'Istituto di Geofisica e Vulcanologia - INGV, cfr. Figura 2-14).

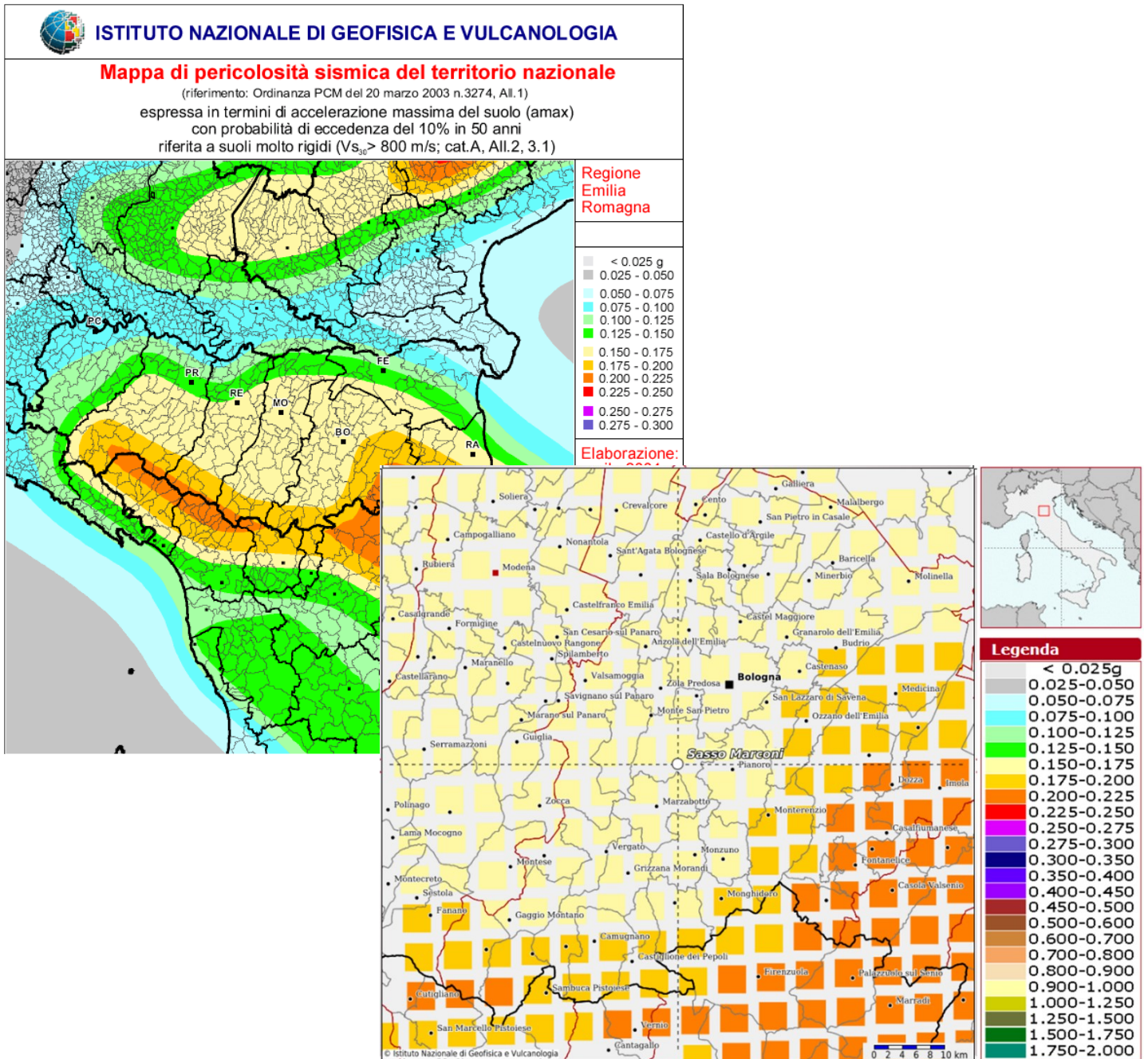


Figura 2-14 - Stralcio della mappa di pericolosità sismica ripreso dal sito dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	23 di 104



2.5 Il rischio sismico definito nel PTM della Città Metropolitana di Bologna

Il Piano Territoriale Metropolitan (PTM) è uno strumento nuovo, approvato con Delibera del Consiglio Metropolitan n.16 del 12/05/2021, che raccoglie l’eredità del Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (PTCP) e disegna gli scenari di sviluppo della Città Metropolitana di Bologna.

Relativamente agli aspetti sismici, già la Tavola 2.C del PTCP costituiva il risultato del primo livello di approfondimento, richiesto dalla DAL n.112/2007, definendo zone omogenee di pericolosità sismica locale, rispetto alle quali venivano dettate specifiche limitazioni d’uso ai fini urbanistici e indicazioni sugli eventuali approfondimenti richiesti alla pianificazione comunale.

Analogamente, all’interno del Quadro Conoscitivo del PTM, è inserita la Tavola 4 “*Carta di area vasta delle aree suscettibili di effetti locali*”, che comprende tutto il territorio di competenza della Città Metropolitana di Bologna, operando una prima classificazione dei terreni sulla base degli effetti locali attesi in caso di evento sismico e indicando, per ciascuna classe, gli approfondimenti che devono essere effettuati a supporto degli strumenti di pianificazione successivi.

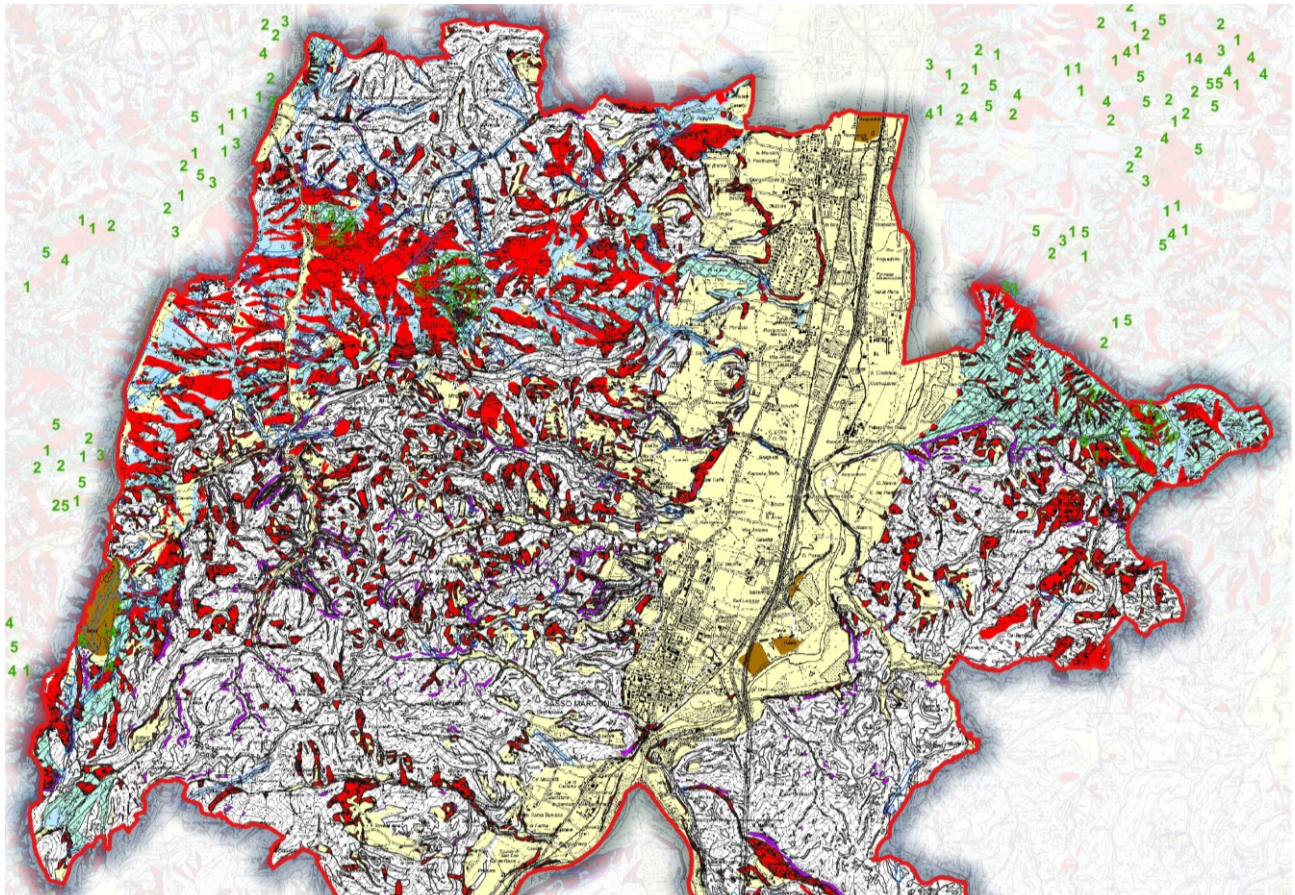
Infatti, tale elaborato cartografico, di cui si riporta uno stralcio, relativo al territorio comunale di Sasso Marconi in Figura 2-15, identifica gli scenari di pericolosità sismica locale dell’intero territorio metropolitan e fornisce le prime indicazioni sui limiti e sulle condizioni di sicurezza per orientare le scelte di pianificazione alla scala comunale verso ambiti meno esposti alla pericolosità sismica. Rappresenta, dunque, un documento di attenzione e indirizzo per le elaborazioni richieste agli strumenti urbanistici comunali (come il presente studio di microzonazione) e per la Valutazione di Sostenibilità Ambientale e Territoriale preventiva delle singole scelte di pianificazione.

Ovviamente, il PTM è stato adeguato alle modifiche normative intervenute in materia (vedi, in particolare, la DGR n. 630/2019 “Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica. Artt. 22 e 49 LR 24/2017”), tenendo conto degli ulteriori elementi conoscitivi ricavati dagli studi di MS comunali o forniti dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna.

Di seguito sono elencati i principali aggiornamenti effettuati:

- revisione cartografica delle aree instabili e potenzialmente instabili dell'Appennino bolognese basata sull'Inventario del Dissesto (cfr. SGSS RER) e sugli elementi conoscitivi desunti dai Piani di Bacino (cfr. Autorità di bacino distrettuale del Fiume Po);
- revisione cartografica della distribuzione dei corpi ghiaiosi affioranti e sepolti nelle aree di conoide alluvionale, ovvero lungo il margine appenninico-padano e nell'alta pianura, basata su nuovi elementi conoscitivi desunti dalla Banca dati del SGSS RER;
- revisione cartografica delle zone potenzialmente soggette a liquefazione basata sulle ulteriori risultanze emerse dagli studi di MS comunali nelle aree urbanizzate/urbanizzabili;
- revisione complessiva delle "zone di attenzione" con l'obiettivo di ulteriore semplificazione sia in termini di riduzione del numero di zone, sia in termini di adeguamento delle norme ad esse associate.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	24 di 104



Aree suscettibili di effetti locali

- S - Substrato rigido affiorante/subaffiorante**
Substrato lapideo o ben cementato, affiorante o sub-affiorante (spessore delle coperture H<3m).
Inclinazione del pendio $\leq 15^\circ$
- SP - Substrato rigido affiorante/subaffiorante $15^\circ < i < 50^\circ$**
Substrato lapideo o ben cementato, affiorante o sub-affiorante (spessore delle coperture H<3m).
Inclinazione del pendio $15^\circ < i < 50^\circ$
- N - Substrato non rigido affiorante/subaffiorante**
Substrato prevalentemente pellico o poco consolidato o alterato o fratturato, affiorante o sub-affiorante
(spessore delle coperture H<3m). Inclinazione del pendio $\leq 15^\circ$
- NP - Substrato non rigido affiorante/subaffiorante $15^\circ < i < 50^\circ$**
Substrato prevalentemente pellico o poco consolidato o alterato o fratturato, affiorante o sub-affiorante
(spessore delle coperture H<3m). Inclinazione del pendio $15^\circ < i < 50^\circ$
- AV - Detriti s.l. $i \leq 15^\circ$**
Corpi detritici di varia origine (alluvionale, eluvio-colluviale, coltri di alterazione, ecc.), generalmente a
granulometria mista. Spessore della coltre H<3m. Inclinazione della superficie topografica $\leq 15^\circ$
- B - Depositi di margine appenninico-padano**
Depositi prevalentemente grossolani (ghiate, ghiale sabbiose, sabbie ghiaiose) di conoide alluvionale, di
spessore H<5m, sepolti (profondità >3m da p.c.) e depositi di interconide
- C - Sedimenti prevalentemente fini di pianura**
Depositi coesivi prevalenti (limi, limi argillosi, argille)
- PS0 - Substrato affiorante/subaffiorante $i \geq 50^\circ$**
Substrato affiorante o sub-affiorante (spessore delle coperture H<3 m). Inclinazione del pendio $i \geq 50^\circ$
- F - Zona di attenzione per instabilità di versante $i \leq 15^\circ$**
Corpo di frana (attiva, quiescente e stabilizzata). Spessore della coltre H<3m. Inclinazione della superficie
topografica $\leq 15^\circ$
- FP - Zona di attenzione per instabilità di versante $i > 15^\circ$**
Corpo di frana (attiva, quiescente e stabilizzata), accumuli detritici di versante s.l., depositi alluvionali
e riporti antropici. Spessore della coltre H<3m. Inclinazione della superficie topografica $i > 15^\circ$
- D - Zona di intensa fratturazione/cataclastica**
Fascia di territorio con rocce intensamente fratturate a cavallo di una faglia
- G - Zona di attenzione per cavità sotterranee**
Zone in cui possono essere presenti cavità ipogee, anche estese, riempite o meno (depositi evaporitici
messiniani, sabbiosi plio-quadernani, ecc.)
- R - Zona di attenzione per accumuli di origine antropica**
Riempimenti di ex cave riempite, discariche, depositi di terre di scavo, terreni di riporto
- L - Zona di attenzione per instabilità da liquefazione/densificazione**
Successioni di pianura con intervalli granulari (limi sabbiosi, sabbie, sabbie ghiaiose), almeno metrici,

Figura 2-15 - Stralcio della Tavola 4 – Carta di area vasta delle aree suscettibili di effetti locali del PTM della Città Metropolitana di Bologna

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	25 di 104



3. ASSETTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO DELL'AREA

3.1 Inquadramento geologico

L'assetto geologico strutturale del territorio comunale di Sasso Marconi è quello tipico del primo contrafforte appenninico, la zona in cui la catena passa da un contesto collinare ad uno montuoso. Questa zona, di difficile perimetrazione, costituisce un importante "tramite" morfologico tra catena e pianura, dove le valli fluviali ricevono il massimo della portata di deflusso ed al cui limite estremo si forma l'apice della conoide che prelude la pianura.

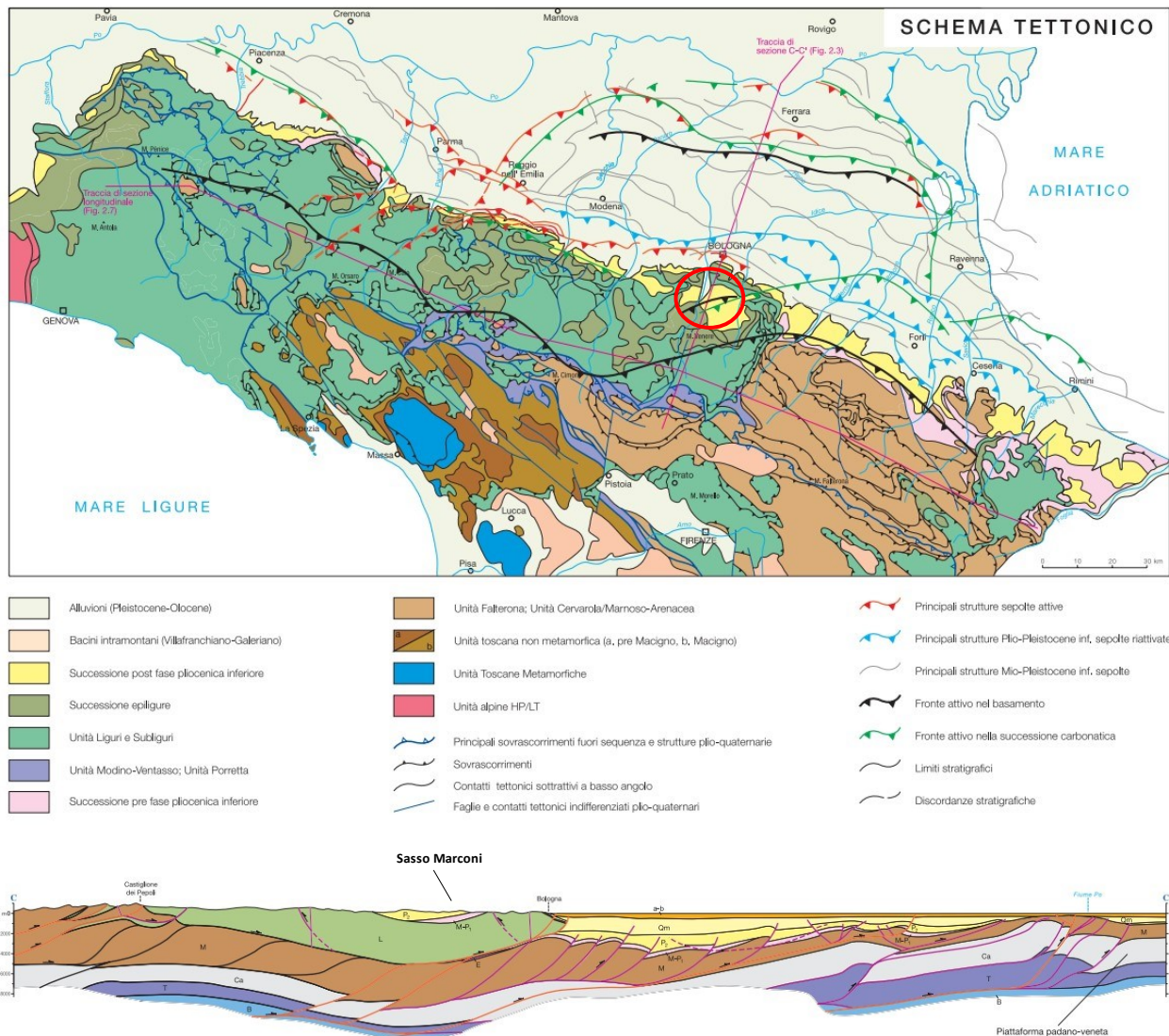


Figura 3-1 - Schema tettonico del territorio emiliano-romagnolo, tratto dalle "Note Illustrative della Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna" ed. 2004

La catena appenninica, in sintesi, è costituita da varie unità tettoniche alloctone, ovvero originate in zone paleogeografiche diverse, sradicate e impilate una sull'altra da sud

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	26 di 104



verso nord, a seguito dell'orogenesi che, a partire dall'Oligocene (circa 30 milioni di anni fa), ha portato alla strutturazione dell'Appennino settentrionale.

L'evoluzione del settore di margine appenninico-padano in esame è legata all'attività dei *thrust* del fronte pedappenninico (P.T.F.). Mentre la strutturazione dell'Appennino emerso è avvenuta principalmente in età neogenica (Miocene superiore-Pliocene inferiore), la principale attività tettonica del suo margine, ovvero del suo fronte deformato e sepolto, è prevalentemente attribuita al Pliocene medio-superiore e Quaternario.

Nello specifico, nell'intorno del Comune di Sasso Marconi, facendo riferimento alla "Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna ed aree limitrofe" (riproposta in Figura 3-1), la porzione bolognese di catena in esame è caratterizzata da una dorsale a direzione appenninica denominata "Contrafforte Pliocenico", elemento strutturale e geomorfologico che caratterizza e segna appunto il passaggio alla montagna. Dal punto di vista strutturale si tratta di una grande sinclinale, con piano assiale e direzione circa ESE-WNW, ai cui fianchi si dispongono i sedimenti miocenici la cui deformazione tettonica ne ha provocato la fratturazione; il nucleo della sinclinale è invece occupato dalle formazioni plioceniche.

Il territorio ed il paesaggio fisiografico in esame è fortemente condizionato dalla sinclinale per le sue componenti montane e collinari e dalla sua interruzione causata dall'imponente azione del fiume Reno.

Nel Comune di Sasso Marconi si distinguono, infatti, due settori con caratteristiche molto differenti: la zona di fondovalle del Reno, densamente urbanizzata, che si estende da sud a nord lungo la porzione centrale del comune, a partire dalla confluenza con il corso del torrente Setta, e la zona collinare, compresa tra la bassa valle del Reno e parte del bacino idrografico del Lavino, a ovest, e quella compresa tra la Val di Setta e Pianoro, a est.

Dal punto di vista geologico, l'area comunale e le zone ad essa circostanti sono attribuibili essenzialmente alle Unità Liguri, con la relativa copertura della Successione Epiligure che si chiude con la deposizione post-evaporitica della Successione Neogenico-Quaternaria del Margine Appenninico Padano (cfr. Figura 3-2).

Le Unità Liguri mostrano una deformazione interna molto maggiore rispetto a quanto osservabile nelle formazioni della sovrastante successione epiligure. I complessi rapporti tettonici e le ridotte dimensioni degli affioramenti di litozone delle subliguri inglobate nelle unità liguri, in localizzate zone sono individuati come *melanges* tettonici (Bettelli et alii, 1989).

Le Successioni Epiliguri che sovrastano e sigillano, in modo non continuo, le unità liguri, si sono disposte in corrispondenza di aree relativamente più basse, nelle quali processi tettonici ne hanno obliterato i rapporti della originaria sovrapposizione stratigrafica per tettonica disgiuntiva neogenica quaternaria.

In sintesi, le unità litostratigrafiche che costituiscono la fascia del medio appennino bolognese al quale appartiene il territorio di Sasso Marconi sono attribuite, dall'alto in basso in senso stratigrafico, a:

 EN GEO S.r.l. <small>ENGINEERING GEOLOGY</small>	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	27 di 104



- Depositi Quaternari Continentali
- Successione Neogenico-Quaternaria del Margine Appenninico Padano
- Successione Epiligure
- Dominio ligure
 - Successione della Val Lavino
 - Successione della Val Rossena
 - Formazioni Pre-Flysch

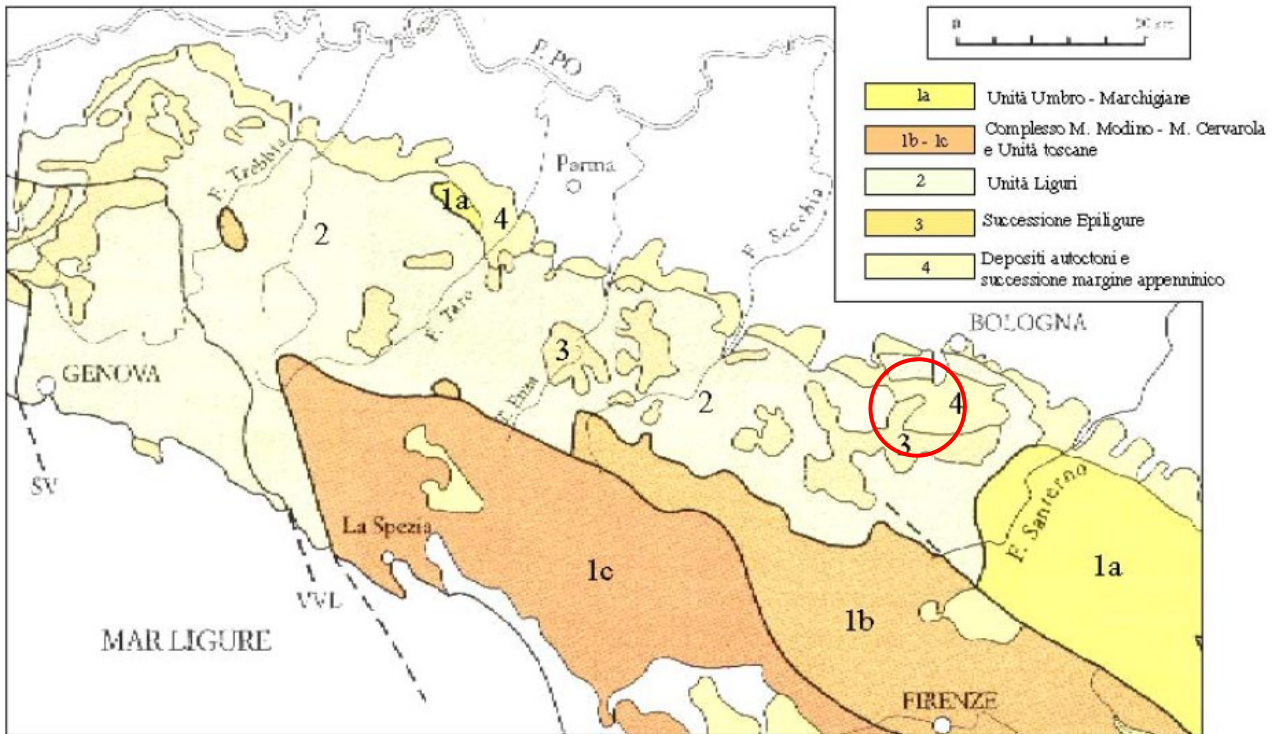


Figura 3-2 - Schema geologico semplificato dell'Appennino settentrionale nel quale vengono indicati i principali protagonisti della struttura geologica del territorio emiliano-romagnolo. Le linee più spesse indicano i contatti tettonici più importanti (Mutti et al., 1975, semplificata)

In conformità con quanto assunto dal Servizio Geologico e cartografico della Regione Emilia-Romagna, il quaternario continentale è riferibile a due principali e successivi cicli deposizionali che rientrano nella classe delle Sequenze Deposizionali *sensu Mitchum et al.* (1977), denominate gerarchicamente come segue:

- Supersistema del Quaternario Marino, costituito da terreni parali e marini depositi tra il Pliocene superiore e il Pleistocene medio.
- Supersistema Emiliano-Romagnolo, costituito da depositi di ambiente continentale depositi a partire da 800.000 anni BP.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	28 di 104



Attraverso lo studio dei profili sismici, delle analisi di facies dettagliata di sezioni affioranti e pozzi per la ricerca di idrocarburi (studi RER & ENI-Agip, 1998), il Supersistema Emiliano-Romagnolo è stato suddiviso in SD minori denominate, Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI), e Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES).

Queste due unità sono separate, in corrispondenza del margine appenninico, da una superficie di discontinuità, spesso con discordanza angolare ed erosione, testimonianza di una fase tettonica regionale, databile 450.000 anni BP.

Il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore risulta, a sua volta, suddiviso in cinque subsistemi identificabili in affioramento mediante caratteristiche morfo-pedostratigrafiche: si tratta, infatti, di depositi di piana intravalliva e conoide alluvionale, terrazzati, le cui ultime superfici deposizionali, ora relitte, poste a quote diverse e separate da scarpate erosive, presentano evoluzione pedostratigrafica differente.

Gli stadi sedimentari di questi subsistemi risultano principalmente legati al succedersi delle oscillazioni climatiche avvenute nel quaternario e in misura minore alla modesta attività tettonica rilevata.

Ciascun subsistema è stato deposto per un arco temporale di 125.000-128.000 anni, corrispondente alla durata di un ciclo glaciale. Al suo interno, ad una fase iniziale di intensa sedimentazione di materiale per lo più grossolano, segue un periodo contraddistinto da prevalente erosione e minore deposizione di materiale più fine (argilla e limo).

Con riferimento al Comune di Sasso Marconi, i sedimenti quaternari sono disposti, con direzione antiappenninica, lungo il grande e complesso fondovalle del fiume Reno, e in modo e quantità molto subordinata nel fondovalle della piccola valle dell'Olivetta (affluente del torrente Lavino), posta nel settore nord-occidentale del comune.

La morfologia a "terrazzi" delle fasce vallive rappresenta la storia evolutiva del fiume Reno: ogni ordine di terrazzi è formato da depositi alluvionali abbandonati da una lunga fase sedimentaria interrotta dalla riattivazione erosiva, e conseguente approfondimento vallivo. In tal modo i vari ordini di terrazzi (almeno una ventina lungo la valle del Reno: Amorosi et *alii*, 1996) rappresentano l'evoluzione di questo settore di catena appenninica.

Nel complesso i depositi superficiali, nel **settore di fondovalle e intravallivo** del territorio comunale, appartengono sempre al **Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore** della **Successione Neogenico-Quaternaria del Margine Appenninico-Padano** e, più precisamente, ai seguenti Subsistemi:

Subsistema 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

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	29 di 104



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 Subsistema 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).

Subsistema di Villa Verucchio (Pleistocene superiore)

Viene distinta l'Unità di Vignola:

Unità di Vignola

Nei settori intravallivi ghiaie passanti a sabbie e limi organizzati in alcuni ordini di terrazzi alluvionali. Limite superiore dato da un suolo non calcareo di colore bruno scuro. Negli sbocchi vallivi prevalenti ghiaie caratterizzate da un suolo non calcareo spesso sino a 2 metri circa. Limite inferiore erosivo. L'unità risulta meno evidente causa la non continuità di affioramento tra i settori intravallivi e quelli di margine appenninico.

Subsistema di Bazzano (Pleistocene medio)

Nei settori intravallivi ghiaie passanti a sabbie e limi organizzati in alcuni ordini di terrazzi alluvionali. Limite superiore costituito da un suolo non calcareo di colore bruno scuro. Negli sbocchi vallivi: ghiaie passanti a sabbie e limi, caratterizzati al tetto da un suolo non calcareo di colore bruno giallastro o bruno scuro sovrastante un suolo sviluppato su ghiaie di colore bruno. Spessore complessivo dell'alterazione fino a 7 metri circa. Limite inferiore erosivo. Ben affiorante in sinistra idrografica del fiume Reno.

Subsistema di Torre Stagni (Pleistocene medio)

Ghiaie passanti a sabbie e limi organizzati in alcuni ordini di terrazzi alluvionali. Limite superiore dato da un suolo non calcareo di colore bruno giallastro o bruno scuro spesso sovrastante, negli sbocchi vallivi, un suolo sviluppato su ghiaie di colore bruno scuro rossastro o bruno rossastro. Spessore massimo 15-20 m.

Passando alla **zona collinare**, affiorano le seguenti unità:

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	30 di 104



Successione Post-evaporitica del Margine Padano-Adriatico

Argille Azzurre (Pliocene inferiore-medio)

Marne argillose e siltose, talora sabbiose a scarsa differenziazione granulometrica, spesso a stratificazione poco evidente per bioturbazione. Nella parte inferiore della formazione localmente sono presenti sottili livelli di biocalcareni fini e siltiti giallo, o ocra, se alterate, sottilmente laminate

litofacies arenacea

Costituita da strati arenacei, talora conglomeratici, generalmente spessi e molto spessi, frequentemente amalgamati, a geometria lenticolare. Lo spessore massimo è di qualche decina di metri

Formazione di Monte Adone (Pliocene medio-sup – Pleistocene inf.?)

Prevalenti arenarie, generalmente poco cementate, con abbondante matrice siltoso-argillosa e subordinati conglomerati, in strati da medi a banchi, alternate a peliti sabbiose con stratificazione da sottile a spessa, a geometria talora tabulare, talora lenticolare. Verso l'alto aumenta la frequenza delle peliti.

Vengono distinte le 2 unità:

Membro delle Ganzole

Areniti fini e subordinate peliti sabbiose bioturbate in strati da medi a molto spessi; la potenza è di circa 200 metri; la frequenza e lo spessore delle peliti aumentano verso l'alto, dove è possibile distinguere una litofacies pelitico-arenacea

Membro di Monte delle Formiche

Areniti e subordinati conglomerati in strati da medi a molto spessi; potenza di poche decine di metri. Ambiente di sedimentazione variabile da fluviale a marino costiero e piattaforma

Formazione di Monterumici (Pliocene inf.)

Conglomerati, sabbie e peliti bioturbate generalmente poco cementate e con cementazione differenziale ("cogoli"). Questa formazione è stata suddivisa in 2 membri:

Membro di Cà di Mazza

Argille, spesso sabbiose e sabbie in strati da sottili a molto spessi, con intercalazioni di ghiaie e conglomerati in strati spessi e molto spessi a geometria tabulare e lenticolare.

Membro di Scascoli

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	31 di 104



Conglomerati eterometrici con matrice sabbiosa, scarsamente cementati, in strati lenticolari spessi e molto spessi, talora gradati, con ciottoli embriciati; la stratificazione è incrociata concava.

Successione epiligure

Formazione del Termina (Tortoniano)

Marne argillose e siltose, talora debolmente sabbiose, grigio-scure, fossilifere con rari strati medi di arenite carbonatiche giallastre e sporadici strati medi e sottili di arenarie gradate. Nella parte alta sono presenti rari livelli di peliti nerastre con lamine piano-parallele, bituminose, alternate a biosiltiti grigio chiaro o biancastre. La potenza massima è di alcune centinaia di metri. Il limite inferiore è stratigrafico con la Formazione di Cigarellino.

È stato distinto il membro:

Membro di Montebaranzone – litofacies argillosa

Torbiditi arenaceo-pelitici in cui si intercalano, nella parte alta, livelli calcarei. Il rapporto tra arenarie e peliti è generalmente >1; sono presenti intervalli decametrici di strati da medi a molto spessi con base erosiva, alternati a intervalli di strati della stessa potenza caratterizzati da stratificazione sottile. Nella parte medio-bassa sono presenti lenti di breccie argillose sedimentarie epiligure.

Formazione di Cigarellino (Langhiano inf.-Serravalliano sup.)

Marne siltoso-sabbiose, talora argillose, grigie o beige se alterate, bioturbate e fossilifere; sono presenti sia bioclasti che biosomi appartenenti perlopiù a Lamellibranchi e Gasteropodi, talora ad Echinidi. Generalmente l'assenza di livelli grossolani e la bioturbazione rendono impercettibile la stratificazione, che diventa più evidente quando le peliti si alternano ad arenarie siltose medio-fini. Verso l'alto, affiorano intervalli di strati arenaceo-pelitici con A/P<1.

È stata distinta la seguente unità:

Membro di Monte Luminasio

Arenarie risedimentate, fini e medie, localmente biocalcareni e litareniti grossolane e microconglomeratiche, alternate a peliti siltose grigie. Intercalazioni metriche e decametriche di peliti sabbiose. Potenza da 40 a 150 m circa.

Formazione di Pantano (Burdigalliano sup.-Langhiano inf.)

Areniti siltose fini e finissime, grigie (beige se alterate), alternate a peliti marnose e siltose grigio-chiare; la stratificazione è poco marcata o addirittura impercettibile a causa dell'intensa bioturbazione; sono presenti resti di Echinidi, Gasteropodi e Lamellibranchi. Lungo il torrente Olivetta all'altezza di Mezzariva si intercalano strati arenacei risedimentati

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	32 di 104



medi, mal strutturati, di colore marrone nocciola. La sedimentazione è di ambiente di piattaforma. La potenza è di circa 500 m. Il limite inferiore è netto, discordante, sulla Formazione di Cigarellino.

È stato distinto un membro:

Membro di Calvenzano

Areniti ibride da medie a fini, localmente grossolane in strati da medi a molto spessi, risedimentate, alternate ad arenarie siltose e siltiti marnose grigiastre con A/P < 10. Alla base è stata distinta una litozona arenitica con A/P > 10.

Formazione di Contignaco (Aquitano-Burdigalliano)

Marne siltose, siltiti o arenarie risedimentate fini, grigie, a luoghi silicizzate; stratificazione da sottile a media, tabulare. A luoghi vulcanoclastiti grigio verdi o nerastre di spessore centimetrico o decimetrico. Potenza massima di circa 150 m.

Brecce Argillose della Val Tiepido-Canossa (Aquitano)

Brecce sedimentarie a matrice argillosa grigia con clasti eterometrici di calcilutiti, calcari marnosi, marne, siltiti e arenarie. Stratificazione generalmente distinta. Potenza massima fino a 200 m circa.

Formazione di Antognola (Chattiano-Burdigalliano inf.?)

Marne e marne argillose, grigio-verdognole, a luoghi siltose; a luoghi sottili strati arenacei a grana fine. È presente un membro arenaceo che localmente rappresenta la quasi totalità della formazione. Potenza massima di alcune centinaia di metri. In discontinuità sulle Marne di Monte Piano.

Marne di Monte Piano (Bartoniano-Rupeliano inf.)

Argille marnose e marne rosse, rosate, grigio chiare e verdognole; subordinate intercalazioni di arenarie fini, di siltiti nerastre e di calcari marnosi. Potenza di poche decine di metri. Contatto inferiore discordante sulle unità liguri, con locali interdigitazioni.

Formazione di Loiano (Luteziano sommitale - Priaboniano)

Arenarie arcose risedimentate da fini a molto grossolane, a luoghi microconglomeratiche, grigio-biancastre. Strati da medi a molto spessi fino a massicci, tabulari, con a tetto subordinate peliti scure; a luoghi presenze di brecce e conglomerati. Potenza massima di oltre 700 m circa.

Unità Liguri

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	33 di 104



Formazione di Poggio (Daniano? - Ypresiano)

Argille rosse, grigio scure e verdastre, con subordinati strati sottili di arenarie torbiditiche fini grigie; sono presenti spezzoni di strati calcarenitici e marnosi. Stratificazione mal definita o sottilissima. Alla base o intercalato in lenti di modesto spessore è stato distinto un membro, a luoghi prevalente. Potenza massima di alcune decine di metri.

Formazione di Monghidoro (Maastrichtiano sup.-Thanetiano)

Alternanze torbiditiche arenaceo-pelitiche in strati da sottili a molto spessi e eccezionalmente in banchi plurimetrici. Alla base degli strati arenarie medie o fini, più raramente grossolane, grigie o brune, passanti a peliti scure. Subordinati strati da medi a molto spessi di calcilutiti marnose grigio chiare, a base finemente detritica, più frequenti verso la base. Potenza di circa 1000 m.

Argille Varicolori della Val Samoggia (Cretacico inf.-Paleocene?)

Argille e argilliti grigio scure, nerastre, verdastre e rosse con intercalazioni di arenarie risedimentate e siltiti brune, di calcilutiti verdastre e grigio chiare e di marne biancastre. Localmente brecce poligeniche grigie a matrice argillosa. Potenza stimabile in oltre 200 m. Contatti esclusivamente tettonici con le formazioni circostanti.

Nel settore di collina sono inoltre presenti depositi di versante e depositi di frana (in evoluzione o quiescente), connessi a fenomeni gravitativi descritti nel successivo paragrafo 3.2.

3.1.1 Geologia delle aree studiate

Le aree maggiormente urbanizzate oggetto del presente studio si sviluppano principalmente in corrispondenza del settore vallivo di Sasso Marconi, nel complesso fondovalle del fiume Reno e in quello della piccola valle dell'Olivetta (affluente del torrente Lavino).

Dal punto di vista stratigrafico, tali aree sono costituite da depositi quaternari appartenenti all'Alloformazione Emiliano-Romagnola Superiore (più specificatamente, al Subsistema di Ravenna, al cui interno viene distinta l'Unità di Modena, e all'Unità di Vignola del Subsistema di Villa Verucchio) sovrastanti il substrato geologico.

Le indagini geognostiche e l'approccio analitico proprio di questa fase della microzonazione sismica hanno consentito di definire che tali depositi quaternari sono caratterizzati, generalmente, da una coltre di sedimenti alluvionali fini, costituiti prevalentemente da limi sabbiosi e limi argillosi, che ricopre sedimenti a tessitura più grossolana (ghiaie in matrice sabbiosa e limosa). Essa può raggiungere uno spessore massimo di circa 15 metri.

Quanto al substrato geologico, si è osservato che, nella porzione settentrionale del Comune, a nord del Capoluogo, è riconducibile, essenzialmente, a formazioni di natura torbiditica della Successione Epiligure, con alternanze di livelli marnoso argillosi, siltosi ed

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	34 di 104



arenacei; diversamente, in corrispondenza degli abitati di Sasso Marconi e Fontana, che si sviluppano nella porzione centro meridionale del fondovalle, si riscontra la presenza di litotipi perlopiù arenacei, talvolta conglomeratici, appartenenti alla serie pliocenica di Margine Padano-Adriatico.

3.2 Inquadramento geomorfologico

Il Comune di Sasso Marconi è ubicato al passaggio morfologico tra l'ultimo fronte collinare appenninico e la pianura Padana, nel bacino idrografico del fiume Reno.

Il territorio comunale in esame è prevalentemente collinare, salvo due fasce pianeggianti poste lungo gli alvei dei fiume Reno e del torrente Setta, i due corsi d'acqua principali che lo attraversano da sud a nord.

Altri importanti corsi d'acqua sono il torrente Lavino, che individua all'incirca il limite amministrativo occidentale tra Sasso Marconi e Monte San Pietro e il torrente Olivetta, uno dei principali tributari del Lavino.

Il settore di maggiore interesse dal punto di vista insediativo è il fondovalle del Reno, sul quale si è sviluppata la quasi totalità del centro urbano di Sasso Marconi.

La piana intravalliva del Reno è di limitata ampiezza (al massimo un paio di chilometri), e ai suoi lati si rinvengono numerosi ordini di terrazzi alluvionali, separati da scarpate di altezza compresa tra 10 e 20 m (definiti orli di terrazzi), che documentano il succedersi di fenomeni erosivi e deposizionali avvenuti durante le ultime fasi di sollevamento della catena appenninica.

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.

Nello specifico, si individuano 6 forme di conoide alluvionale relitte sviluppate allo sbocco di piccoli torrenti che solcano le zone di interfluvio (Rio Verde, Rio Secco, Fosse dei Commi, Rio dell'Asino d'Acasio e Rio Bolsenda), parzialmente rielaborate dalle successive fasi evolutive e in connessione idrogeologica indiretta con i terrazzi ed il corso attuale del fiume Reno. Di queste, quattro sono state cartografate a Borgonuovo di Pontecchio, mentre le restanti due forme si individuano a nord del centro abitato del Capoluogo; il loro spessore massimo è di poche decine di metri.

Sui pendii del territorio comunale, vista la dominanza di litologie arenacee, l'incidenza dei movimenti gravitativi è ridotta, come denota l'indice di franosità calcolato pari al 10.7%.

Nel presente studio, per la definizione di tali fenomeni, si è fatto riferimento, principalmente, alla carta geologica in scala 1:10.000 della Regione Emilia-Romagna che ne prevede l'identificazione e la classificazione sulla base dello stato di attività e della tipologia.

Più precisamente, sulla base dello stato di attività, si distinguono solo due classi:

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	35 di 104



- **frana attiva:** movimento gravitativo ritenuto attivo o riattivato (in un settore di corpo di frana quiescente) all'atto dell'indagine fotointerpretativa, ovvero rilevato o confermato da controllo sul terreno; l'attività può trovare conferma anche in dati documentali recenti (pubblicazioni, carte geologiche, relazioni tecniche, ecc.);
- **frana quiescente:** riguarda tutti i tipi di dissesto in cui è possibile desumere, da indizi di natura geomorfologica e considerazioni di evoluzione morfoclimatica del territorio appenninico, la temporanea inattività del corpo di frana e della scarpata principale ad essa connessa.

Infatti, in Comune di Sasso Marconi, non sono mai stati individuati corpi di frana ritenuti inattivi, intesi come fenomeni le cui cause e processi che li hanno generati non sono più presenti o sono stati rimossi.

Quanto alla tipologia, tenendo conto delle classi stabilite dagli ICMS, nel territorio in esame, si sono distinte le seguenti frane:

- Scorrimento: classe in cui sono accorpati gli scivolamenti rotazionali e quelli traslazionali o planari;
- Colata: che può essere di terra o di fango;
- Complessa: data dalla combinazione di due o più movimenti di tipo semplice.

Si è così osservato che fenomeni, prevalentemente di tipo complesso e di colata, sono localizzati, perlopiù, nel settore nordoccidentale del comune, dove sono presenti unità litologiche argillose – argilloso marnose e marnose – marnoso argillose.

A livello altimetrico si segnala che il centro abitato di Sasso Marconi si trova ad un'altitudine di 128 m s.l.m.

La quota massima, nel territorio comunale, è pari a 654 m s.l.m. (cima Monte Adone), mentre la quota minima è di 65 m s.l.m.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	36 di 104



4. INDAGINI ED ANALISI

La prima fase del presente studio è stata contraddistinta dall'acquisizione dei dati pregressi.

Allo scopo è stata effettuata, presso l'Ufficio Tecnico del Comune di Sasso Marconi, una scrupolosa ricerca d'archivio, consultando tutti gli studi geologici allegati alle pratiche edilizie istruite tra il 2000 e il 2021.

Complessivamente sono stati raccolti i risultati delle seguenti indagini geognostiche:

- 27 sondaggi a carotaggio continuo
- 71 prove penetrometriche (tra CPT, CPTU, DPSH, DPM e DL)

e le seguenti indagini geofisiche

- 12 indagini sismiche tipo MASW
- 2 indagini sismiche tipo REMI (*Refraction Microtremors*)
- 14 HVSR

Tutte le indagini sono state digitalizzate e georeferenziate, al fine di consentirne la gestione in ambiente GIS.

In particolare, sia i dati di base che quelli elaborati sono stati organizzati in formato vettoriale (*shapefile*) nel rispetto degli SRAI.

A integrazione dei dati esistenti è stata, quindi, progettata ed eseguita una specifica campagna geognostica e sismica.

Più precisamente, sono state effettuate:

- 41 indagini di sismica passiva mediante tecnica HVSR a stazione singola
- 5 indagini sismiche tipo MASW
- 5 tomografie elettriche (ERT)

Tutte le indagini sopracitate, unitamente alle informazioni presenti in letteratura e ai sopralluoghi in sito, hanno permesso di ricostruire il modello geologico e sismo-stratigrafico delle aree interessate dal presente studio.

Nei successivi paragrafi vengono descritte le prove di nuova esecuzione, per i cui report si rimanda all'Elaborato 7 - Nuove indagini.

4.1 Prove sismiche di tipo HVSR

Ai fini della determinazione della frequenza caratteristica dei suoli sono state eseguite n° 41 prove HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) tramite tromografo digitale.

Le prove sono state condotte utilizzando un sismometro a stazione singola (tromografo digitale con sensori da 2 Hz) in grado di registrare i microtremori lungo le due direzioni orizzontali (X, Y) e lungo quella verticale (Z), di un ampio intervallo di frequenze (0.1-208 Hz) e per una durata sufficientemente lunga (mediamente 20 minuti). Il moto

 EN GEO S.r.l. <small>ENGINEERING GEOLOGY</small>	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	37 di 104



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).

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

A riguardo, nell'Elaborato 7 - Nuove indagini per ciascuna prova è riportato il grafico del rapporto spettrale H/V naturale, in cui si possono osservare picchi caratteristici, in corrispondenza di determinate frequenze (cfr. Figura 4-1).

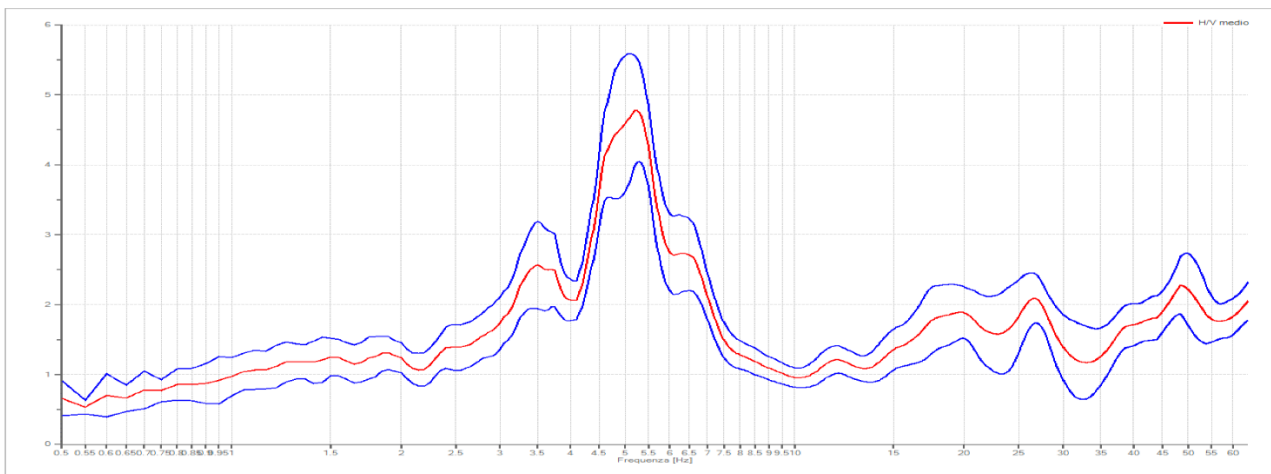


Figura 4-1 - Grafico del rapporto H/V misurato dalla prova 037057P144

Nella seguente Tabella 4-1 sono invece indicate le frequenze corrispondenti ai picchi d'amplificazione individuati.

Codice MS3 ⁸	Picco (Hz)
037057P113	6.40±0.17
037057P114	7.65±0.16
037057P115	9.40±0.16
037057P116	18.30±0.17
037057P117	3.95±0.23
037057P118	7.65±0.18
037057P119	9.20±0.19
037057P120	6.05±0.13
037057P121	3.80±0.18
037057P122	5.25±0.16
037057P123	6.50±0.16
037057P124	3.70±0.12

⁸ Codice da normativa regionale



Codice MS3 ⁸	Picco (Hz)
037057P125	5.40±0.13
037057P126	3.70±0.26
037057P127	4.00±0.28
037057P128	7.10±0.25
037057P129	4.40±0.30
037057P130	4.15±0.23
037057P131	4.75±0.33
037057P132	5.30±0.21
037057P133	5.75±0.35
037057P134	4.75±0.26
037057P135	14.45±0.10
037057P136	9.65±0.22
037057P137	6.70±0.15
037057P138	14.55±0.13
037057P139	4.50±0.34
037057P140	10.00±0.13
037057P141	6.50±0.14
037057P142	17.55±0.15
037057P143	11.35±0.15
037057P144	5.25±0.16
037057P145	17.60±0.18
037057P146	5.35±0.21
037057P147	2.20±0.18
037057P148	3.90±0.19
037057P149	12.15±0.18
037057P150	6.15±0.16
037057P151	3.30±0.11
037057P152	4.70±0.16
037057P166	10.50±0.10

Tabella 4-1 - Riepilogo dei picchi di amplificazione misurati con le nuove prove HVSR

4.2 Prove sismiche di tipo MASW

In 5 punti la cui individuazione è stata condivisa col Comune, sono state svolte indagini sismiche di tipo MASW per misurare la velocità delle onde S nel terreno.

La tecnica MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) è una tecnica 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 del sottosuolo, portano quindi a determinare anche il parametro V_{s30} (velocità media delle onde S nei primi 30 m).

In un mezzo stratificato le onde di superficie danno vita al fenomeno della dispersione, cioè lunghezze d'onda diverse si propagano con diverse velocità di fase e gruppo: le

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	39 di 104



componenti ad alta frequenza (con piccola lunghezza d'onda) "sentono" solamente 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 i 5Hz e i 60 Hz, fornendo informazioni sino alla profondità di circa 30 m a seconda della rigidità del suolo: la profondità massima di penetrazione è determinata dalla relazione fra velocità di propagazione dell'onda e più bassa frequenza identificabile.

Questa tipologia di prospezione si realizza 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.

Nel dettaglio, l'indagine è stata realizzata con un sismografo a massimo 24 canali, utilizzando geofoni verticali con frequenza caratteristica di 4.5Hz posizionati a 2 m l'uno dall'altro; come sorgente è stata utilizzata una mazza da 9 Kg battente su piastra in PVC alla distanza di 5 m dal primo geofono, l'energizzazione è stata eseguita 5 volte e i segnali acquisiti sono stati sommati (*stacking* del segnale) al fine di amplificare il segnale.

L'analisi dei dati acquisiti mediante le prove MASW avviene attraverso le seguenti fasi:

1. Calcolo dello spettro di velocità;
2. Individuazione del modo fondamentale e degli eventuali superiori;
3. *Picking* della curva di dispersione, cioè selezione dei punti che si ritengono appartenere a un determinato modo;
4. Inversione della curva di dispersione e conseguente individuazione del profilo di velocità V_s .

In Figura 4-2 si riporta, a titolo esemplificativo, lo spettro di velocità di un'indagine realizzata con sovrapposto il *picking* del modo fondamentale nonché la curva di dispersione sintetica corrispondente al miglior modello ottenuto e i profili di velocità calcolati (in rosso quelli che presentano miglior fit con la curva di dispersione).

Durante il processo d'inversione il codice di calcolo genera iterativamente modelli la cui curva di dispersione si avvicina sempre più al *picking* eseguito; il numero d'iterazioni che il programma esegue è definito dall'utente. L'accuratezza del modello ottenuto viene definita da due parametri che il software fornisce a fine elaborazione: il *fattore di disadattamento della soluzione (misfit)* e la *percentuale d'errore*, entrambi sono espressione di quanto la curva di dispersione sintetica si avvicina a quella sperimentale.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	40 di 104

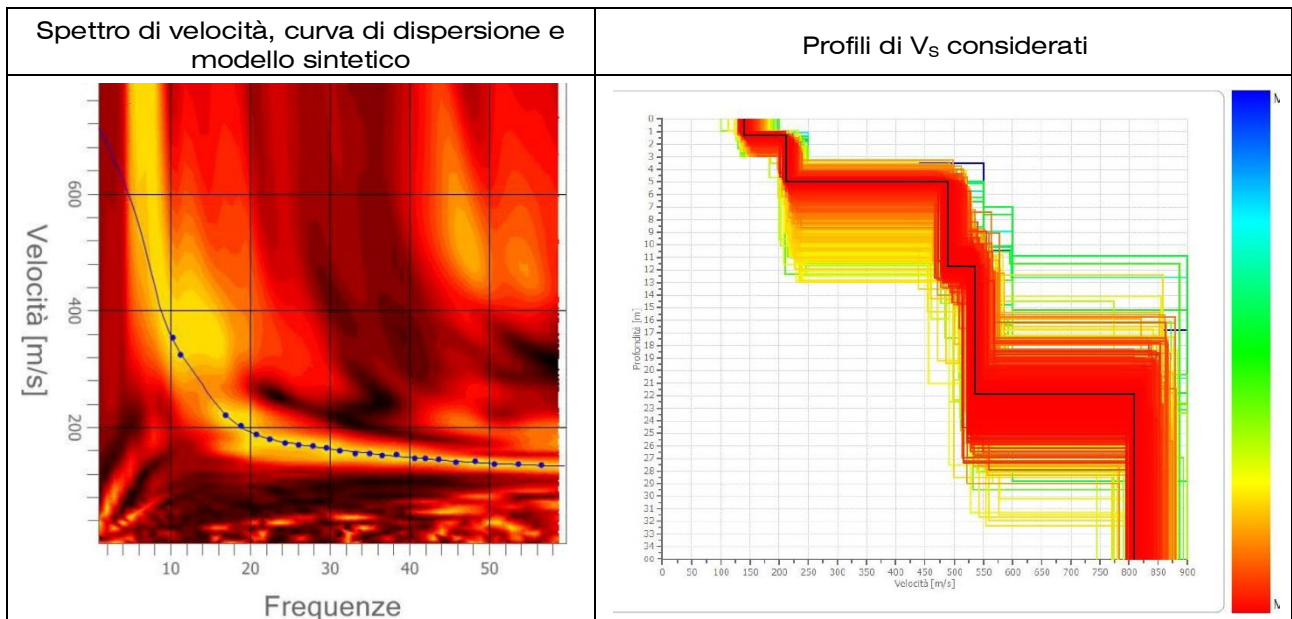


Figura 4-2 - Immagini riassuntive dell'elaborazione da indagine MASW (prova 037057L16)

Dalla prova MASW si ottiene il profilo della velocità media delle onde di taglio V_s per i diversi sismostrati presenti.

In tutti i 5 siti in cui è stata effettuata l'indagine MASW è stata riscontrata la presenza di un *bedrock* sismico (strato caratterizzato da valori di V_s superiori a 800 m/s) a profondità compresa tra -21.00 e -27.00 m circa (cfr. cap. 6).

In Figura 4-3 viene riportato (a titolo esemplificativo) uno dei grafici, in funzione della profondità, delle velocità delle onde S degli strati individuati.



Strato	Profondità [m]	Spessore [m]	Velocità onde di taglio [m/s]
1	3.13	3.13	207.5
2	12.34	9.21	304.3
3	13.56	1.22	458.7
	26.96	13.39	576.3
4	∞	∞	806.0

Valore V_{SH} (H = 26.96 m) = 378.3 m/s

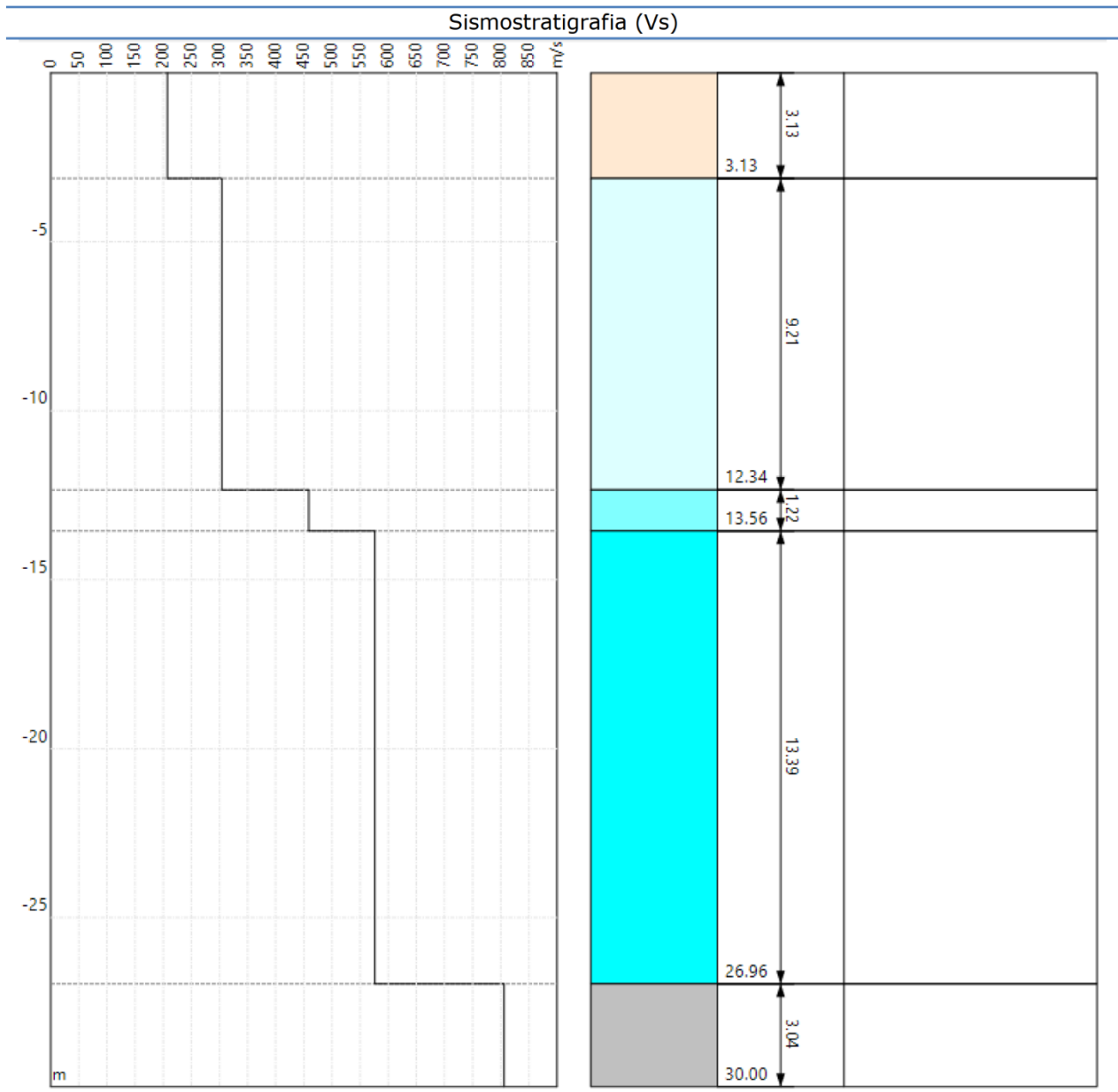


Figura 4-3 - Profilo delle velocità delle onde S della prova 037057L17



4.3 Prove sismiche di tipo ERT

Per migliorare la ricostruzione del modello geologico locale, in corrispondenza dei 5 punti di indagine sismica descritta al paragrafo precedente, sono state effettuate 5 indagini sismiche mediante una prospezione con metodo geoelettrico multielettrodo in tomografia elettrica (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*.

Sono state acquisite 360 misure, per un totale di 360 punti di rilevamento distribuiti uniformemente lungo ogni stendimento di lunghezza pari a 70.5 m (cfr. Figura 4-4).

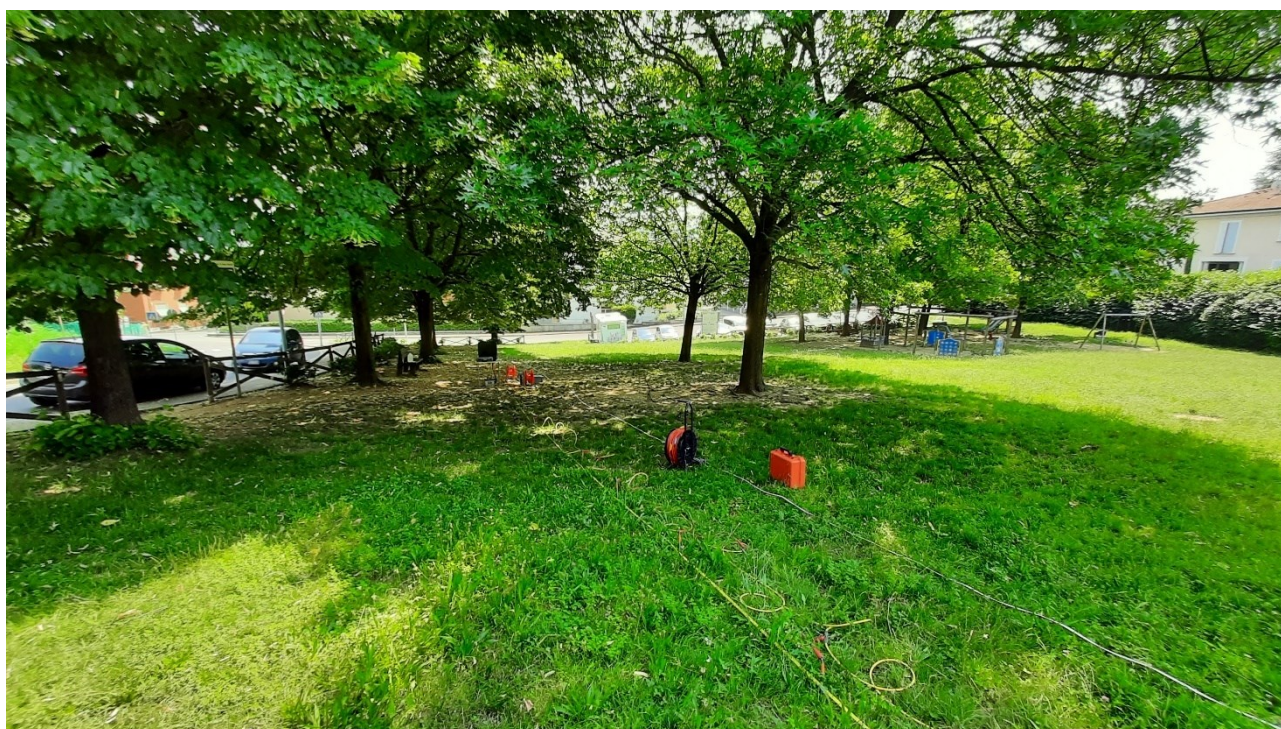


Figura 4-4 - Fotografia raffigurante lo stendimento dei cavi geoelettrici (prova 037057L24)

Dette indagini sono state effettuate con GEORESISTIVIMETRO MAE X612EM+ (<http://www.mae-srl.com>), 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.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	43 di 104

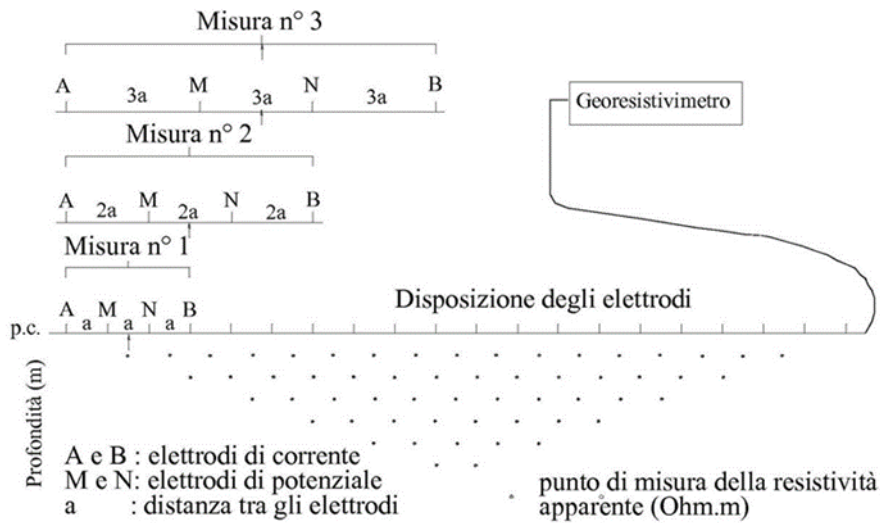


Figura 4-5 - Schema della procedura di acquisizione automatica multielettrodo

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.

In Figura 4-6, si riporta a titolo esemplificativo, un profilo di tomografia elettrica ottenuto.

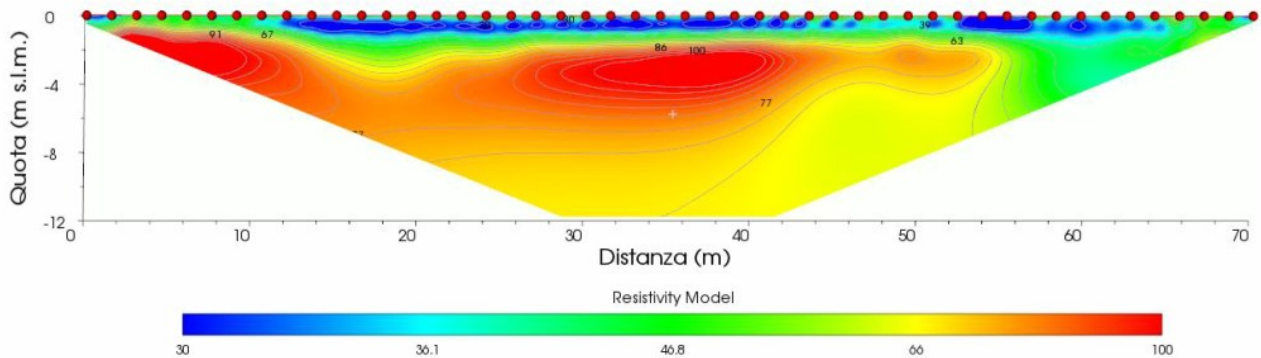


Figura 4-6 - Profilo di tomografia elettrica ottenuto dalla prova 037057L23

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	44 di 104



5. ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE

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 state eseguite analisi di risposta sismica locale su n° 5 verticali, la cui ubicazione è riportata nella seguente Figura 5-1.

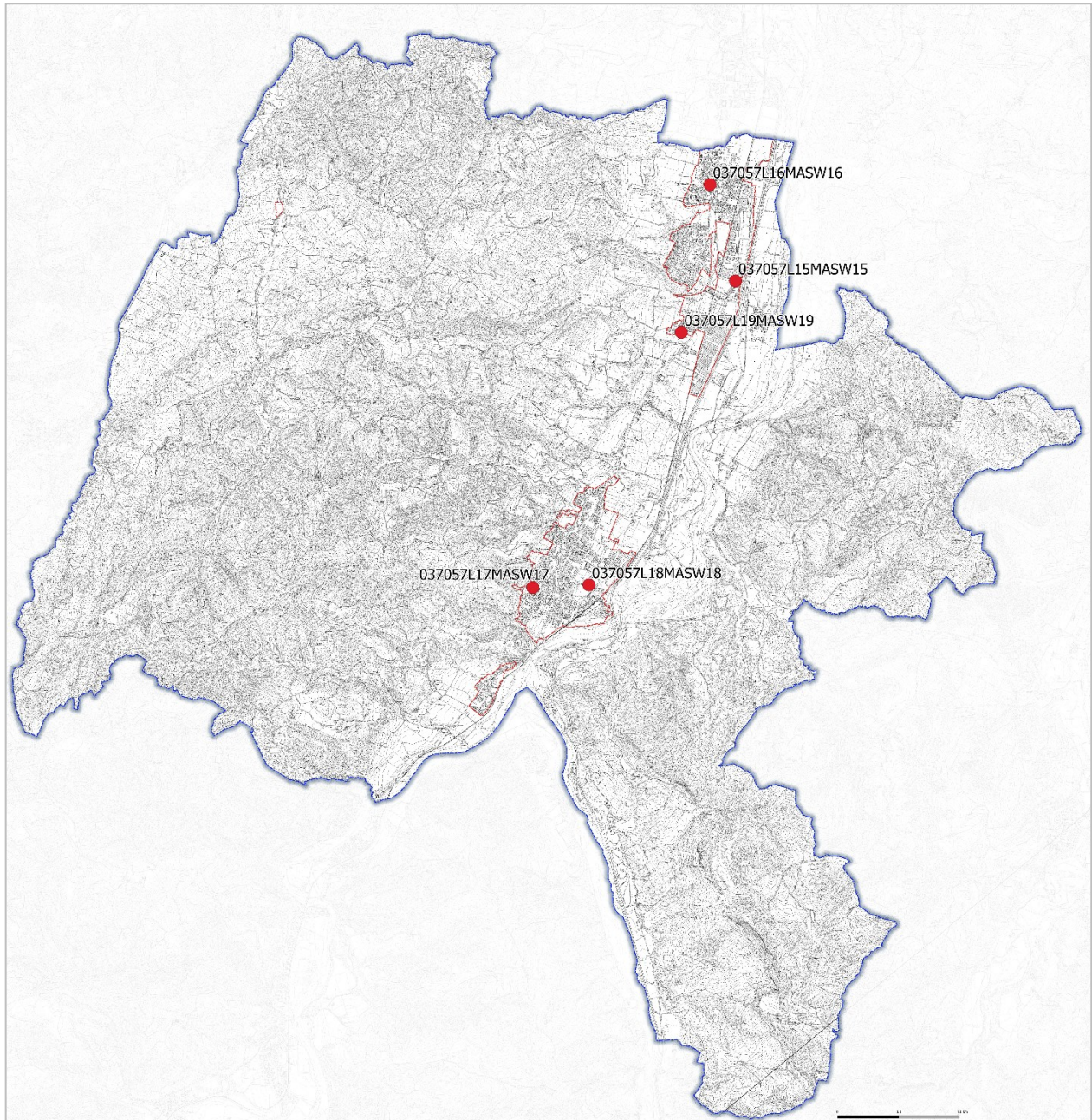


Figura 5-1 - Ubicazione delle verticali utilizzate per l'analisi di risposta sismica locale

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	45 di 104



In corrispondenza di tutte le verticali di analisi è stata eseguita una misura diretta della velocità delle onde S in funzione della profondità, appositamente per il presente studio, tramite indagine sismica di tipo MASW.

Nella seguente tabella si riporta un elenco dettagliato delle verticali di indagine:

Codice MS3 ⁹	Sito	Prova	X ¹⁰	Y ¹⁰
037057L15	Zona artigianale Pontecchio Marconi	MASW 1	203577.6	4926802.1
037057L16	Parco San Massimiliano Kolbe	MASW 2	203249.6	4928072.5
037057L19	Via Pontecchio	MASW 3	202811.5	4926142.0
037057L18	Istituto Professionale B. Ferrarini	MASW 4	201670.4	4922807.2
037057L17	Parco pubblico via Achillini	MASW 5	200888.1	4922807.7

Tabella 5-1 - Elenco delle verticali su cui è stata effettuata la risposta sismica locale in Comune di Sasso Marconi

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:

- 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;
- le indicazioni per il reperimento e l'utilizzo dei segnali di riferimento selezionati.
- Le indicazioni per il calcolo dei valori di $a_{ref,g}$ (10% di probabilità di superamento in 50 anni) di ogni sito indagato;

Per i punti di indagine il parametro $a_{ref,g}$, che varia in funzione del sito indagato, risulta compreso nel seguente intervallo (Tabella 5-2):

$a_{ref,g} (a_g/g)$
$0.150 < a_{ref,g} < 0.175$

Tabella 5-2 - Valori di $a_{ref,g}$ (10% di probabilità in 50 anni)

9 Codice da normativa regionale

10 Coordinate espresse nel sistema WGS84 / UTM zona 33N

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	46 di 104



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"¹¹.

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.

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 le n° 5 verticali che ricadono in Comune di Sasso Marconi (MASW 1 – Zona artigianale Pontecchio Marconi, MASW 2 – Parco San Massimiliano Kolbe, MASW 3 – Via Pontecchio, MASW 4 – Istituto Professionale B. Ferrarini e MASW 5 – Parco pubblico via Achillini) sono stati utilizzati i sismi riferiti al nodo 17173 (cfr. Tabella 5-3).

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.

M _w	Distanza epicentrale	Fattore di scala	File
6.20	29.90	2.13 %	ESM EU.HRZ..HNE.D.19790524.172317.C.ACC.ASC
5.74	12.57	1.40 %	NGA RSN146 COYOTELK_G01320.AT2
5.99	54.21	2.64 %	NGA RSN703 WHITTIER.A A-VAS000.AT2
6.93	83.53	1.56 %	NGA RSN804 LOMAP_SSF205.AT2
6.69	38.07	1.17 %	NGA RSN1091_NORTHR_VAS090.AT2
6.60	31.00	0.66 %	KiKnet SMNH100010061330.EW2
5.90	14.40	2.78 %	ESM IT.SLO..HGE.D.20161026.191806.C.ACC.ASC

Tabella 5-3 – Sismi estratti riferiti al nodo 17173

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:

¹¹ R.E.R. (eucentre.it)

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	47 di 104



- 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 $V_s > 800$ m/s.

A proposito della definizione del *bedrock* sismico, si rimanda al paragrafo 5.5 in cui la questione viene discussa approfonditamente.

5.3.1 Litologia

Per la determinazione delle caratteristiche litologiche si è fatto riferimento ai risultati ricavati dalle prove MASW e prove ERT (cfr. par. 4.2 e par. 4.3) eseguite nei diversi siti, integrate con la stratigrafia di prove geognostiche (sondaggi a carotaggio continuo, CPT e DPSH) limitrofe l'area oggetto d'indagine e reperite presso l'ufficio tecnico comunale.

5.3.2 Determinazione della V_s 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 delle prove MASW effettuate durante la campagna indagine 2022.

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.

Per quanto riguarda il *bedrock* sismico ($V_s > 800$ m/s), questo è stato individuato in tutte le indagini effettuate entro i 30 m da p.c.

5.3.3 Curve 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 γ , sono state utilizzate curve presenti in letteratura, scelte in funzione della descrizione litologica e, dove disponibili, dei parametri geotecnici.

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	48 di 104



In particolare, per il terreno di riporto limoso-argilloso è stata utilizzata la curva di EPRI (93) 0-20 ft¹², per i depositi argillosi e limosi Vucetic & Dobry (1993),¹³ per i depositi sabbiosi Sand Seed & Idriss (1970)¹⁴, per le ghiaie Rollins (1998)¹⁵ e per la roccia Epri Rocks 0-20 ft¹² (cfr. Tabella 5-4).

Tipo di curva	Litologia	α	β	η	λ
EPRI (93) 0-20 ft	Terreno di riporto limoso-argilloso	23.34	0.94	26.95	2.48
Vucetic & Dobry PI=30	Argilla e limo	5.12	0.81	30.24	3.06
Sand Seed & Idriss	Sabbia	14.12	0.93	27.29	2.99
Rollins	Ghiaia	17.02	0.85	19.75	2.28
Epri Rocks 0-20 ft	Roccia	6.38	0.98	38.18	1.59

Tabella 5-4 - Riepilogo dei parametri caratteristici delle curve da letteratura

Nelle seguenti figure sono riportate le curve di interpolazione per i parametri G/G_0 (Figura 5-2) e D (Figura 5-3) provenienti da letteratura.

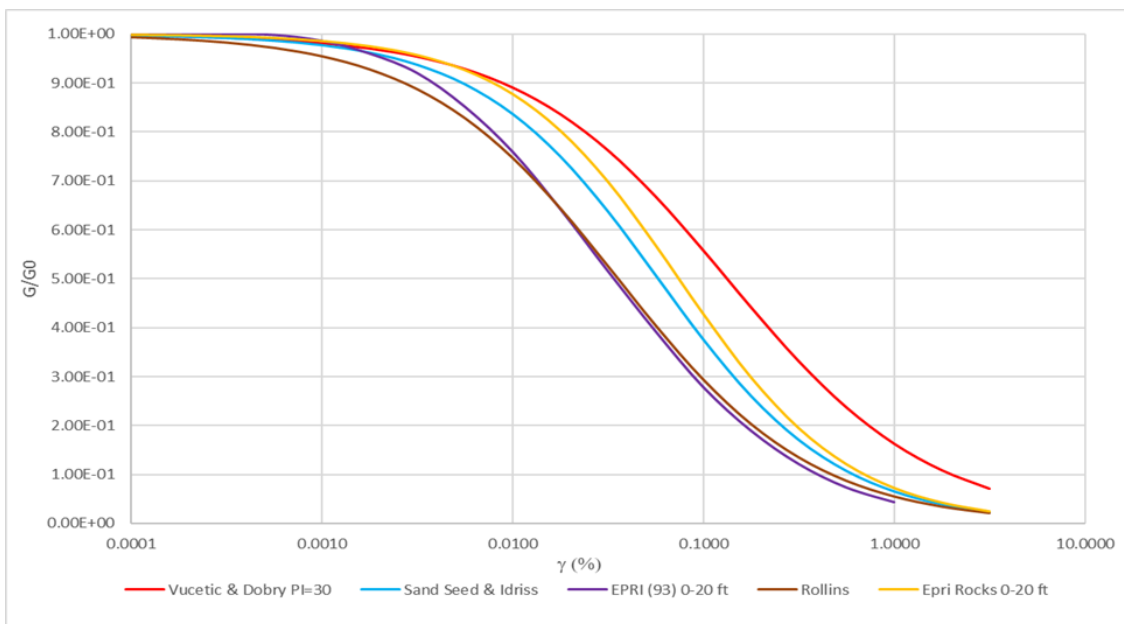


Figura 5-2 - Grafico delle curve di interpolazione G/G_0 in funzione della deformazione

12 Electric Power Research Institute (EPRI), 1993, Guidelines for determining design basic ground motions, v. 1: Method and guidelines for estimating earthquakes ground motion in eastern North America: EPRI Report TR-102293.

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

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

15 Rollins K.M., Evans M., Diehl N. and Daily W. – 1998 – Shear modulus and damping relationships for gravels. J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engrg., 124 (5), 396-405.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	49 di 104

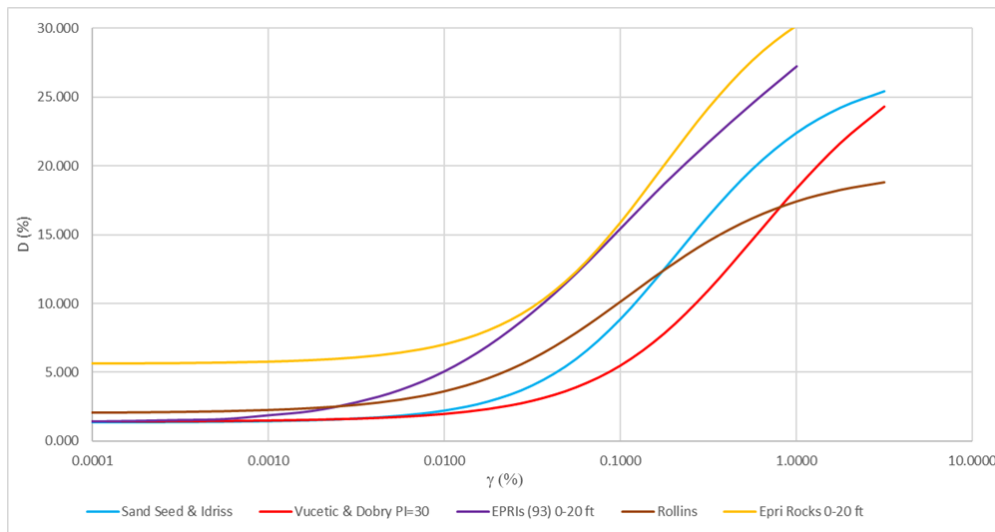


Figura 5-3 – Grafico delle curve di interpolazione D in funzione della deformazione

5.1 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. 5.0.1 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.

5.1.1 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

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	50 di 104



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 Figura 5-4. La tensione τ dipende dalla deformazione γ e dalla sua derivata $\dot{\gamma}$, secondo la relazione:

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

dove:

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

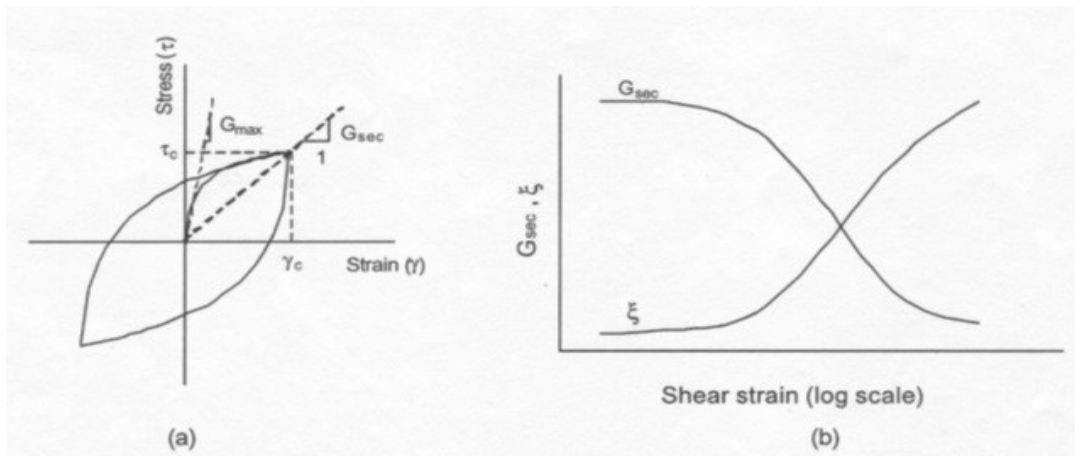


Figura 5-4 - Modello lineare equivalente: (a) curve tensioni - deformazioni; (b) variazione del modulo.

Il comportamento non lineare del terreno, durante un ciclo di carico, viene approssimato per come mostrato in Figura 5-4. Il modulo di taglio equivalente, G , è preso considerando il modulo di taglio secante G_s .

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

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

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

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	51 di 104



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

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 (Figura 5-4b).

5.1.2 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 (Figura 5-5) 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 t_n e descrive l'equilibrio dinamico del sistema. La soluzione in termini di spostamento velocità ed accelerazione per ogni t_n 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 t_n e $t_n - 1$

β = parametro del metodo di integrazione posto pari a 0.25

γ = parametro del metodo di integrazione posto pari a 0.50

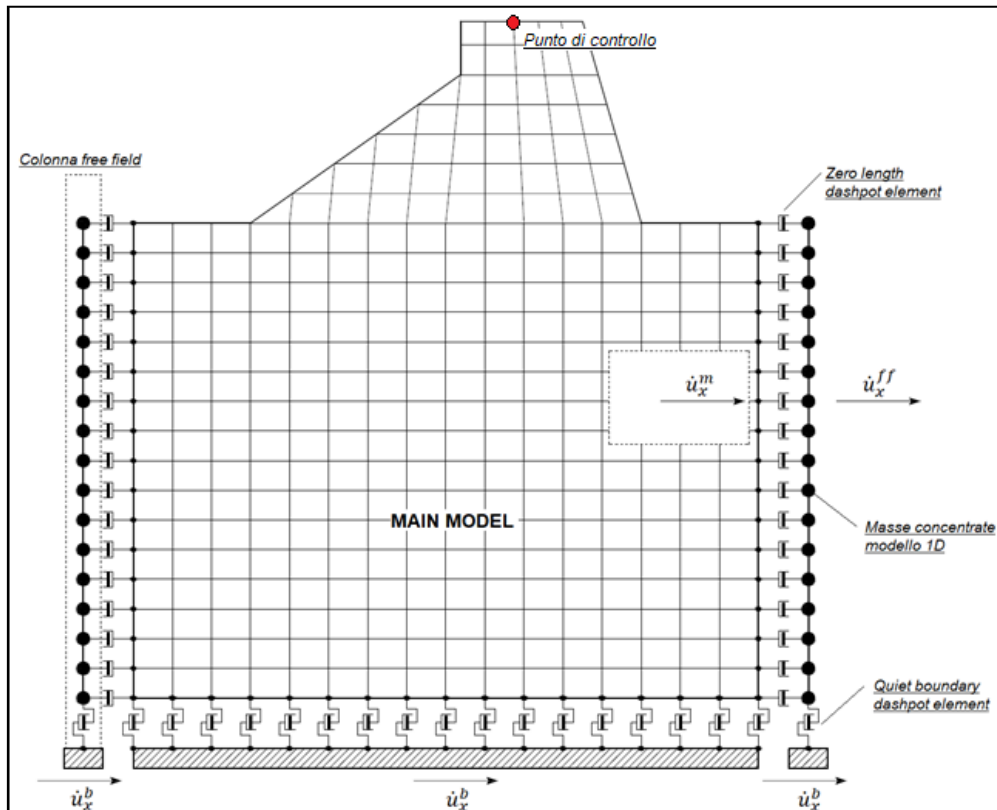


Figura 5-5 - Discretizzazione FEM del terreno

5.1.3 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:

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	53 di 104



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

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

da cui si ottiene (Hudson, 1994):

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

dove:

- ω_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 ω_i frequenza di picco dello spettro ottenuto a partire dall'accelerazione di bedrock;

5.1.4 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 rigidità 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 (G_0 e D_0);
3. calcolo della risposta dinamica del suolo e valutazione della deformazione massima a taglio in ogni strato (γ_1);
4. aggiornamento dei valori $G_1 = G(\gamma_1)$ e $D_1 = D(\gamma_1)$;
5. iterazione dei passi 3 e 4 fino a convergenza ($\gamma_{i-1} \sim \gamma_i$).

5.1.5 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.

5.2 Analisi dei risultati

I risultati delle analisi condotte con il codice di calcolo LSR 2D (Local Sismic Response 2D) Ver. 5.0.1 di STACEC, elaborati nel dominio del tempo e delle frequenze, hanno consentito di definire per il sito in esame:

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	54 di 104



- La funzione di trasferimento del segnale sismico dal *bedrock* alla superficie;
- Lo spettro di risposta elastico in pseudoaccelerazione (PSA – di cui in Figura 5-6 si riporta un esempio) e lo spettro di risposta elastico in pseudovelocità (PSV di cui in Figura 5-7 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 Figura 5-8 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:

$$\begin{aligned}
 \blacksquare FH_{IS\ 0.1-0.5} &= \frac{\int_{0.1}^{0.5} PSV_{superficie}(T)dt}{\int_{0.1}^{0.5} PSV_{suolo\ rigido}(T)dt} \\
 \blacksquare FH_{IS\ 0.5-1.0} &= \frac{\int_{0.5}^{1.0} PSV_{superficie}(T)dt}{\int_{0.5}^{1.0} PSV_{suolo\ rigido}(T)dt} \\
 \blacksquare FH_{IS\ 0.5-1.5} &= \frac{\int_{0.5}^{1.5} PSV_{superficie}(T)dt}{\int_{0.5}^{1.5} PSV_{suolo\ rigido}(T)dt}
 \end{aligned}$$

- 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:

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

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	55 di 104

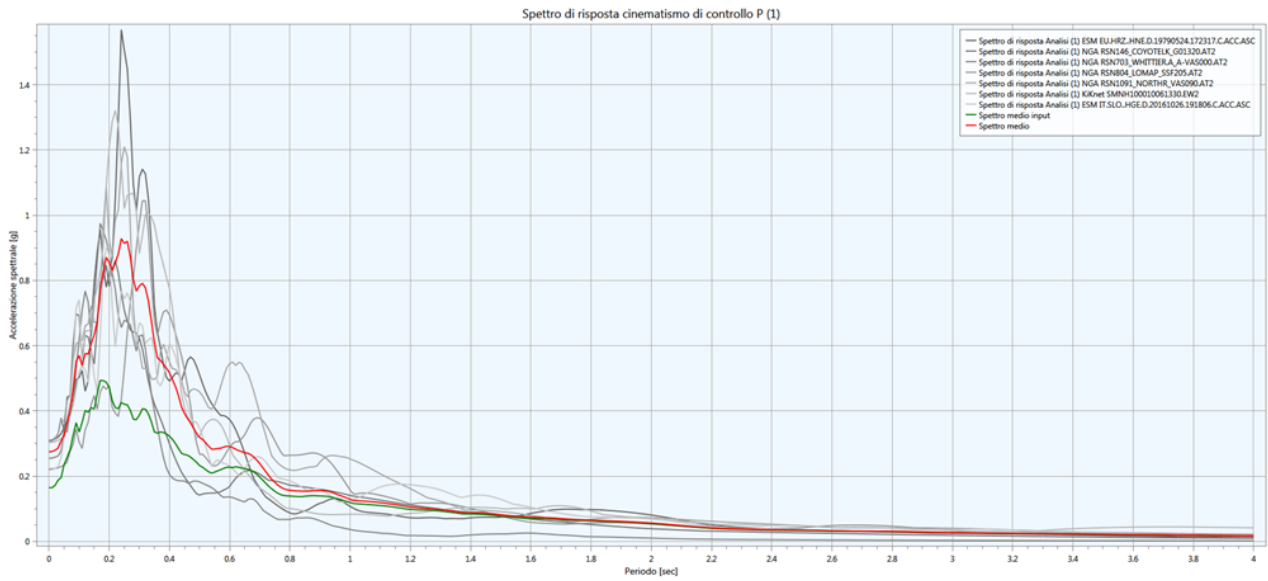


Figura 5-6 - Esempio di spettro elastico in accelerazione (in grigio gli spettri dei singoli accelerogrammi, in verde lo spettro medio di input, in rosso lo spettro medio di output)

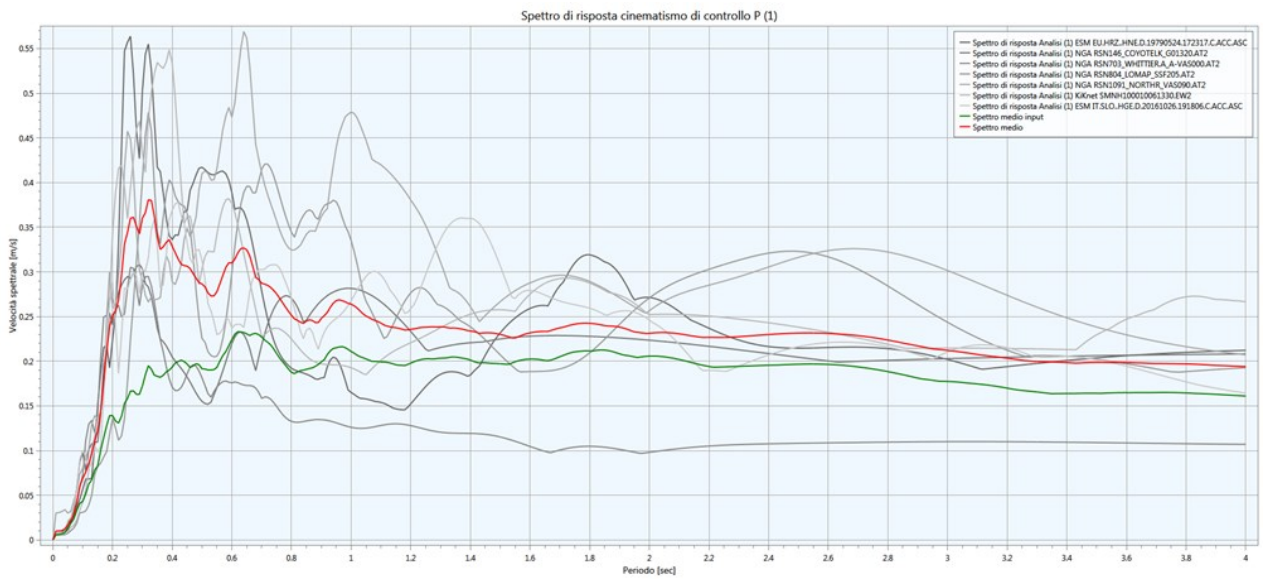


Figura 5-7 - Spettro elastico in velocità (in grigio gli spettri dei singoli accelerogrammi, in verde lo spettro medio di input, in rosso lo spettro medio di output)

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	56 di 104

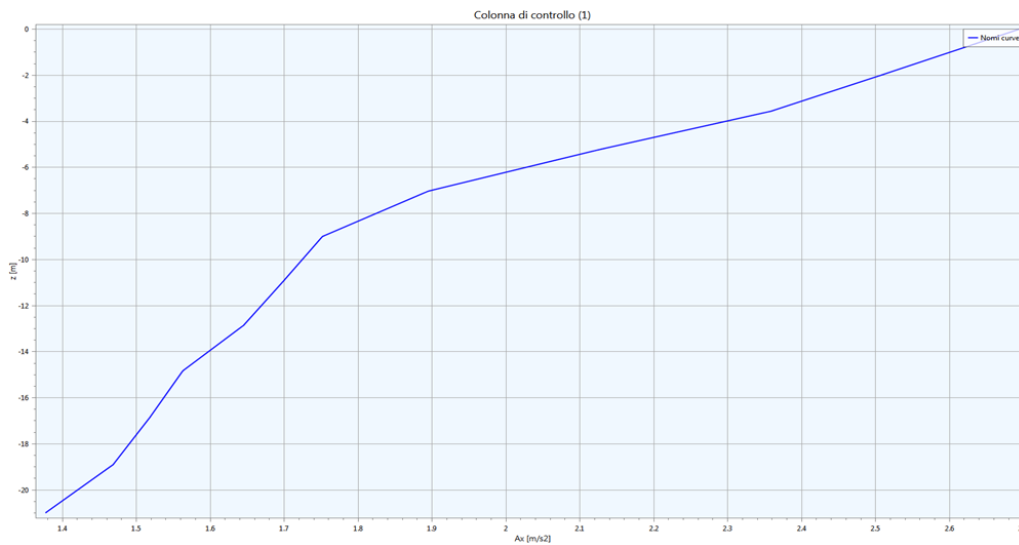


Figura 5-8 - Variazione dell'accelerazione con la profondità

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 Figura 5-9 è riportato il grafico relativo, generato da LSR2D.

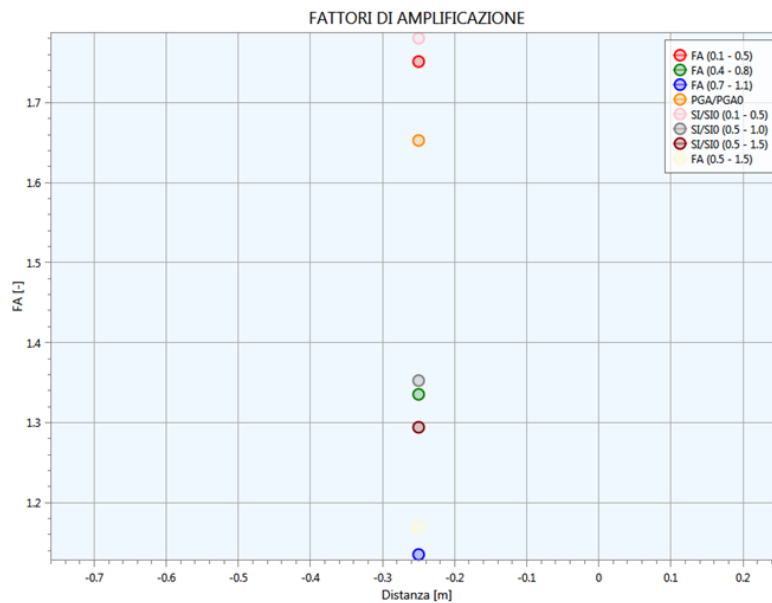


Figura 5-9 - Grafico dei fattori di amplificazione



5.3 Risultati della modellazione numerica

Di seguito vengono presentati in dettaglio i risultati delle analisi effettuate sulle n° 5 verticali studiate.

5.3.1 RSL per il sito "Zona artigianale Pontecchio Marconi" (037057L15 - MASW 1)

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kN/m ³)	V _s (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Terreno di riporto	0.00	-2.00	2.00	17.00	224.00	Rollins
Ghiaie e sabbie limose	-2.00	-9.00	7.00	20.00	305.00	Rollins
Substrato alterato	-9.00	-21.00	12.00	20.50	530.00	Epri Rocks 0-20 ft
Bedrock	-21.00	-	-	22.00	802.00	-

Tabella 5-5 - Modello geofisico della verticale "Zona artigianale Pontecchio Marconi"

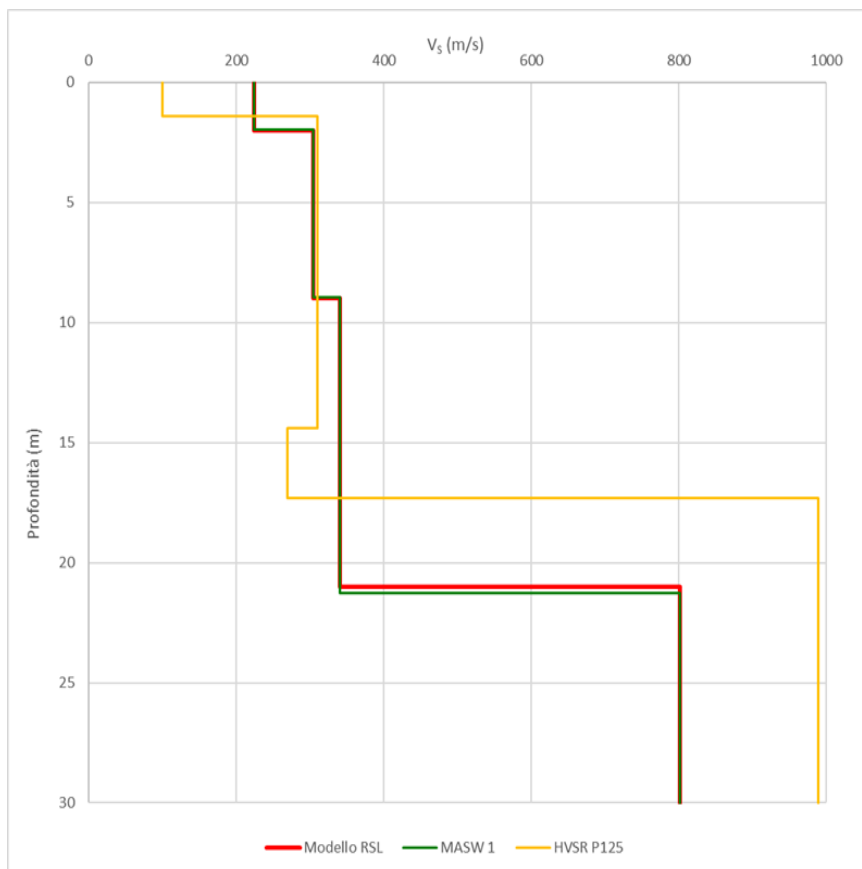


Figura 5-10 - Discretizzazione della Vs lungo la verticale "Zona artigianale Pontecchio Marconi"

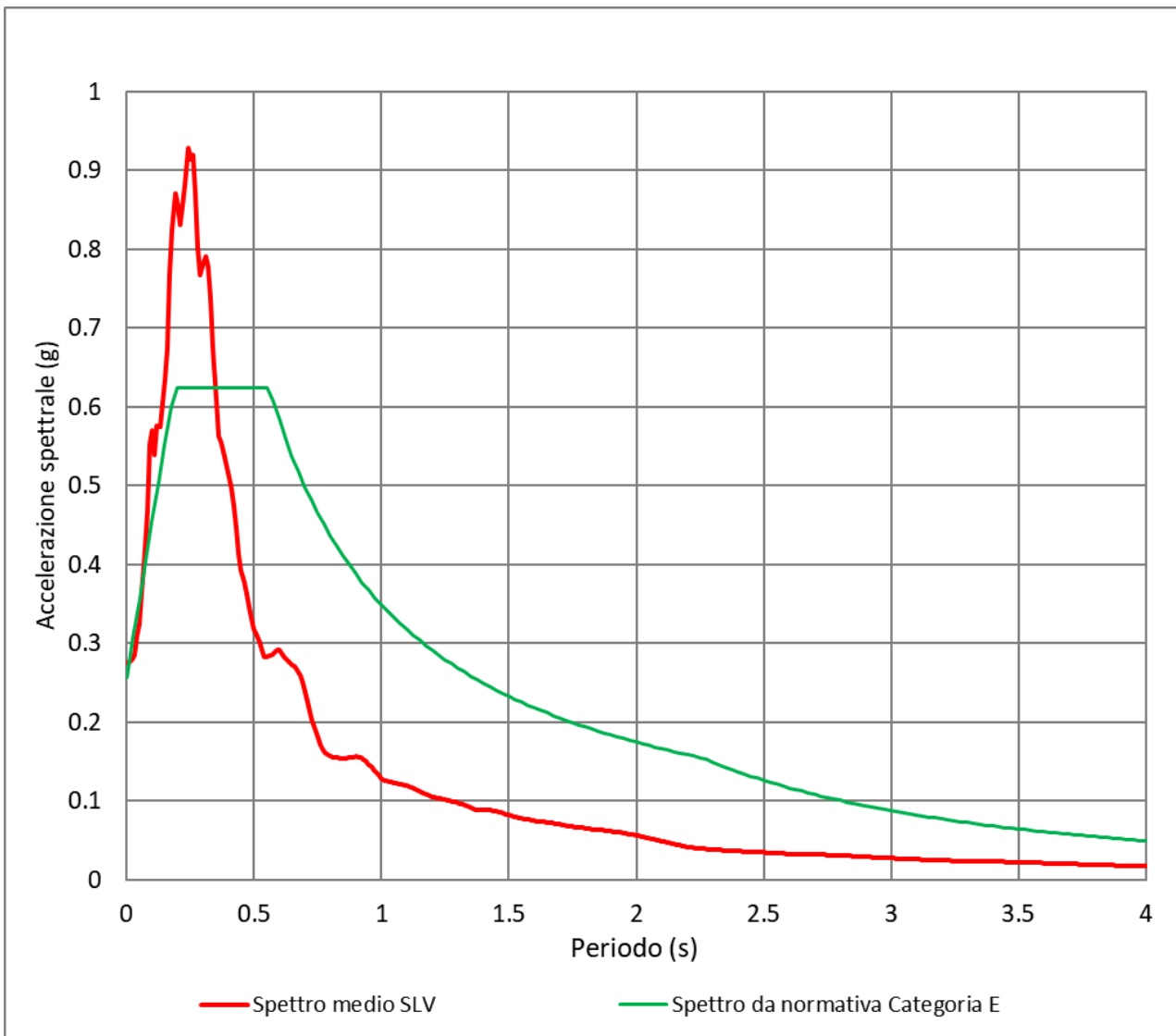


Figura 5-11 - Spettro medio di risposta in accelerazione per la verticale “Zona artigianale Pontecchio Marconi”, confrontato con lo spettro semplificato da normativa per la categoria di sottosuolo E

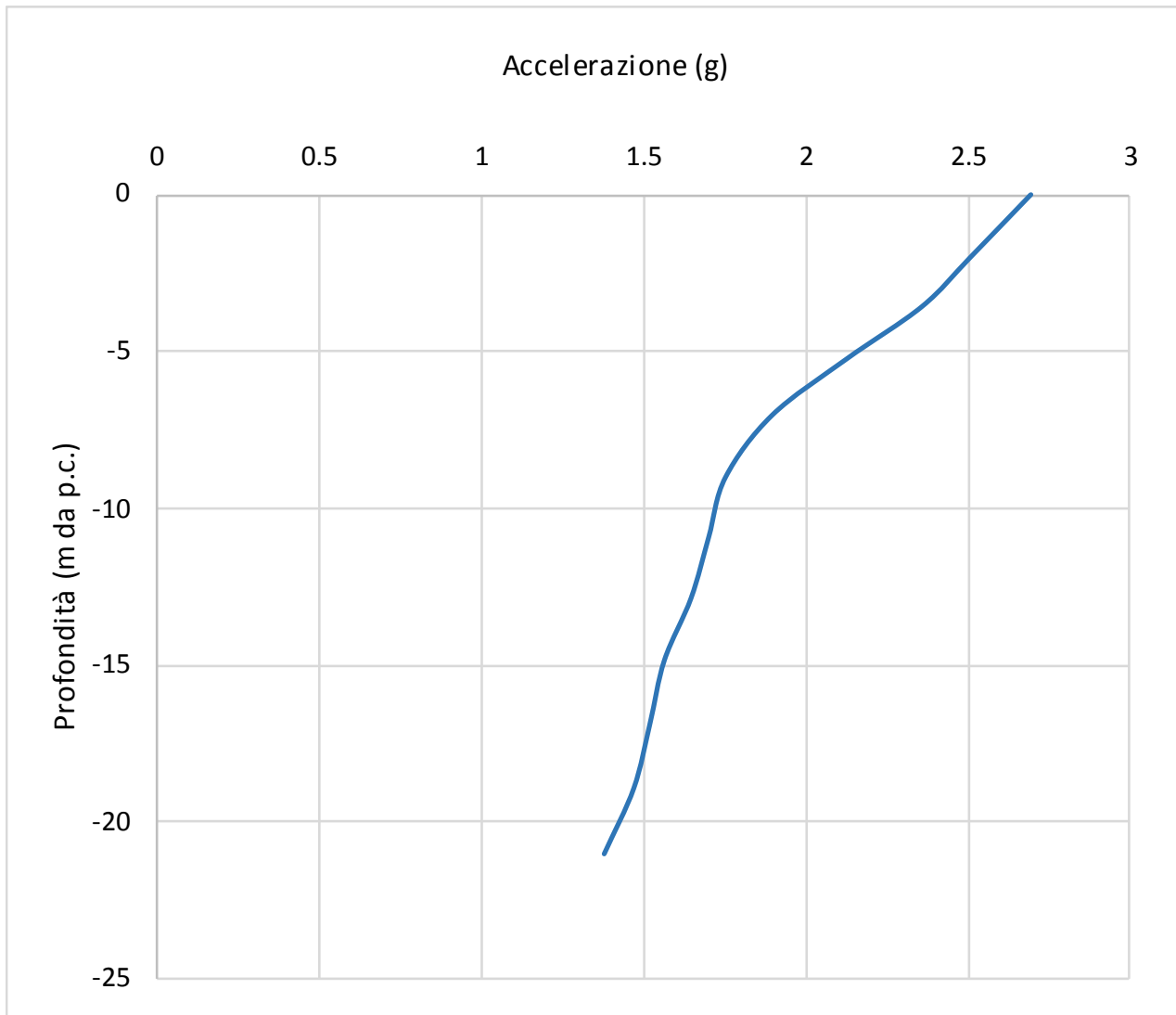


Figura 5-12 - Accelerazione in output in funzione della profondità lungo la verticale “Zona artigianale Pontecchio Marconi”

Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore da abachi RER	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	1.75	2	-14.29%
FA (0.4-0.8 s)	1.34	1.4	-4.48%
FA (0.5-1.5 s)	1.17	-	-
FA (0.7-1.1 s)	1.14	1.1	3.51%
PGA/PGA ₀	1.65	2	-21.21%
SI/SI ₀ (0.1-0.5 s)	1.78	2.0	-12.36%
SI/SI ₀ (0.5-1.0 s)	1.35	1.2	11.11%
SI/SI ₀ (0.5-1.5 s)	1.34	-	-

Tabella 5-6 - Fattori di amplificazione calcolati lungo la verticale “Zona artigianale Pontecchio Marconi”



5.3.2 RSL per il sito "Parco San Massimiliano Kolbe" (037057L16 - MASW 2)

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kN/m ³)	V _s (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Terreno di riporto	0.00	-1.40	1.40	18.00	140.00	Rollins
Sabbie sciolte	-1.40	-5.00	3.60	19.00	211.00	Sand Seed & Idriss
Ghiaie limose	-5.00	-11.80	6.80	20.00	211.00	Rollins
Substrato alterato	-11.80	-22.00	10.20	20.50	520.00	Epri Rocks 0-20 ft
Bedrock	-22.00	-	-	22.00	808.00	-

Tabella 5-7 - Modello geofisico della verticale "Parco San Massimiliano Kolbe"

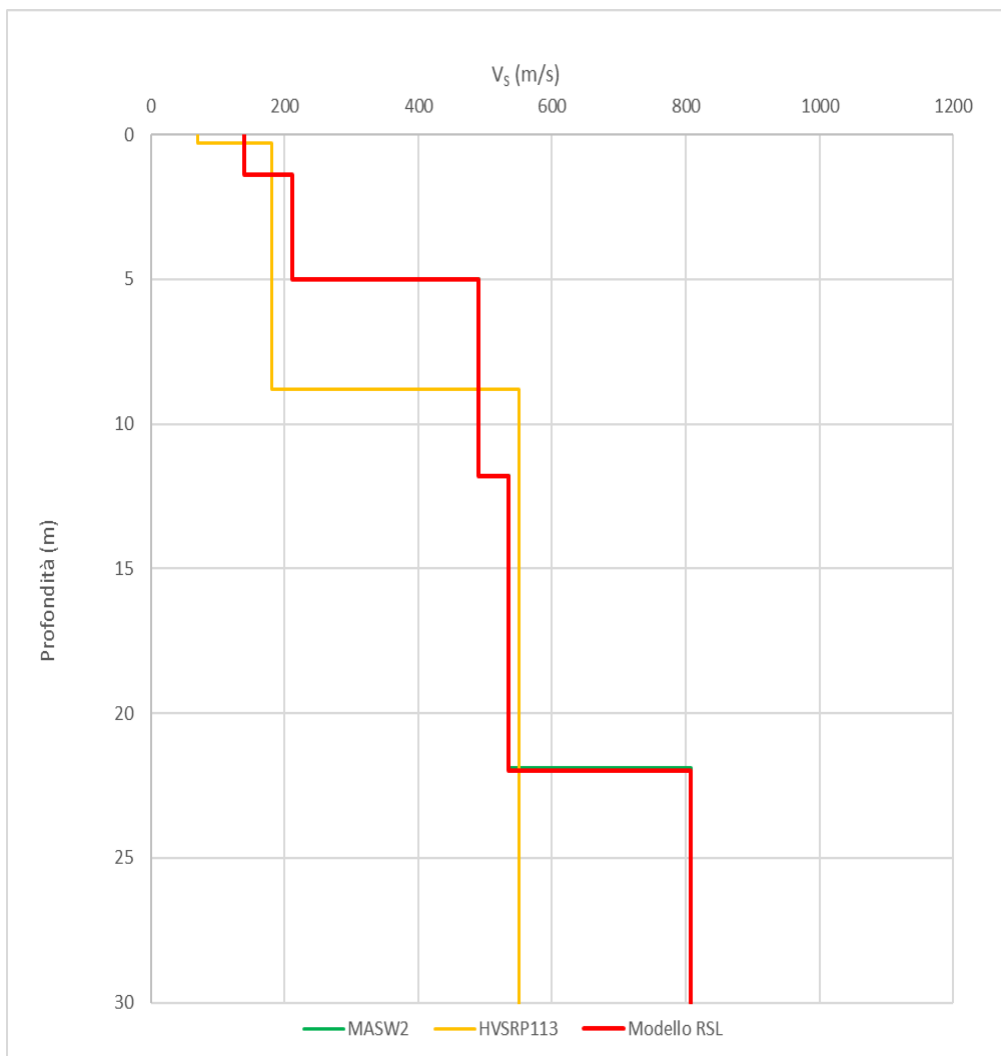


Figura 5-13 - Discretizzazione della Vs lungo la verticale "Parco San Massimiliano Kolbe"

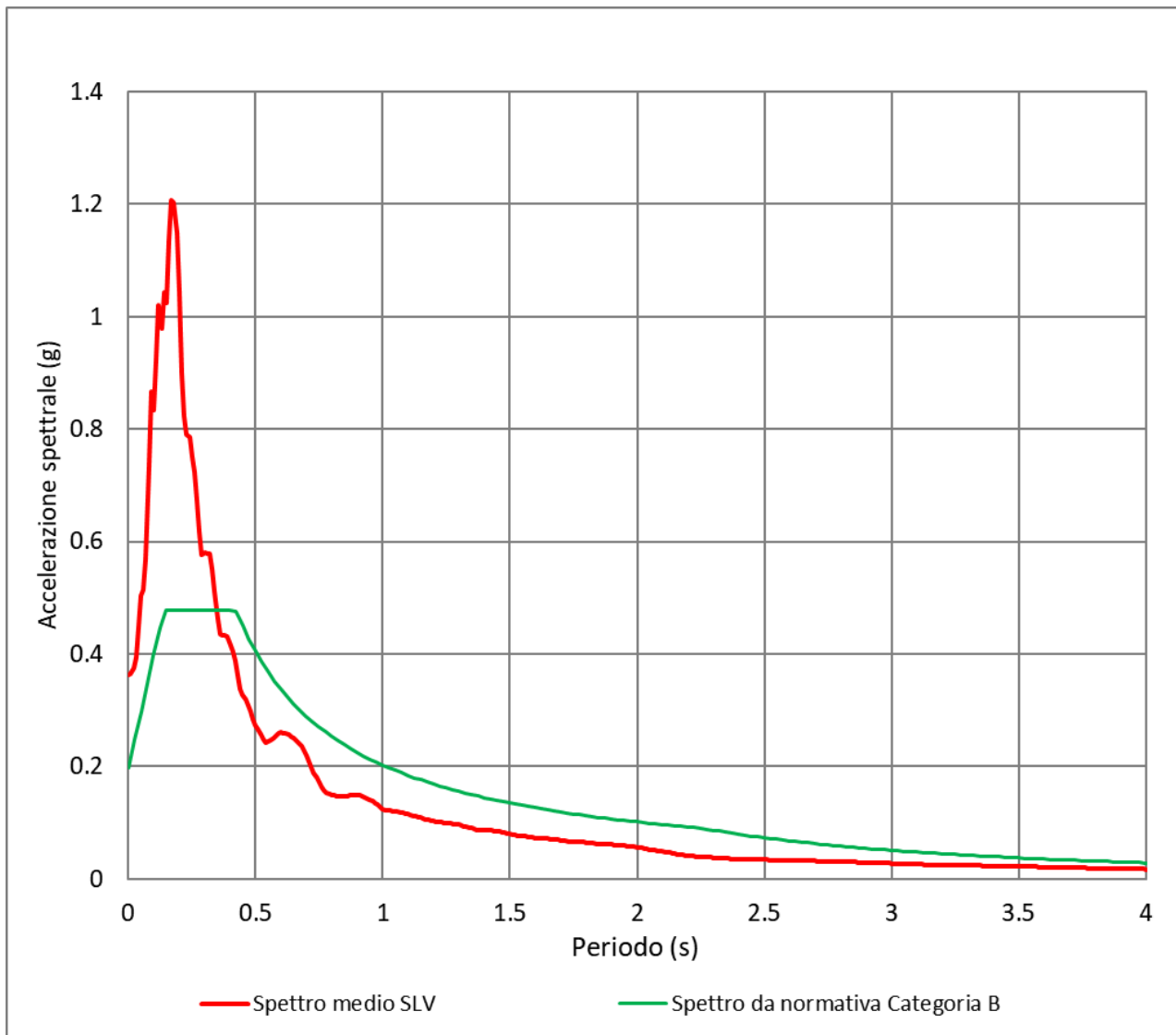


Figura 5-14 - Spettro medio di risposta in accelerazione per la verticale “Parco San Massimiliano Kolbe”, confrontato con lo spettro semplificato da normativa per la categoria di sottosuolo B

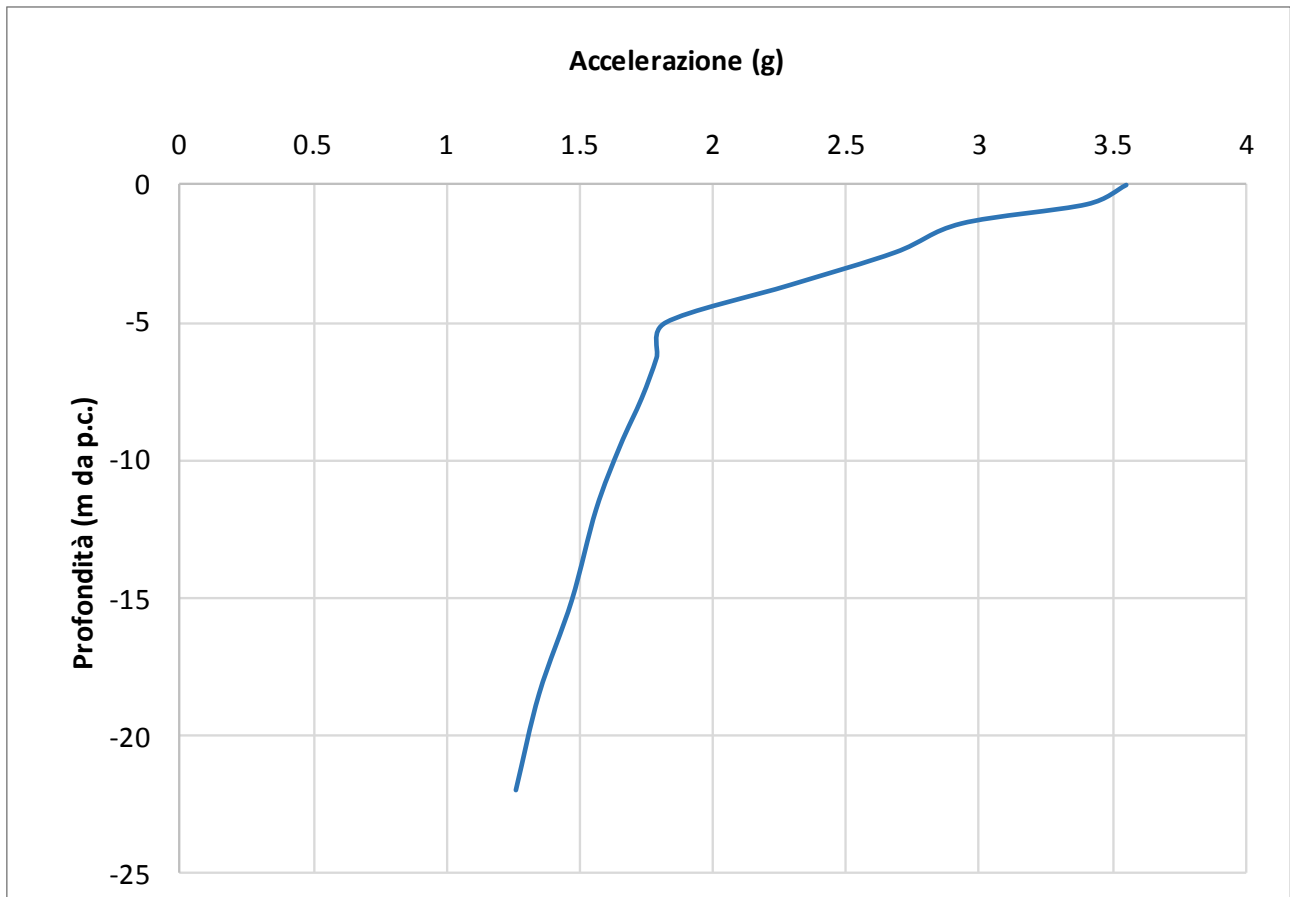


Figura 5-15 - Accelerazione in output in funzione della profondità lungo la verticale “Parco San Massimiliano Kolbe”

Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore RER	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	1.80	1.8	0.00%
FA (0.4-0.8 s)	1.75	1.2	31.43%
FA (0.5-1.5 s)	1.09	-	-
FA (0.7-1.1 s)	1.08	1	7.41%
PGA/PGA ₀	2.15	1.9	11.63%
SI/Sl ₀ (0.1-0.5 s)	1.73	1.7	1.73%
SI/Sl ₀ (0.5-1.0 s)	1.26	1.1	12.70%
SI/Sl ₀ (0.5-1.5 s)	1.24	-	-

Tabella 5-8 - Fattori di amplificazione calcolati lungo la verticale “Parco San Massimiliano Kolbe”



5.3.3 RSL per il sito "Via Pontecchio" (037057L19 - MASW 3)

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kN/m ³)	V_s (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Terreno di riporto	0.00	-2.80	2.8	17.00	131.00	Epri (93), 0-20 ft
Limi argillosi	-2.80	-4.9	2.10	18.00	221.00	Vucetic & Dobry, PI = 30
Sabbie limose e ghiaie	-4.9	-9.5	5.60	18.50	350.00	Sand Seed & Idriss
Substrato alterato	-9.5	-25.00	15.50	20.00	587.00	Epri Rocks 0-20 ft
Bedrock	-25	-	-	22.00	803.00	-

Tabella 5-9 - Modello geofisico della verticale "Via Pontecchio"

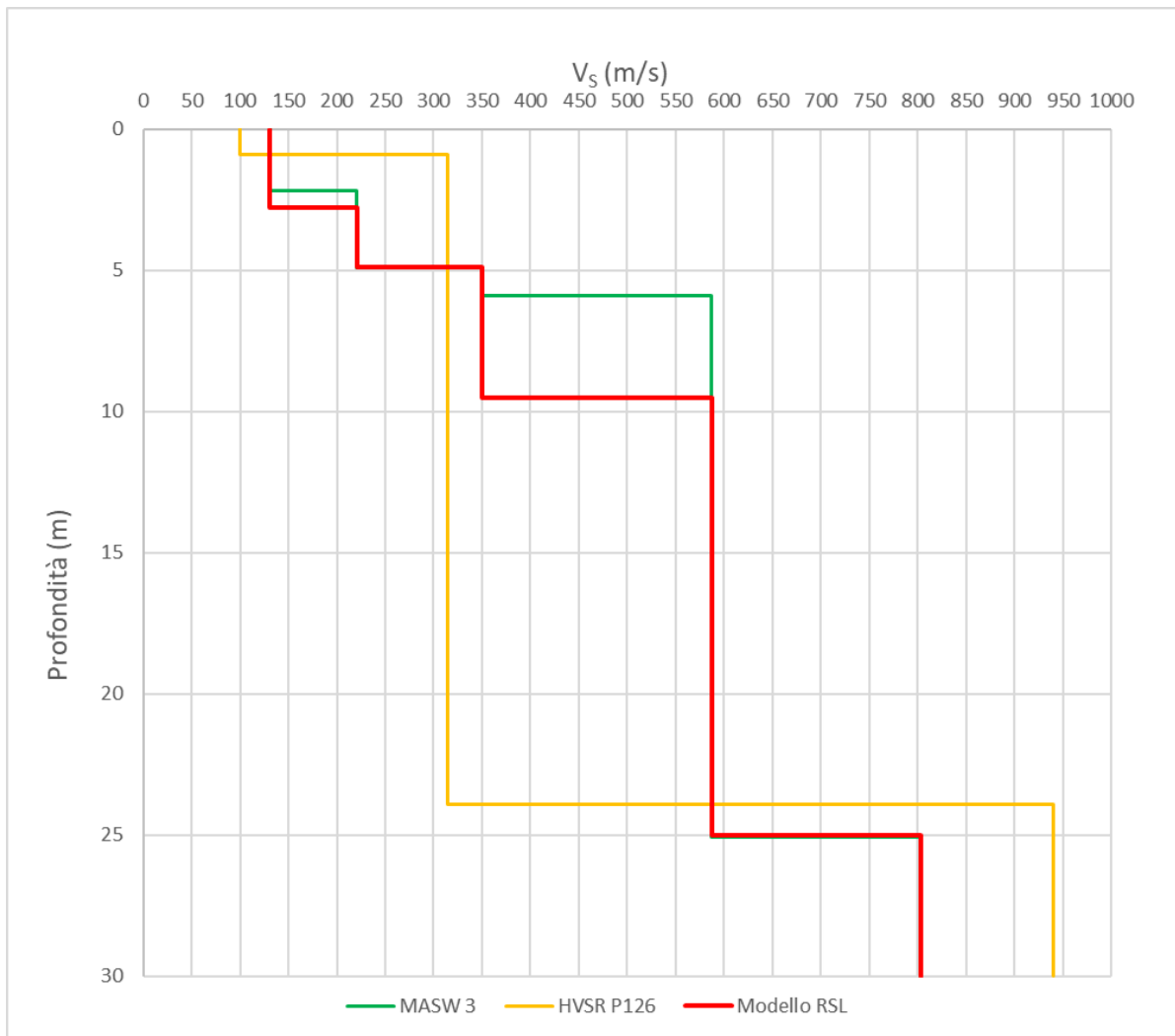


Figura 5-16 - Discretizzazione della V_s lungo la verticale "Via Pontecchio"

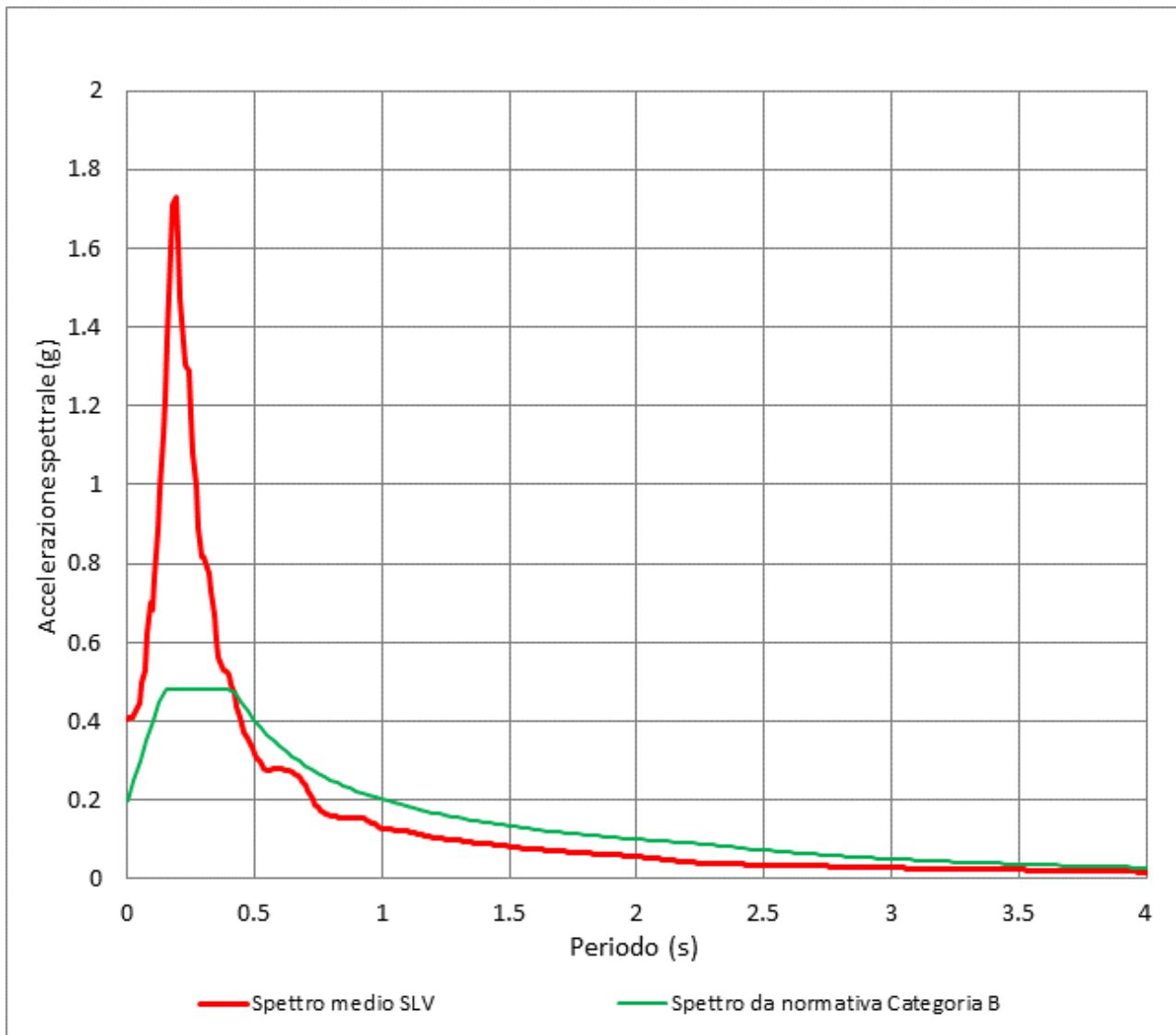


Figura 5-17 - Spettro medio di risposta in accelerazione per la verticale "Via Pontecchio", confrontato con lo spettro semplificato da normativa per la categoria di sottosuolo B

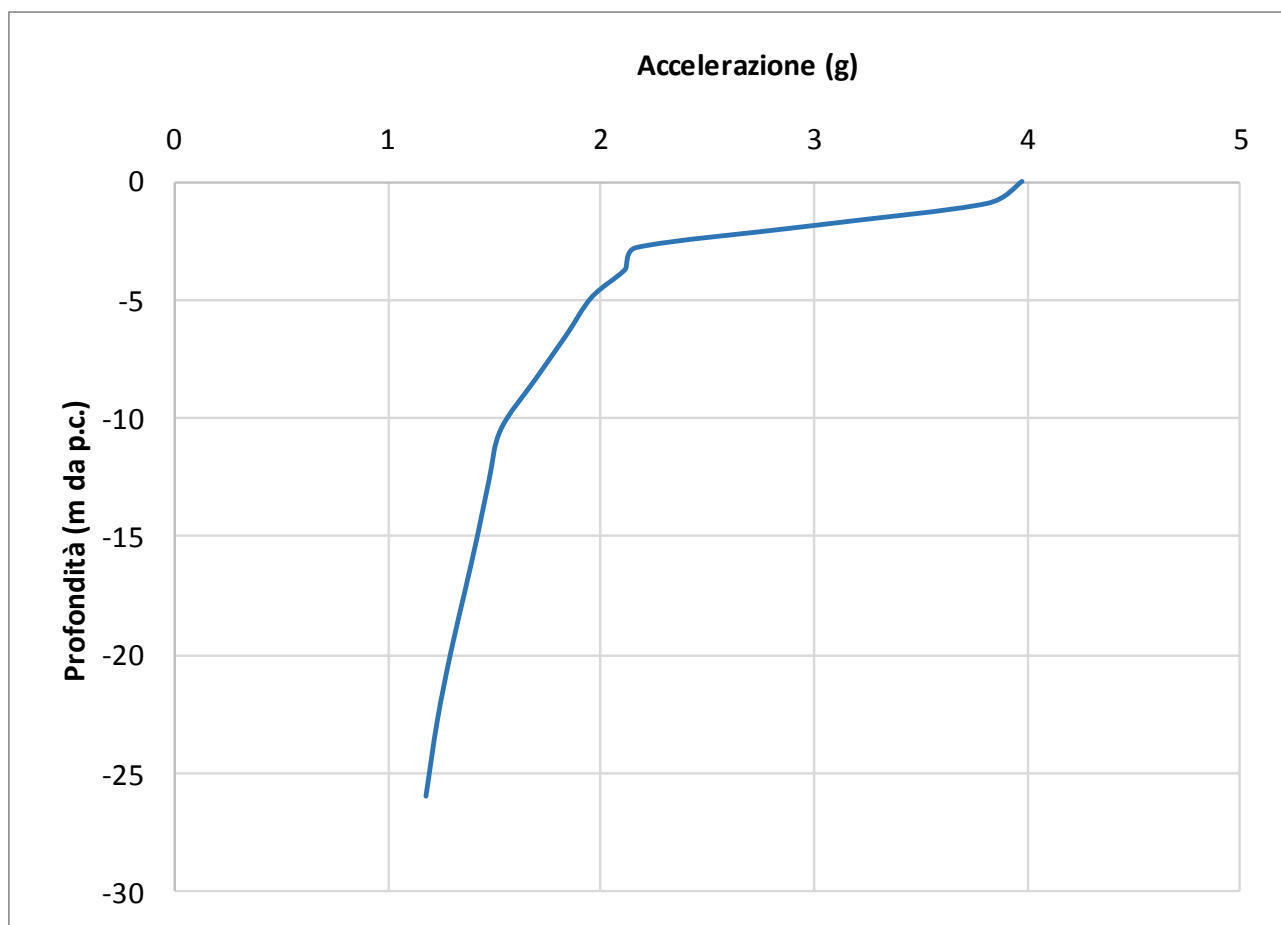


Figura 5-18 - Accelerazione in output in funzione della profondità lungo la verticale “Via Pontecchio”

Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore RER	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	2.34	1.7	27.35%
FA (0.4-0.8 s)	1.33	1.2	9.77%
FA (0.5-1.5 s)	1.16	-	-
FA (0.7-1.1 s)	1.14	1.1	3.51%
PGA/PGA ₀	2.42	1.8	25.62%
SI/Sl ₀ (0.1-0.5 s)	2.28	1.7	25.44%
SI/Sl ₀ (0.5-1.0 s)	1.47	1.1	25.17%
SI/Sl ₀ (0.5-1.5 s)	1.43	-	-

Tabella 5-10 - Fattori di amplificazione calcolati lungo la verticale “Via Pontecchio”



5.3.4 RSL per il sito "Istituto Professionale B. Ferrarini" (037057L18 - MASW

4

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kN/m ³)	V _s (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Terreno di riporto limoso	0.00	-2.00	2.00	17.00	174.00	Epri (93), 0-20 ft
Argilla limosa	-2.00	-4.00	2.00	18.50	332.00	Vucetic & Dobry, PI = 30
Ghiaia limosa	-4	-12.00	8.00	20.00	446.00	Rollins
Substrato alterato	-12.00	-27.00	15.00	21.00	753.00	Epri Rocks 0-20 ft
Bedrock	-27.00	-	-	22.00	1036.00	-

Tabella 5-11 - Modello geofisico della verticale "Istituto Professionale B. Ferrarini"

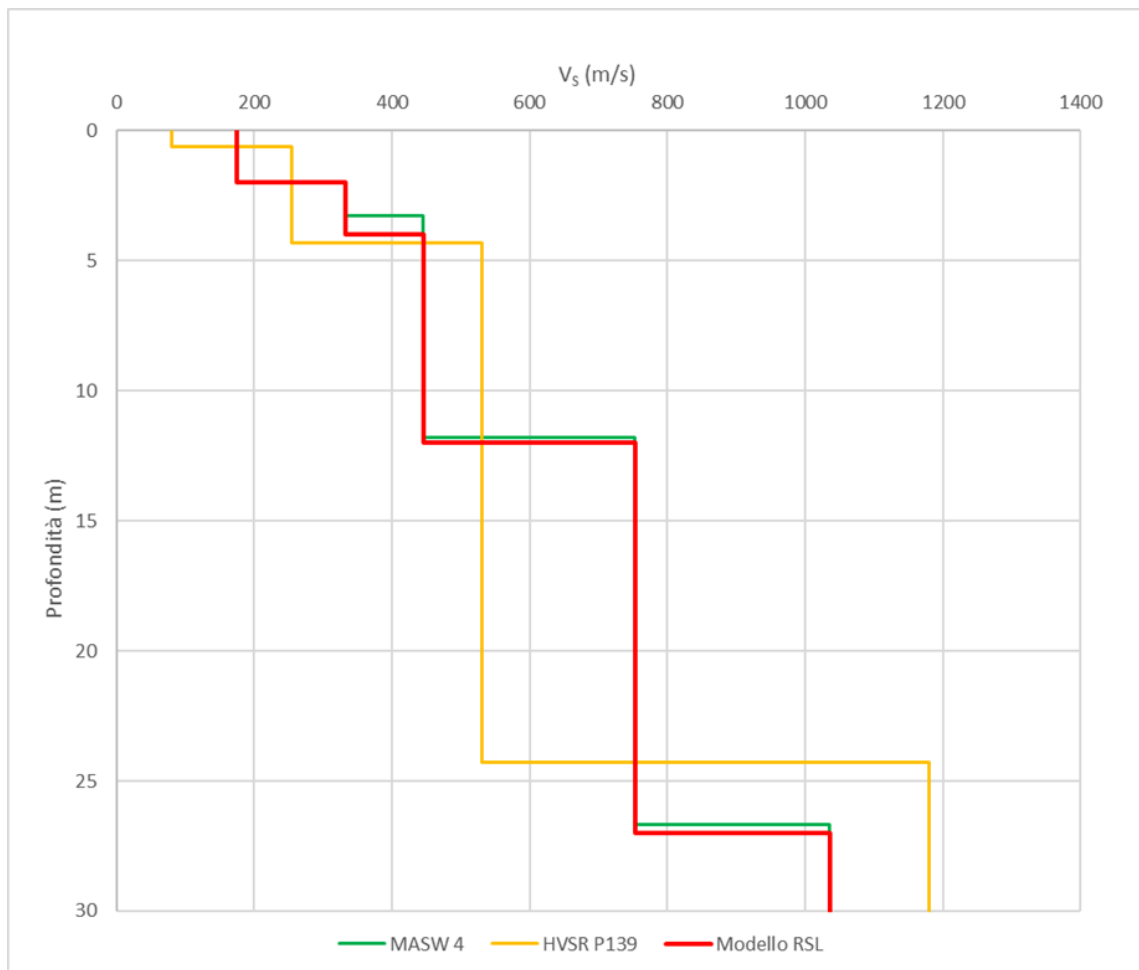


Figura 5-19 - Discretizzazione della V_s lungo la verticale "Istituto Professionale B. Ferrarini"

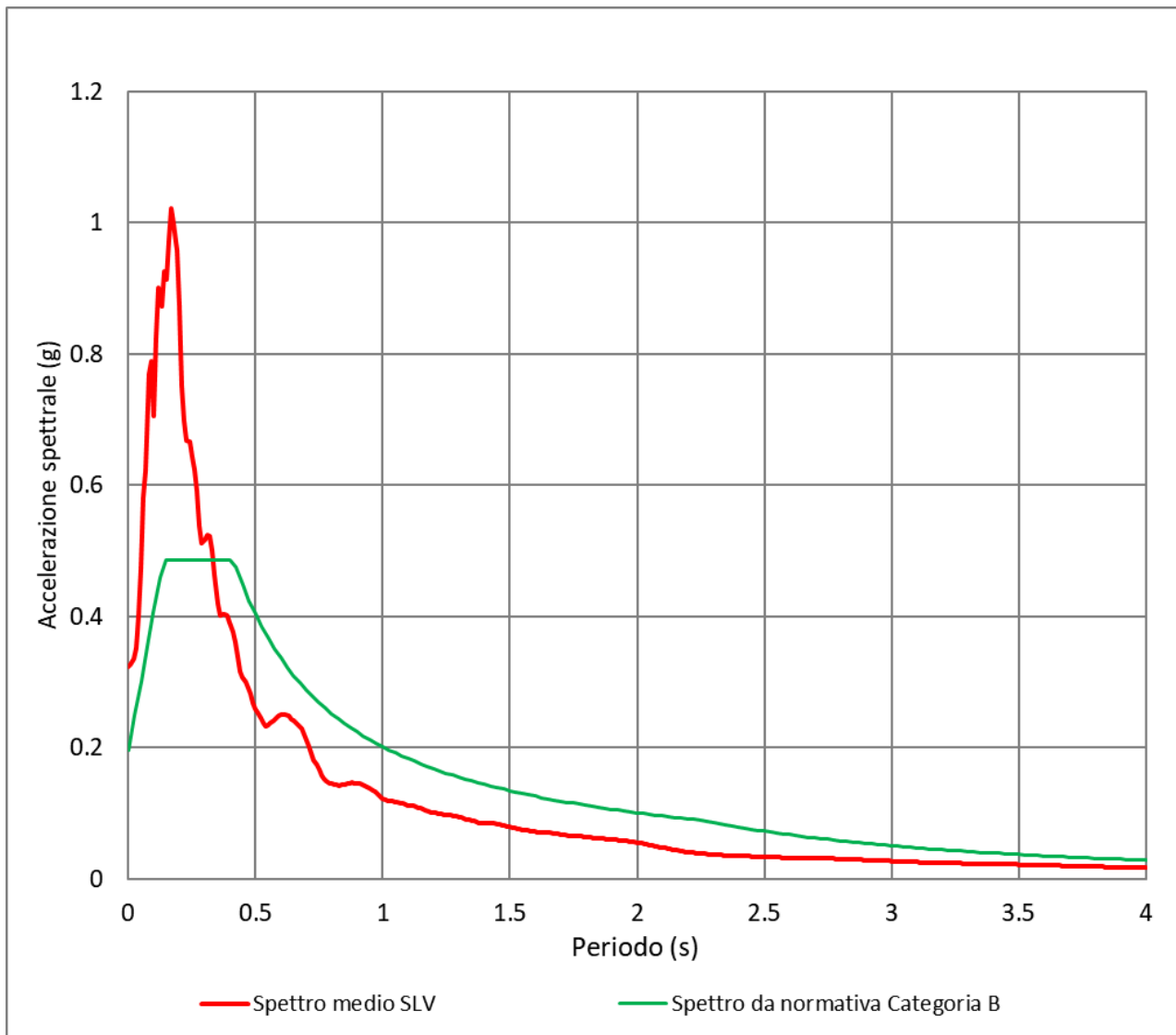


Figura 5-20 - Spettro medio di risposta in accelerazione per la verticale “Istituto Professionale B. Ferrarini”, confrontato con lo spettro semplificato da normativa per la categoria di sottosuolo B

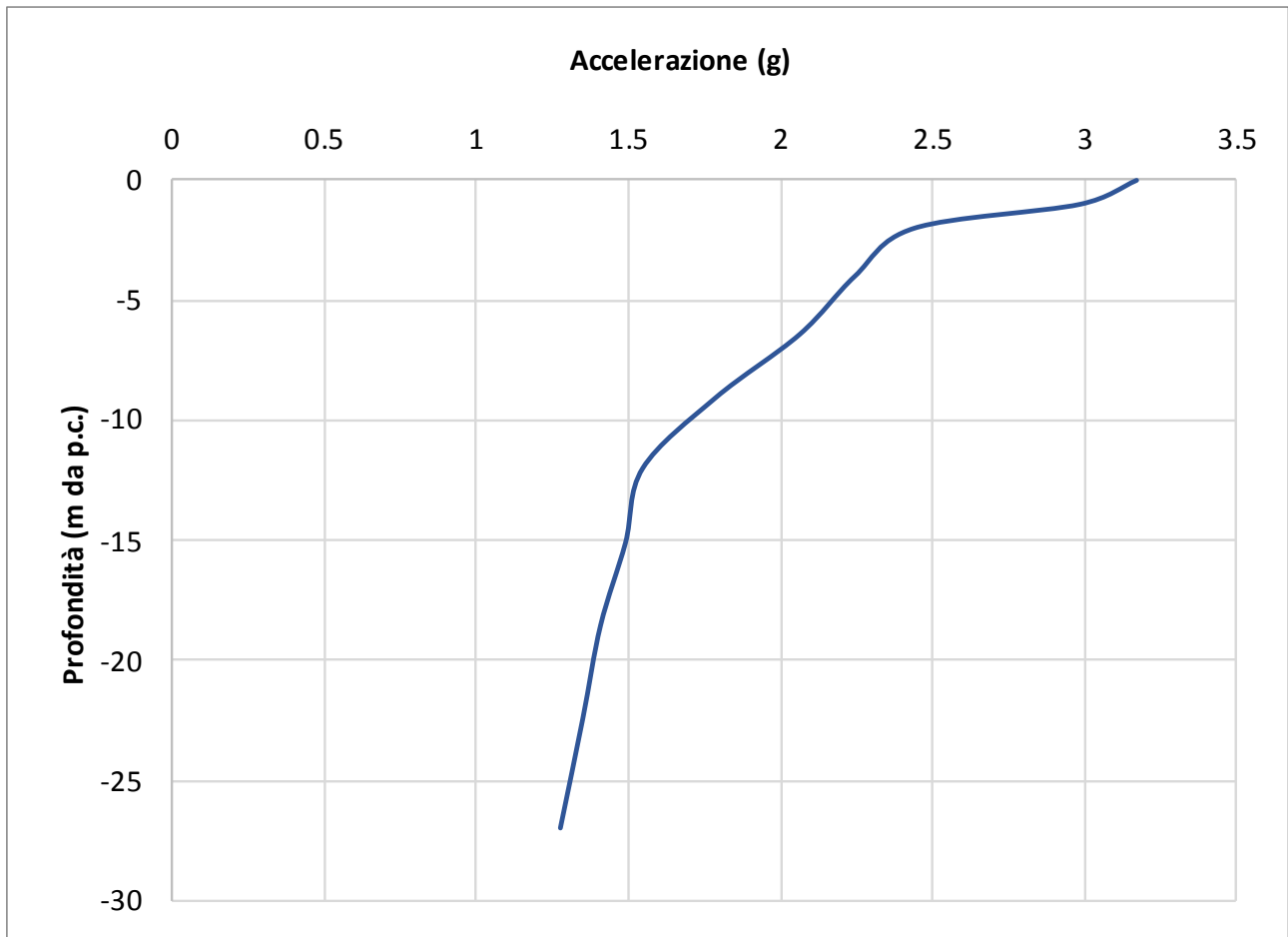


Figura 5-21 - Accelerazione in output in funzione della profondità lungo la verticale "Istituto Professionale B. Ferrarini"

Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore RER	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	1.6	1.4	12.50%
FA (0.4-0.8 s)	1.1	1.1	0.00%
FA (0.5-1.5 s)	1.1	-	-
FA (0.7-1.1 s)	1.1	1.0	9.09%
PGA/PGA ₀	1.9	1.5	21.05%
SI/SI ₀ (0.1-0.5 s)	1.5	1.3	13.33%
SI/SI ₀ (0.5-1.0 s)	1.2	1.0	16.67%
SI/SI ₀ (0.5-1.5 s)	1.2	-	-

Tabella 5-12 - Fattori di amplificazione calcolati lungo la verticale "Istituto Professionale B. Ferrarini"



5.3.5 RSL per il sito "Parco pubblico Via Achillini" (037057L17 - MASW 5)

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	γ (kN/m ³)	V _s (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Terreno di riporto	0.00	-3.00	3.00	17.00	207.00	Rollins
Sabbia limosa e ghiaia	-3.00	-12.00	9.00	19.00	304.00	Sand Seed & Idriss
Ghiaia limosa	-12.00	-13.50	1.50	20.00	460.00	Rollins
Substrato alterato	-13.50	-27.00	13.50	20.50	576.00	Epri Rocks 0-20 ft
Bedrock	-27.00	-	-	22.00	1200.00	-

Tabella 5-13 - Modello geofisico della verticale "Parco pubblico Via Achillini"

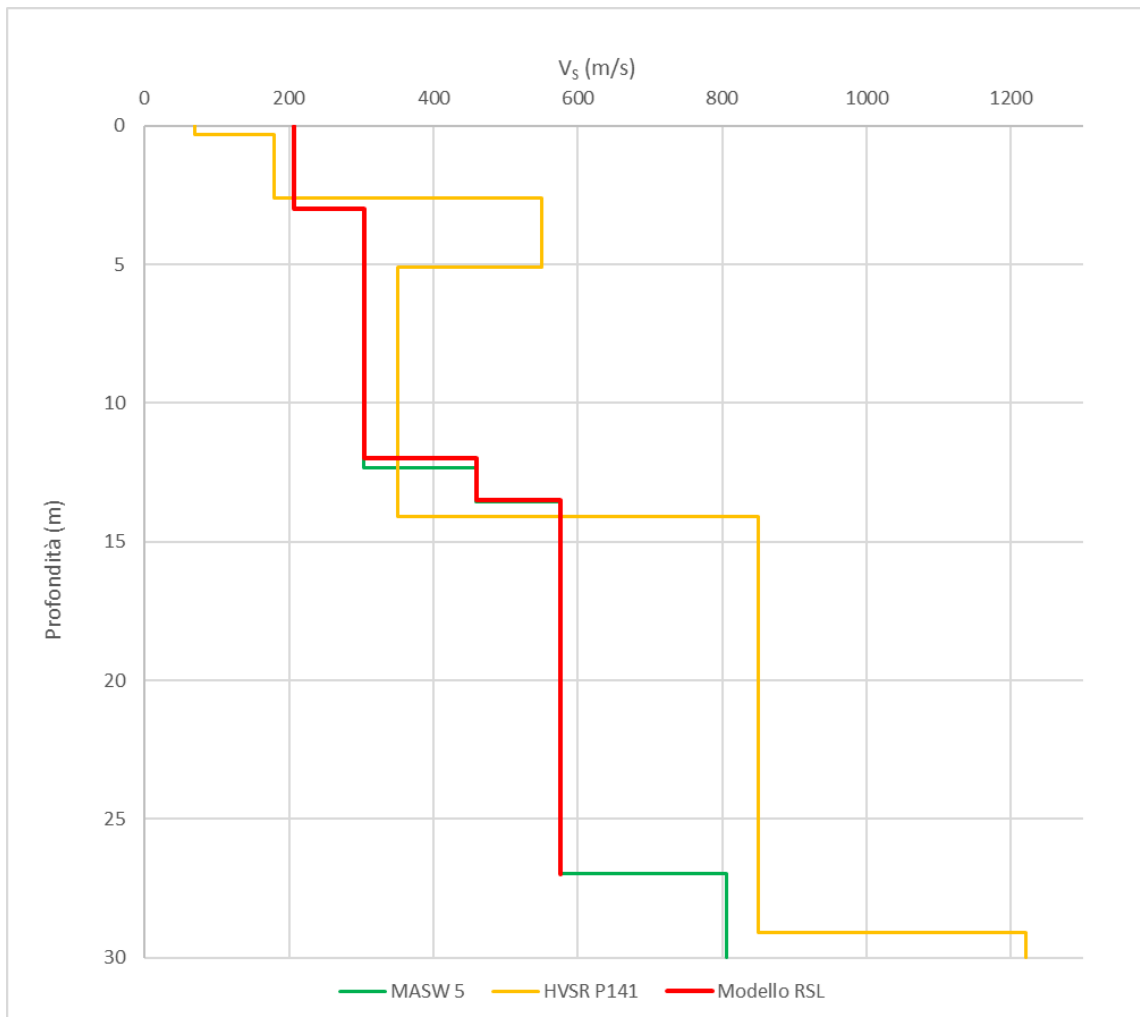


Fig. 5-1 - Discretizzazione della V_s lungo la verticale "San Rocco"

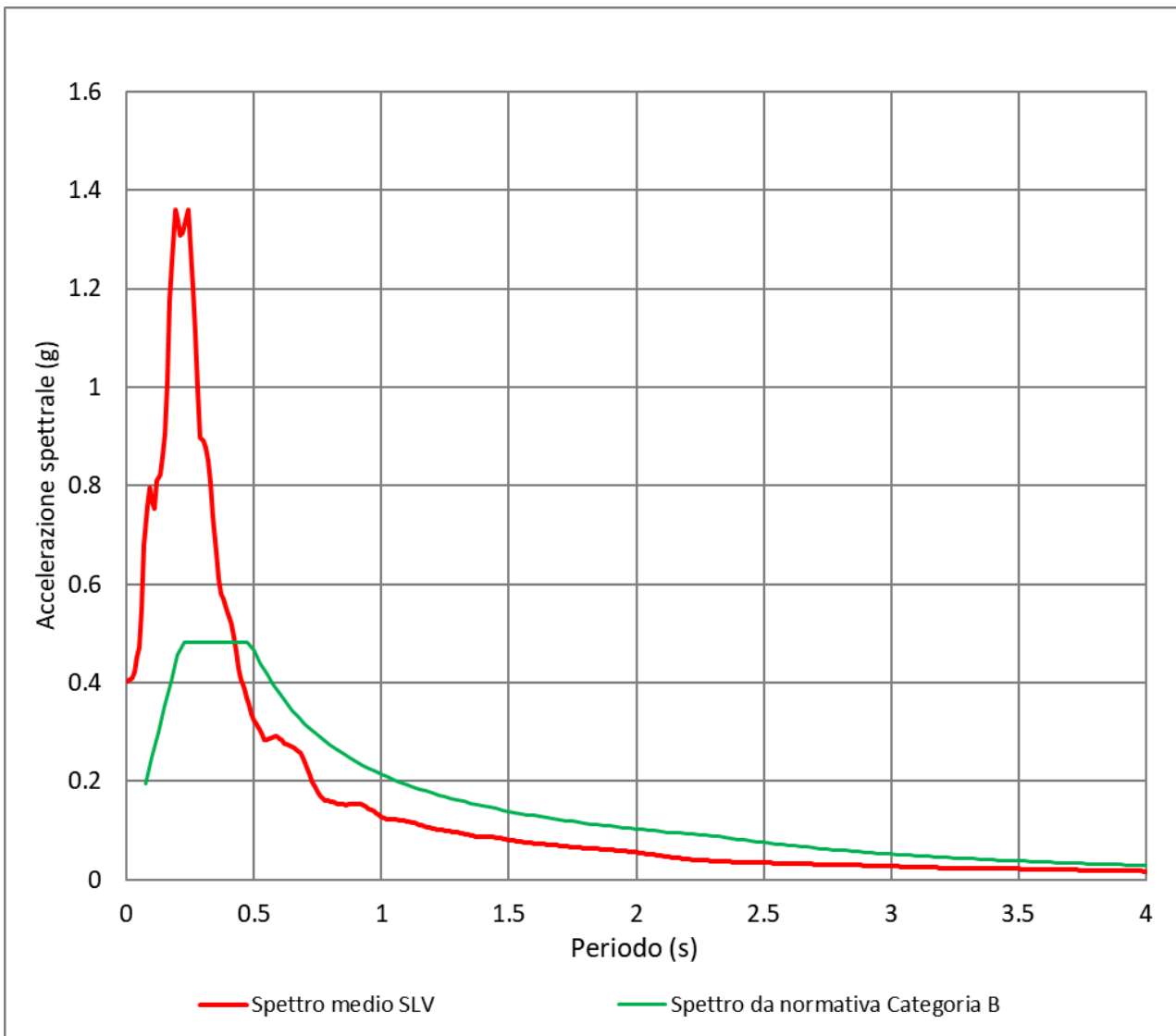


Figura 5-22 - Spettro medio di risposta in accelerazione per la verticale “Parco pubblico Via Achillini”, confrontato con lo spettro semplificato da normativa per la categoria di sottosuolo B

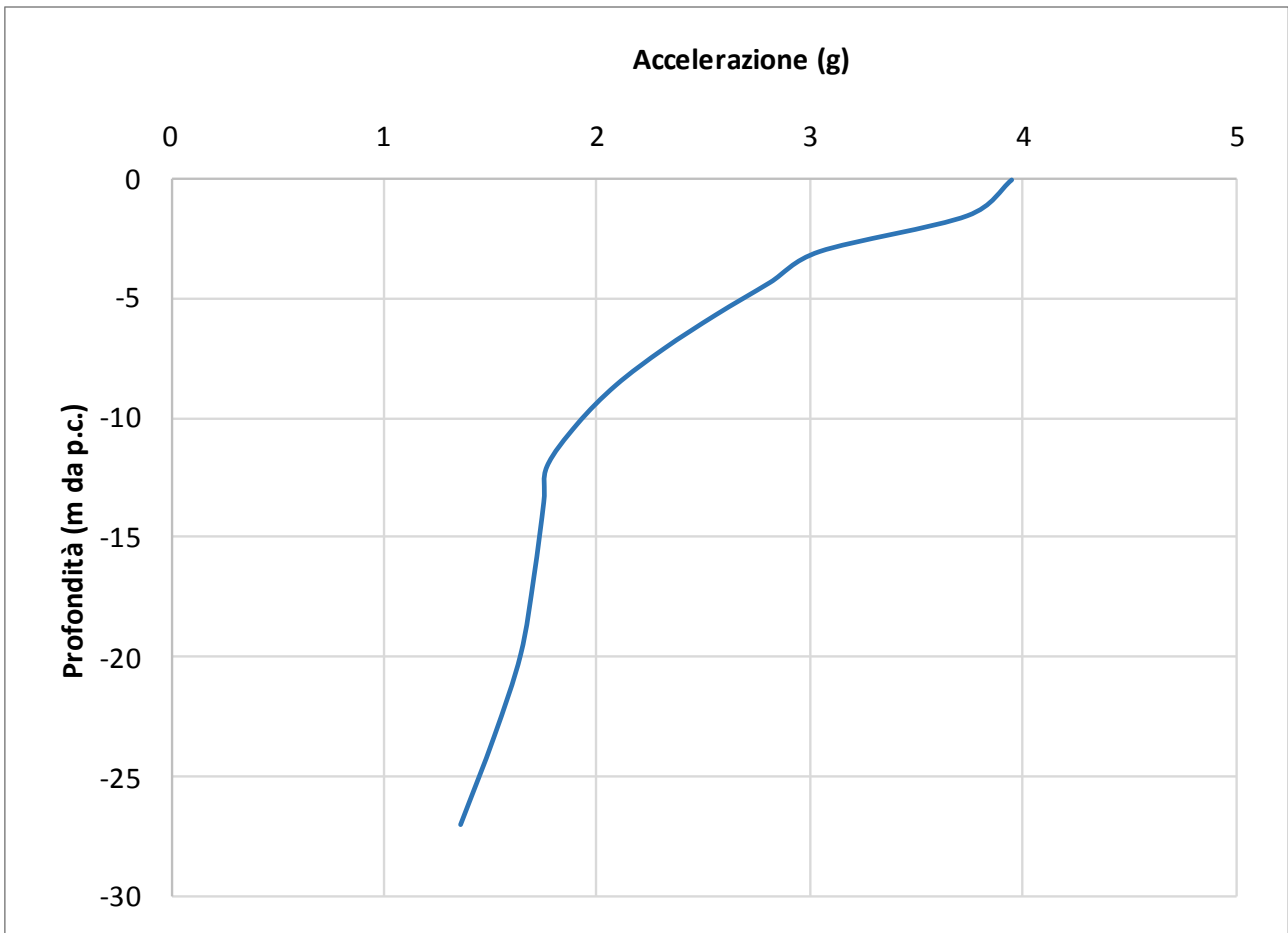


Figura 5-23 - Accelerazione in output in funzione della profondità lungo la verticale “Parco pubblico Via Achillini”

Fattore di amplificazione	Valore calcolato	Valore RER	Differenza
FA (0.1-0.5 s)	2.28	1.7	25.44%
FA (0.4-0.8 s)	1.38	1.2	13.04%
FA (0.5-1.5 s)	1.19	-	-
FA (0.7-1.1 s)	1.15	1.1	4.35%
PGA/PGA ₀	2.41	1.8	25.31%
SI/SI ₀ (0.1-0.5 s)	2.26	1.7	24.78%
SI/SI ₀ (0.5-1.0 s)	1.49	1.1	26.17%
SI/SI ₀ (0.5-1.5 s)	1.43	-	-

Tabella 5-14 - Fattori di amplificazione calcolati lungo la verticale “Parco pubblico Via Achillini”



5.4 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 indicano valori più alti per i fattori da RSL rispetto a quelli degli abachi, mentre differenze negative il contrario. In sostanza le differenze percentuali positive indicano che gli abachi risultano meno 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.

	MASW 1	MASW 2	MASW 3	MASW 4	MASW 5
FA_{PGA}	-14.29%	0.00%	27.35%	12.50%	25.44%
FA_{SA1 0.1-0.5}	-4.48%	31.43%	9.77%	0.00%	13.04%
FA_{SA2 0.4-0.8}	3.51%	7.41%	3.51%	9.09%	4.35%
FA_{SA3 0.7-1.1}	-21.21%	11.63%	25.62%	21.05%	25.31%
FH_{SI1 0.1-0.5}	-12.36%	1.73%	25.44%	13.33%	24.78%
FH_{SI 0.5-1.0}	11.11%	12.70%	25.17%	16.67%	26.17%

Tabella 5-15 - Raffronto tra i risultati delle analisi di secondo livello e terzo livello

L'analisi della Tabella 5-15 evidenzia la tendenza degli abachi a sottostimare lo scuotimento sia ai bassi periodi ($T < 0,5s$) che, in misura maggiore, a quelli alti ($T < 1.1s$). Nel complesso, al contrario di quanto ci si potrebbe aspettare, la RSL risulta maggiormente cautelativa rispetto agli abachi RER.

Un ulteriore confronto può essere effettuato a livello di spettri di risposta in pseudoaccelerazione.

In Figura 5-24 viene proposto il confronto tra gli spettri di risposta in pseudoaccelerazione da RSL e i due spettri semplificati per le categorie di sottosuolo B ed E da NTC 2018, per un tempo di ritorno T_R uguale a 475 anni (corrispondente a una probabilità di superamento del 10% in 50 anni).

Anche in questo caso, è evidente come l'amplificazione locale determini un picco considerevole tra 0.1 e 0.4 s circa, con valori di accelerazione spettrale molto più elevati rispetto agli spettri semplificati. Per periodi maggiori la tendenza si inverte ed è invece lo spettro semplificato a sovrastimare le accelerazioni.

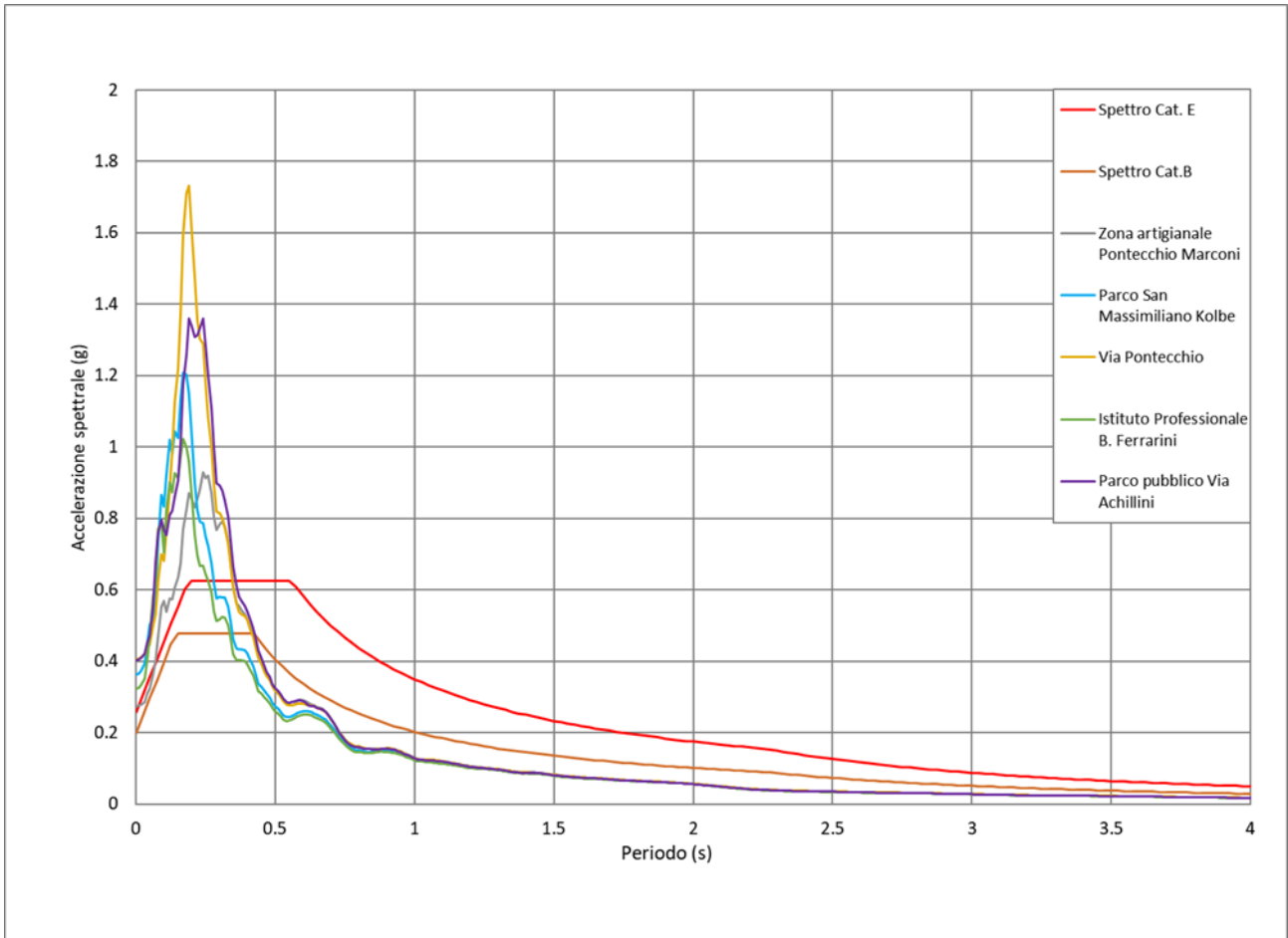


Figura 5-24 – Confronto tra gli spettri di risposta in pseudoaccelerazione da RSL e gli spettri semplificati per le categorie di sottosuolo B ed E da NTC 2018

5.5 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 della risposta sismica locale.

Nel caso del territorio comunale di Sasso Marconi, per l’individuazione del *bedrock* sismico si è fatto affidamento ai risultati delle prove MASW eseguite appositamente per questo studio, adeguatamente correlate con le conoscenze geologiche e stratigrafiche disponibili.

Da tali misure si è potuto constatare la presenza di un *bedrock* sismico (strato caratterizzato da valori di V_s superiori a 800 m/s) a profondità compresa tra -21.0 e -27.0 m circa (cfr. cap. 4.2).

Considerato che le stratigrafie disponibili indicano la presenza, nell’area studiata, di una copertura alluvionale con spessore massimo di 15 m è evidente che il substrato

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	74 di 104



sedimentario presenta uno spessore variabile, superficiale, con valori di Vs inferiori agli 800 m/s. Si tratta presumibilmente di uno strato detensionato e/o fratturato.

Sia le prove MASW che le indagini di sismica passiva a stazione singola (HVSr), effettuate in buon numero, specificatamente per il presente studio e correlate con le prove esistenti, evidenziano che al di sotto dei depositi alluvionali il primo riflettore sismico è caratterizzato da Vs comprese tra i 400÷750 m/s, piuttosto costante nella parte di fondovalle studiata.

Come detto è soltanto oltre i 21-27 m di profondità che il substrato sedimentario presenta valori di Vs superiori a 800 m/s.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	75 di 104



6. MODELLO DEL SOTTOSUOLO CON RELATIVE INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE

La base per uno studio di microzonazione sismica è la definizione, quanto più accurata possibile, del modello geologico, cercando di individuare come varia la successione stratigrafica all'interno del territorio in esame e a che profondità si possa trovare il substrato rigido.

A tale scopo, per il Comune di Sasso Marconi, l'analisi del contesto geologico, descritto al capitolo 3, e gli esiti delle indagini geognostiche e geofisiche disponibili e di nuova realizzazione, hanno consentito di definire il modello del sottosuolo finalizzato alla caratterizzazione sismica.

Come già ampiamente descritto, il settore di fondovalle in esame è essenzialmente caratterizzato da depositi quaternari riferibili al fiume Reno e da un substrato geologico, di natura prevalentemente arenacea, che per i primi 10÷15 m di spessore risulta intensamente detensionato e/o fratturato (vedi par. 5.5).

I risultati delle indagini geognostiche disponibili e di nuova realizzazione hanno permesso di definire con maggiore accuratezza l'assetto stratigrafico dell'area. Va infatti evidenziato che, per lo studio di microzonazione sismica di Sasso Marconi, non si è potuto disporre di punti di controllo distribuiti sull'intero territorio comunale, bensì esclusivamente sul territorio urbanizzato e, pertanto, l'analisi è stata focalizzata principalmente sul settore di fondovalle posto in sinistra idrografica del fiume Reno.

In particolare, i sondaggi stratigrafici e le prove penetrometriche, in grado di raggiungere profondità d'investigazione comprese tra 5÷15 metri, hanno evidenziato chiaramente la presenza di una coltre di sedimenti alluvionali fini e scarsamente consistenti, costituiti principalmente da limi sabbiosi e limi argillosi, che ricopre depositi più consistenti caratterizzati prevalentemente da ghiaie in matrice sabbiosa e limosa.

L'analisi delle registrazioni HVSR e in particolare degli esiti spettrali H/V (frequenze fondamentali F_0 e massime intensità degli alti spettrali) hanno consentito di individuare essenzialmente due situazioni locali:

- la prima caratterizzata da frequenze di risonanza fondamentali medio-alte, comprese tra 3.5 e 7 Hz e rappresentative del contatto più profondo tra i depositi alluvionali e il substrato geologico superficialmente detensionato e/o fratturato;
- la seconda, invece, caratterizzata da frequenze di risonanza alte ($F_0 > 8$ Hz) e correlabile al passaggio tra la coltre alluvionale fine e i depositi alluvionali più consistenti.

Tale tendenza, piuttosto costante nel settore di fondovalle in esame, suggerisce una certa continuità nello spessore dei sedimenti alluvionali e conseguentemente nella profondità del *bedrock*.

In sintesi, gli areali studiati, sono caratterizzati dalla presenza in superficie di:

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	76 di 104



- Substrato rigido affiorante/subaffiorante: costituito da formazioni appartenenti alle Unità Plioceniche di Margine Appenninico e alla Successione Epiligure.
- Depositi alluvionali terrazzati prevalentemente ghiaiosi lungo il corso d'acqua del fiume Reno e del torrente Olivetta.
- Depositi alluvionali terrazzati a granulometria variabile da sabbie limose fino alle argille limose (AES7, AES8, AES8a).
- Detriti di versante e conoidi alluvionali, in corrispondenza degli sbocchi vallivi.

Le geometrie essenziali del modello del sottosuolo sono state sintetizzate nelle sezioni geologico-tecniche ricostruite per le aree di studio, la cui traccia è riportata nella Carta Geologico-Tecnica per la microzonazione sismica. Va evidenziato che l'ubicazione delle tracce delle sezioni geologico-tecniche è stata vincolata dalla distribuzione dei dati geognostici disponibili e, pertanto, ci si è limitati ad attraversare le aree maggiormente edificate.

Il profilo A-A'', riportato in Figura 6-1, è orientato NW/SE/SW e attraversa gli abitati di Borgonuovo di Pontecchio e la zona artigianale di Pontecchio Marconi, all'estremità settentrionale di Sasso Marconi. La sezione riprende la morfologia pianeggiante della zona di fondovalle del fiume Reno, evidenziando la presenza di una coltre di depositi alluvionali terrazzati prevalentemente limosi (MLtf), scarsamente consistenti e di spessore medio compreso tra 5 e 15 m, al di sotto dei quali si rinvengono depositi alluvionali terrazzati, prevalentemente ghiaiosi (GMtf). Questi ultimi poggiano a loro volta su un substrato di tipo lapideo stratificato (LPS), caratterizzato per i primi 10÷15 metri da un'intensa e diffusa fratturazione e/o alterazione (SFLPS). Si individuano infine due forme di conoide alluvionale nei pressi di Borgonuovo di Pontecchio.

Il profilo B-B', riportato in Figura 6-2, è orientato W-E ortogonale al profilo A-A'' e attraversa l'abitato della frazione di Borgonuovo di Pontecchio sino all'Autostrada A1, in sinistra idrografica del fiume Reno. La sezione mette in evidenza la morfologia degradante dalla zona collinare a quella di fondovalle e individua, all'estremità orientale, la presenza di un substrato granulare cementato di tipo stratificato (GRS) che, anche in questo caso, è caratterizzato in affioramento da fratturazione e/o alterazione (SFGRS). Procedendo verso la zona pianeggiante si osserva il passaggio a un substrato di lapideo stratificato (LPS), anch'esso fratturato e/o alterato superficialmente (SFLPS) ma ricoperto da depositi alluvionali terrazzati prevalentemente sabbiosi di tipo SMtf. Nella zona più pianeggiante affiora invece una coltre di depositi alluvionali terrazzati prevalentemente limosi (MLtf), che ricopre i depositi alluvionali sempre terrazzati, prevalentemente ghiaiosi (GMtf), di spessore indicativamente maggiore a 5 m.

Il profilo C-C', di Figura 6-3, orientato NE-SW e passante per l'abitato di Sasso Marconi e la frazione di Fontana, attraversa il settore centro meridionale della zona di fondovalle del fiume Reno. L'assetto stratigrafico dell'area in esame è pressoché analogo a quello individuato per il profilo A-A'', eccetto per la presenza di un substrato granulare cementato (GR), superficialmente fratturato e/o alterato (SFGR) affiorante in corrispondenza della Rupe di Sasso, elemento morfologico che domina la confluenza del Reno con il torrente Setta.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	77 di 104








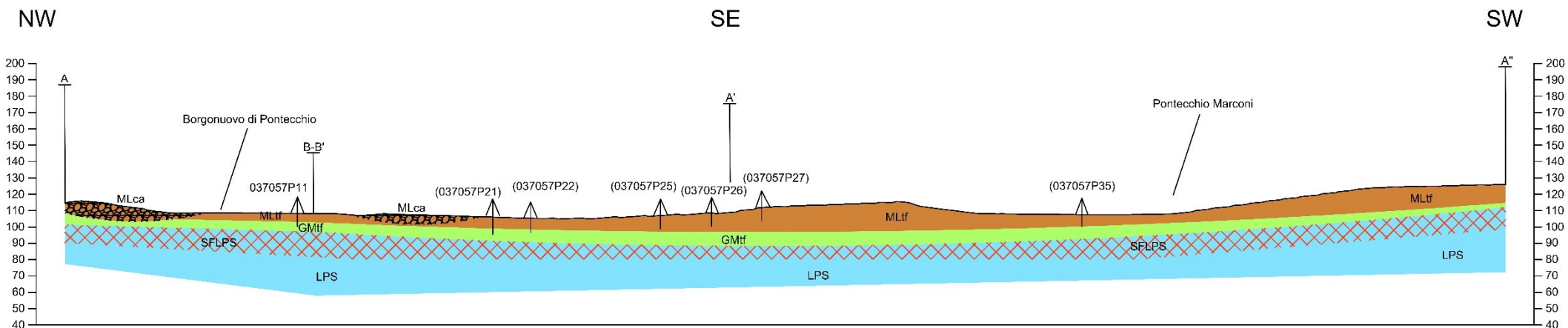
Anche in questo caso, la sezione mette in evidenza la presenza dei depositi alluvionali terrazzati prevalentemente limosi (MLtf), che ricoprono depositi alluvionali prevalentemente ghiaiosi (GMtf) in corrispondenza dell'abitato di Sasso Marconi e quelli prevalentemente sabbiosi (SMtf), talvolta affioranti, in corrispondenza di Fontana. Infine, si individua una conoide alluvionale relitta a nord dell'abitato di Sasso Marconi.

Infine, in Figura 6-4, viene riportato il profilo D-D' che attraversa il capoluogo con direzione NW-SE ortogonalmente al profilo C-C' e al corso del fiume Reno. La sezione mostra la morfologia convessa della zona di fondovalle e individua, fin dal primo sottosuolo, la presenza di un substrato granulare cementato (GR), superficialmente fratturato e/o alterato (SFGR), affiorante in corrispondenza del margine collinare. Diversamente, nella porzione valliva quest'ultimo risulta ricoperto da depositi alluvionali terrazzati, prevalentemente ghiaiosi (GMtf), di spessore medio maggiore di 5 m, in parte affioranti in corrispondenza del fiume Reno e in parte coperti da una coltre di depositi alluvionali fini prevalentemente limosi (MLtf), di spessore medio compreso tra 3÷15 m, in corrispondenza dell'abitato di Sasso Marconi.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	78 di 104



-  Depositi alluvionali costituiti prevalentemente da limi inorganici, farina di roccia, sabbie fini limose o argillose, limi argillosi di bassa plasticità, di conoide alluvionale, di spessore 3+15 m
-  Depositi alluvionali costituiti prevalentemente da limi inorganici, farina di roccia, sabbie fini limose o argillose, limi argillosi di bassa plasticità, di terrazzo fluviale, di spessore 5+15 m
-  Depositi alluvionali costituiti prevalentemente da ghiaie limose, miscela di ghiaia, sabbia e limo, di terrazzo fluviale di spessore medio di > 5 m
-  Substrato di tipo lapideo stratificato fratturato/alterato
-  Substrato di tipo lapideo stratificato



Profilo A-A"
Borgonuovo di Pontecchio - Pontecchio Marconi

Figura 6-1 - Stralcio della sezione A-A'' (Borgonuovo di Pontecchio - Pontecchio Marconi)

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	79 di 104

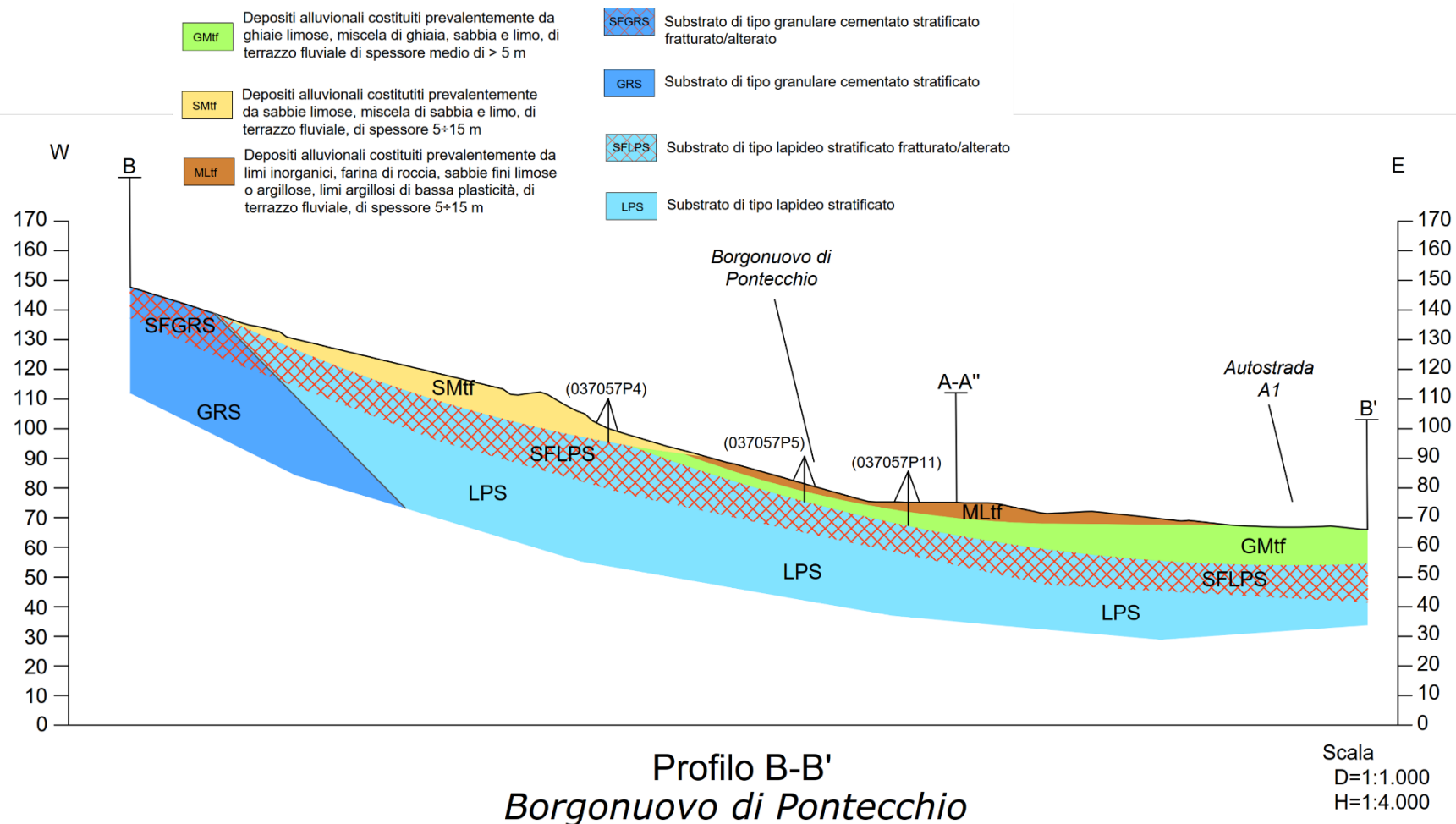


Figura 6-2 - Stralcio della sezione geologico-tecnica B-B' (Borgonuovo di Pontecchio)

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	80 di 104

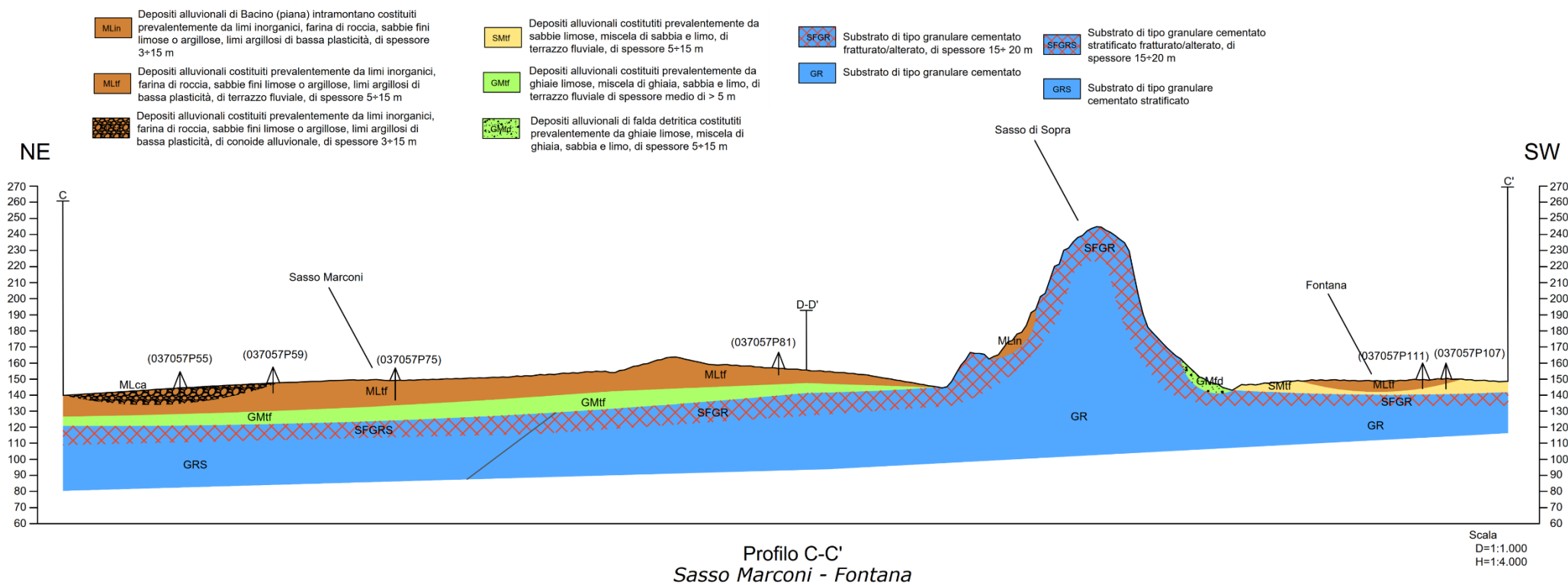


Figura 6-3 – Stralcio della sezione geologico-tecnica C-C' (Sasso Marconi – Fontana)

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	81 di 104

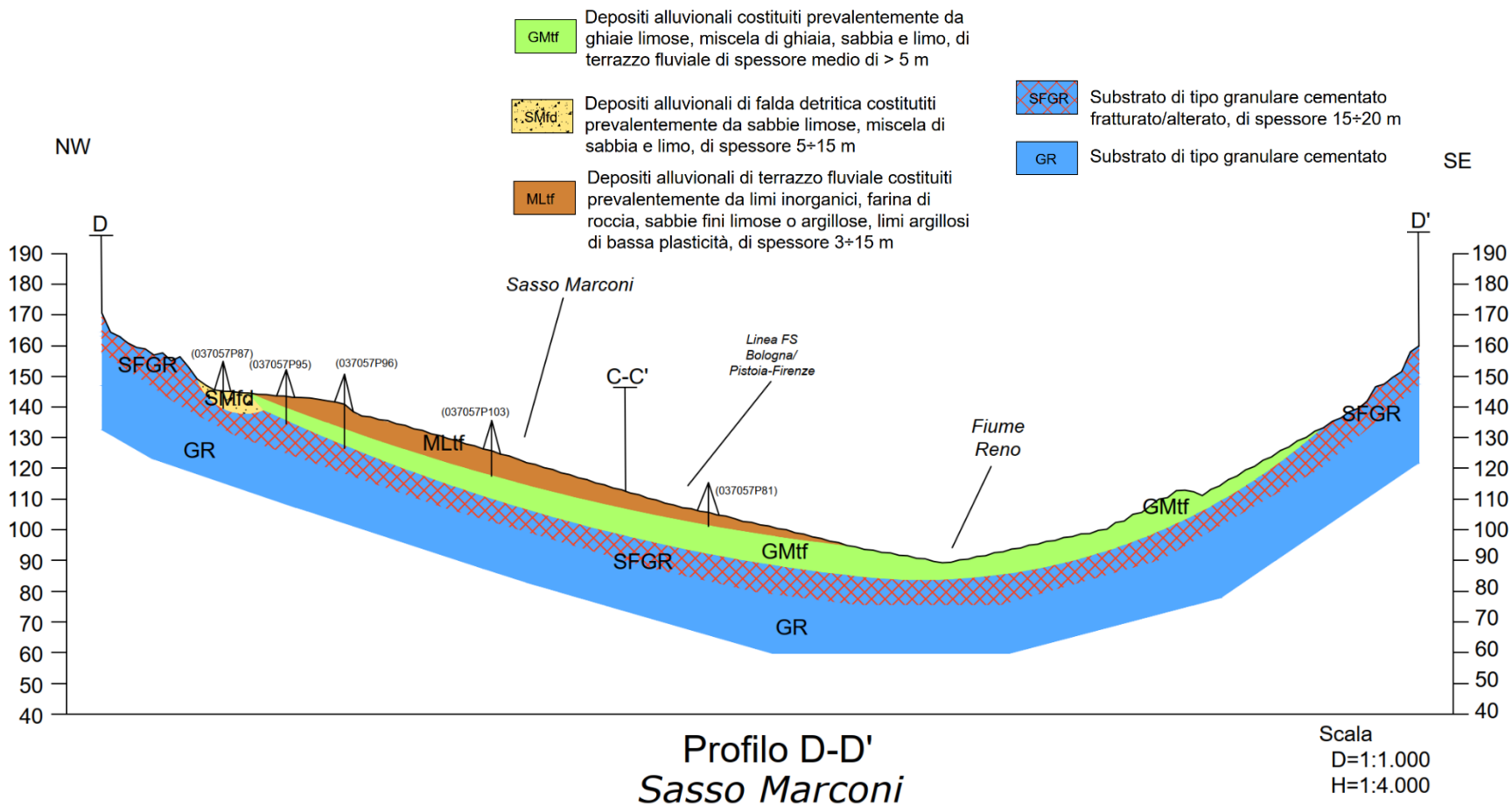


Figura 6-4 - Stralcio della sezione geologico-tecnica D-D' (Sasso Marconi)

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	82 di 104



7. ELABORATI CARTOGRAFICI

7.1 Carta delle indagini

Nella Carta delle indagini, in scala 1:5.000, 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.

Esse sono state distinte in base alla tipologia in:

- sondaggio a carotaggio continuo (S)
- sondaggio a carotaggio continuo che intercetta il substrato (SS)
- prova penetrometrica statica con punta meccanica (CPT)
- prova penetrometrica statica con piezocono (CPTU)
- prova penetrometrica dinamica super pesante (DS)
- prova penetrometrica dinamica media (DM)
- prova penetrometrica dinamica leggera (DL)
- stazione microtremore a stazione singola (HVSR)
- MASW
- REMI
- ERT

come raffigurato nella legenda riportata in Figura 7-1.

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

- N° 20 sondaggi a carotaggio continuo
- N° 7 sondaggi a carotaggio continuo che intercettano il substrato
- N° 53 prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT)
- N° 1 prova penetrometrica statica con piezocono
- N° 14 prove penetrometriche dinamiche super pesanti
- N° 1 prova penetrometrica dinamica media
- N° 2 prova penetrometrica dinamica leggera
- N° 14 stazioni di microtremore a stazione singola
- N° 12 MASW
- N° 2 REMI

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

- N° 41 stazioni di microtremore a stazione singola (HVSR)
- N° 5 MASW
- N° 5 tomografie elettriche ERT

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	83 di 104












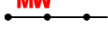
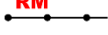

	Stratigrafia zona MS (teorica)
	Sondaggio a carotaggio continuo (S)
	Sondaggio a carotaggio continuo che intercetta il substrato (SS)
	Prova penetrometrica statica con punta meccanica (CPT)
	Prova penetrometrica statica con piezocono (CPTU)
	Prova penetrometrica dinamica super pesante (DS)
	Prova penetrometrica dinamica media (DM)
	Prova penetrometrica dinamica leggera (DL)
	Stazione microtremore a stazione singola (HVSr)
	MASW
	REMI
	ERT

Figura 7-1 - Legenda della Carta delle indagini

7.2 Carta Geologico-Tecnica per la microzonazione sismica

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, opportunamente verificata mediante sopralluoghi di campagna:

- Cartografia CARG Foglio 237 "Sasso Marconi" alla scala 1:50.000, Servizio Geologico d'Italia;
- Cartografia CARG Foglio 220 "Casalecchio di Reno" alla scala 1:50.000, Servizio Geologico d'Italia;

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	84 di 104



- “Carta Geologica della Regione Emilia-Romagna”. Sezioni 220110, 220120, 220150, 220160, 237080, 237040, 237030 e 237020 alla scala 1:10.000, Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna;
- “Carta inventario delle frane dell’Emilia-Romagna” edizione Giugno 2018, alla scala 1:10.000, Sasso Marconi – tavole 1, 2, 3 e 4;
- “Carta di area vasta del rischio idraulico, rischio da frana e dell’assetto dei versanti”, alla scala 1:25.000 / fogli III e V, da Piano Territoriale Metropolitan di Bologna, approvato con Delibera del consiglio metropolitano n.16 del 12/05/2021;
- “Piano Stralcio per l’Assetto Idrogeologico”, Autorità di Bacino del Reno – Titolo I – Rischio da frana e assetto dei versanti, alla scala 1:25.000, territorio del comune di Sasso Marconi, approvato con D.G.R. n.567 del 07/04/2003;
- indagini puntuali e lineari, per la descrizione delle quali si rimanda al precedente paragrafo (7.1).

Nella Carta Geologico-tecnica, come si osserva in Figura 7-2, 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:* occupano estesamente la zona di fondovalle del fiume Reno e del torrente Olivetta, alcuni settori intravallivi e sbocchi vallivi e sono dovute alla deposizione in ambiente di terrazzo fluviale (organizzati in diversi ordini), bacino (piana) intramontano e falda detritica;
- **SM** – *Sabbie limose, miscela di sabbia e limo:* interessano alcune porzioni terrazzate a ridosso di sbocchi vallivi nel settore occidentale del fondovalle del fiume Reno;
- **ML** – *Limi inorganici, farina di roccia, sabbie fini limose o argillose, limi argillosi di bassa plasticità:* interessano ampie zone terrazzate del fondovalle del fiume Reno e alcune porzioni del fondovalle del torrente Lavino, in corrispondenza del confine nordoccidentale del comune, e sono il risultato di una deposizione in ambiente di terrazzo fluviale, di bacino (piana) intramontano e di conoide alluvionale.

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

- **in** – bacino (piana) intramontano;
- **ca** – conoide alluvionale;
- **tf** – terrazzo fluviale;

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	85 di 104



- **fd** – falda detritica.

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

Tipi di copertura

	RL	Terreni contenenti resti di attività antropica
	GMin	Ghiaie limose, miscela di ghiaia, sabbia e limo di Bacino (piana) intramontano
	GMtf	Ghiaie limose, miscela di ghiaia, sabbia e limo di Terrazzo fluviale
	GMfd	Ghiaie limose, miscela di ghiaia, sabbia e limo di Falda detritica
	SMtf	Sabbie limose, miscela di sabbia e limo di Terrazzo fluviale
	SMfd	Sabbie limose, miscela di sabbia e limo di Falda detritica
	MLtf	Limi inorganici, farina di roccia, sabbie fini limose o argillose, limi argillosi di bassa plasticità di Terrazzo fluviale
	MLin	Limi inorganici, farina di roccia, sabbie fini limose o argillose, limi argillosi di bassa plasticità di Bacino (piana) intramontano
	MLca	Limi inorganici, farina di roccia, sabbie fini limose o argillose, limi argillosi di bassa plasticità di Conoide alluvionale

Forme di superficie e sepolte

	Orlo di terrazzo fluviale (10-20m)
	Conoide alluvionale
	Falda detritica
	Picco isolato

Elementi tettonico strutturali

	Sinclinale
	Anticlinale
	Giacitura strati

Substrato geologico

	CO	Coesivo sovraconsolidato
	COS	Coesivo sovraconsolidato stratificato
	SFGR	Granulare cementato fratturato / alterato
	SFGRS	Granulare cementato stratificato fratturato / alterato
	SFLPS	Lapideo stratificato fratturato / alterato

Instabilità di versante

	Scorrimento - attiva
	Colata - attiva
	Complessa - attiva
	Scorrimento - quiescente
	Colata - quiescente
	Complessa - quiescente
	Non definito - quiescente

Elementi geologici e idrogeologici

	Pozzo o sondaggio che ha raggiunto il substrato geologico (profondità in m)
	Pozzo o sondaggio che non ha raggiunto il substrato geologico (profondità in m)
	Profondità (m) della falda in aree con sabbie e/o ghiaie
	Traccia della sezione geologica rappresentativa del modello del sottosuolo

Figura 7-2 – Stralcio da legenda della Carta geologico-tecnica

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	86 di 104



Quanto ai substrati geologici sono stati effettuati degli accorpamenti, definendoli:

CO - Coesivo sovraconsolidato, dove sono presenti le unità:

- AVS – Argille Varicolori della Valsamoggia
- MVT – Brecce Argillose della Val Tiepido - Canossa
- TER2a – Formazione del Termina – Membro di Montebaranzone (*Litofacies argillosa*)

COS - Coesivo sovraconsolidato, stratificato, dove sono presenti le unità:

- FAA – Formazione delle Argille Azzurre
- CIG – Formazione di Cigarello
- CTG – Formazione di Contignaco

SFLPS - Lapideo, stratificato fratturato/alterato, in corrispondenza delle unità:

- FAAa – Formazione delle Argille Azzurre (*Litofacies arenacea*)
- FPGa – Formazione di Poggio (*Litofacies arenacea*)
- MMP – Marne di Monte Piano
- MOH – Formazione di Monghidoro
- PAT – Formazione di Pantano
- PAT3 – Formazione di Pantano – Membro di Calvenzano
- RUM2 – Formazione di Monterumici – Membro di Ca' di Mazza

SFGR - Granulare cementato fratturato/alterato, in corrispondenza delle unità:

- ADO1 – Formazione di Monte Adone – Membro di Monte delle Formiche
- RUM1 – Formazione di Monterumici – Membro di Scasoli

SFGRS - Granulare cementato, stratificato fratturato/alterato, in corrispondenza delle unità:

- ADO2 – Formazione di Monte Adone – Membro delle Ganzole
- ANT – Formazione di Antognola
- LOI – Formazione di Loiano

Sempre in Figura 7-2, si osserva che nella Carta geologico-tecnica sono stati indicati anche:

- Elementi tettonico strutturali
 - Sinclinale
 - Anticlinale
 - Giacitura strati

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	87 di 104



- Forme di superficie e sepolte
 - Orlo di terrazzo fluviale (10-20m)
 - Conoide alluvionale
 - Falda detritica
 - Picco isolato

- Elementi geologici e idrogeologici
 - Pozzo o sondaggio che 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, sono state indicate le tracce delle sezioni geologico-tecniche significative e rappresentative del modello del sottosuolo, già descritte al capitolo 6, redatte con scopo di migliorare la comprensione del modello geologico delle aree oggetto di microzonazione.

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 (52), con associati i risultati delle singole prove. In particolare, sono stati indicati il valore F_0 del picco significativo, corrispondente alla frequenza di risonanza fondamentale (frequenza principale) 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 principale ottenuta, definendo le seguenti classi:

- $F_0 \leq 0.6$
- $0.6 \text{ Hz} < F_0 \leq 1 \text{ Hz}$
- $F_0 \leq 1 \text{ Hz}$
- $1 \text{ Hz} < F_0 < 2 \text{ Hz}$
- $2 \text{ Hz} < F_0 \leq 8 \text{ Hz}$
- $F_0 > 8 \text{ Hz}$

Inoltre, sono state utilizzate simbologie diverse a seconda che la prova sia caratterizzata, in corrispondenza della frequenza principale, da un alto contrasto di impedenza ($H/V > 3$) o da più bassi contrasti di impedenza (ampiezza $H/V \leq 3$) come raffigurato nella legenda riportata in Figura 7-3.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	88 di 104

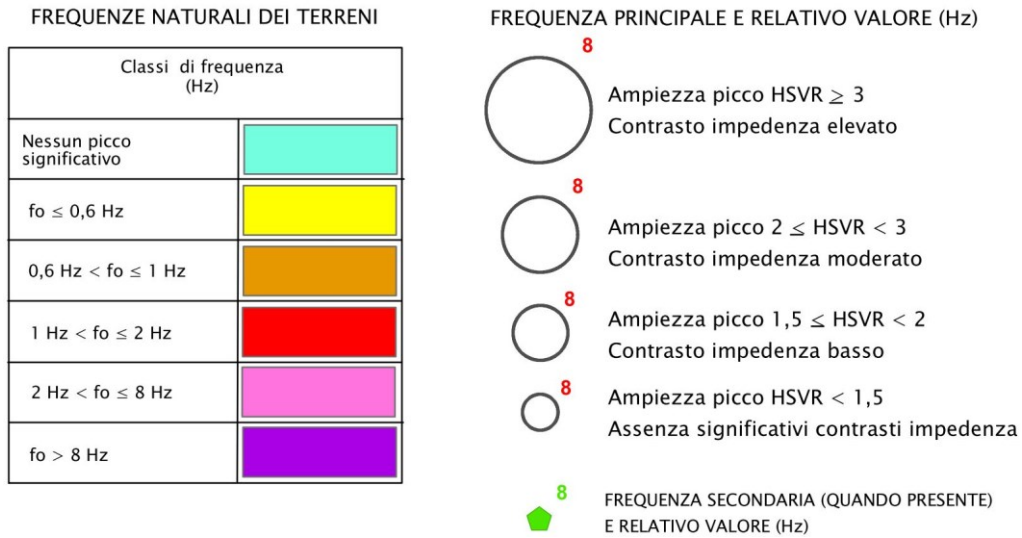


Figura 7-3 - Legenda della Carta delle frequenze

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

PROVA	Picco principale		Picco secondario	
	F ₀	A ₀	F ₁	A ₁
037057P19	8.50	4.90		
037057P28	19.9	2.60	2.50	2.40
037057P31	9.00	5.20		
037057P36	5.00	2.20		
037057P45	8.00	3.20	9.00	3.10
037057P63	12.00	2.50		
037057P73	12.00	2.50		
037057P74	4.50	3.00	6.50	2.20
037057P78	8.50	4.50		
037057P85	5.50	3.20	3.50	2.60
037057P90	6.00	3.50		
037057P98	8.00	3.80	6.30	3.10
037057P101	11.00	4.00		
037057P108	9.50	3.60		
037057P113	6.40	3.50		
037057P114	7.60	4.30	24.00	2.60
037057P115	9.40	4.50		
037057P116	18.30	3.00	13.50	2.80
037057P117	4.00	2.60	15.00	2.14



PROVA	Picco principale		Picco secondario	
	F ₀	A ₀	F ₁	A ₁
037057P118	7.60	2.25	1.25	2.05
037057P119	9.20	4.10	5.50	3.10
037057P120	6.00	3.70		
037057P121	3.80	3.60	10.00	2.30
037057P122	5.25	1.30	9.25	1.25
037057P123	6.50	4.40	8.00	3.50
037057P124	3.70	3.60		
037057P125	5.40	5.80	22.00	2.00
037057P126	3.70	3.60		
037057P127	4.00	3.20	5.30	3.10
037057P128	7.10	5.50		
037057P129	4.40	6.60	3.50	5.80
037057P130	4.15	2.90	10.00	2.60
037057P131	4.75	2.90	11.00	2.50
037057P132	5.30	5.80	19.00	2.50
037057P133	5.75	2.30		
037057P134	4.75	3.40	21.00	2.60
037057P135	14.50	4.20	19.00	4.10
037057P136	9.65	3.20	8.35	3.10
037057P137	6.70	3.10	5.50	3.00
037057P138	14.50	4.20		
037057P139	4.50	2.50		
037057P140	10.00	4.30	7.75	3.30
037057P141	6.50	4.50	7.75	4.30
037057P142	17.50	3.90		
037057P143	11.30	5.30	14.00	4.60
037057P144	5.25	4.70	6.50	2.70
037057P145	17.60	3.80	5.50	3.10
037057P146	5.35	3.20	14.00	2.80
037057P147	2.20	2.40	6.00	2.05
037057P148	3.90	3.20	5.50	2.50
037057P149	12.15	3.50	14.00	3.40
037057P150	6.15	6.60	23.00	3.70
037057P151	3.30	2.50		
037057P152	4.70	4.00	6.50	3.50
037057P166	10.50	2.30	6.00	2.20

Tabella 7-1 - Riepilogo dei risultati delle prove tromografiche in Comune di Sasso Marconi

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	90 di 104



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 Sasso Marconi, non è mai presente la categoria 1 – zone stabili.

Infatti, come già esposto nel capitolo 5.5, l'analisi di terzo livello, appositamente effettuata per il presente studio, ha consentito di individuare soltanto oltre i 21 ÷ 27 m di profondità un orizzonte con valori di Vs superiori a 800 m/s. Inoltre, alla base dei depositi alluvionali continentali, si osserva sempre un forte incremento delle Vs, tale da indicare la presenza un primo riflettore sismico che può essere assunto come *bedrock*, responsabile di amplificazioni locali.

Tenuto conto del complesso assetto tettonico-deformativo regionale e della natura geolitologica delle formazioni in esame (vedi capitolo 3), nella definizione delle successioni stratigrafiche, si è fatto riferimento agli stessi accorpamenti proposti nell'analisi sismica contenuta nel Quadro Conoscitivo del PTM di Bologna (cfr. paragrafo 2.5), ovvero, è stato considerato

- substrato geologico rigido, anche se nei primi 10 ÷ 15 m detensionato e/o fratturato, quello appartenente alle seguenti tipologie:
 - LPS - Lapideo, stratificato
 - GR - Granulare cementato
 - GRS - Granulare cementato, stratificato
- substrato geologico non rigido, quello appartenente alle seguenti tipologie:
 - CO - Coesivo sovraconsolidato
 - COS - Coesivo sovraconsolidato, stratificato

Sono state, così, individuate le seguenti 11 Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali (cfr. Figura 7-4):

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	91 di 104



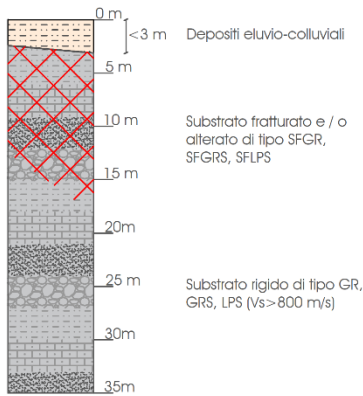
- Zona 2099 – Successione stratigrafica costituita da substrato di tipo SFGR, SFGRS, SFLPS fratturato e/o alterato, di spessore compreso tra 10 m e 15 m, sotto il quale si rinviene un substrato rigido ($V_s > 800$ m/s) sempre di tipo GR, GRS o LPS e ricoperto da una coltre di depositi eluvio-colluviali di spessore medio inferiore a 3 m.
- Zona 2001 – Successione stratigrafica costituita da substrato non rigido ($V_s < 800$ m/s) di tipo CO o COS, ricoperto da una coltre di depositi eluvio-colluviali di spessore medio inferiore a 3 m.
- Zona 2002 – Successione stratigrafica costituita da una copertura di depositi di origine alluvionale e/o falda detritica e/o di conoide alluvionale prevalentemente limosi e sabbiosi, di spessore compreso tra 5 m e 15 m, che ricopre uno o più livelli ghiaiosi sotto i quali si rinviene un substrato analogo a quello della zona 2099.
- Zona 2003 - Successione stratigrafica costituita da una copertura di depositi di origine alluvionale prevalentemente limosi, di spessore inferiore a 5 m, che ricopre uno o più livelli ghiaiosi sotto i quali si rinviene un substrato analogo a quello della zona 2099.
- Zona 2004 - Successione stratigrafica costituita da una copertura di depositi di origine alluvionale e/o di terrazzo fluviale prevalentemente ghiaiosi, di spessore indicativamente maggiore a 5 m, sotto la quale si rinviene un substrato analogo a quello della zona 2099.
- Zona 2005 - Successione stratigrafica costituita da una copertura di depositi di origine alluvionale e/o di bacino (piana) intramontano prevalentemente ghiaiosi, di spessore indicativamente maggiore a 3 m, sotto la quale si rinviene un substrato analogo a quello della zona 2099.
- Zona 2006 - Successione stratigrafica costituita da una copertura di depositi di origine alluvionale e/o falda detritica prevalentemente sabbiosi con livelli ghiaiosi, di spessore medio indicativamente maggiore a 3 m, sotto la quale si rinviene un substrato analogo a quello della zona 2099.
- Zona 2007 - Successione stratigrafica costituita da una copertura di depositi di origine alluvionale prevalentemente limosi, di spessore medio maggiore a 3 m, sotto la quale si rinviene un substrato non rigido ($V_s < 800$ m/s) di tipo CO o COS.
- Zona 2008 - Successione stratigrafica costituita da una copertura di depositi di origine antropica a granulometria mista, di spessore medio maggiore a 3 m, sotto la quale si rinviene un substrato analogo a quello della zona 2099.
- Zona 2009 - Successione stratigrafica costituita da una copertura di depositi di falda detritica, di spessore generalmente compreso tra 3 m e 15 m, sotto la quale si rinviene un substrato analogo a quello della zona 2099.
- Zona 2010 - Successione stratigrafica costituita da una copertura di depositi di falda detritica, di spessore generalmente compreso tra 3 m e 15 m, sotto la quale si rinviene un substrato non rigido ($V_s < 800$ m/s) di tipo CO o COS.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	92 di 104

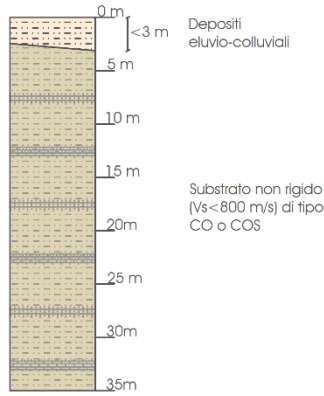


ZONE STABILI SUSCETTIBILI DI AMPLIFICAZIONI LOCALI

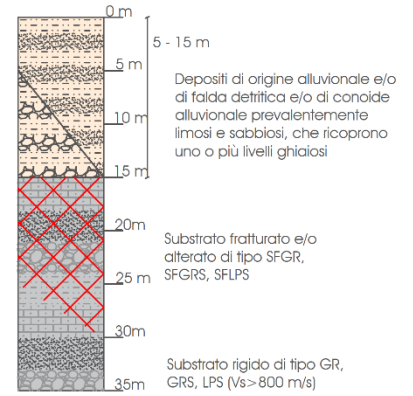
ZONA 2099



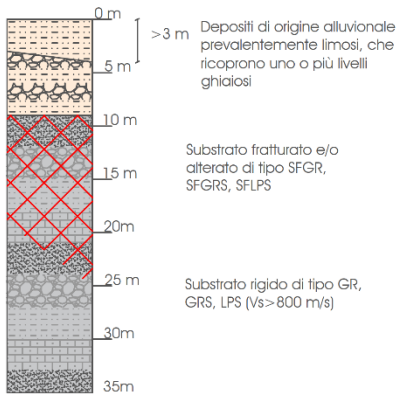
ZONA 2001



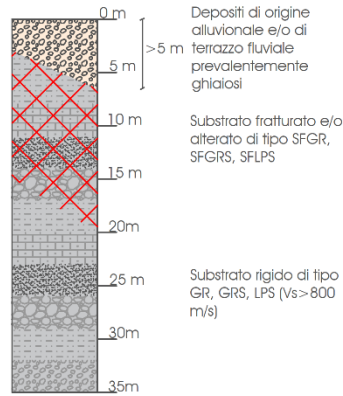
ZONA 2002



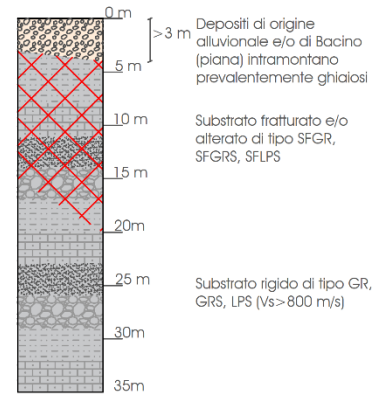
ZONA 2003



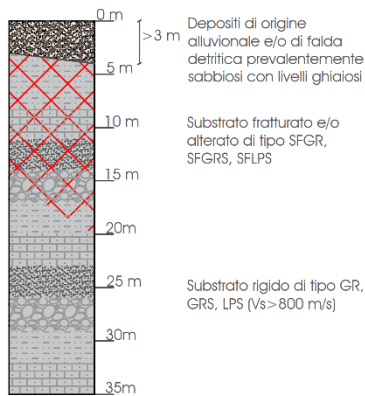
ZONA 2004



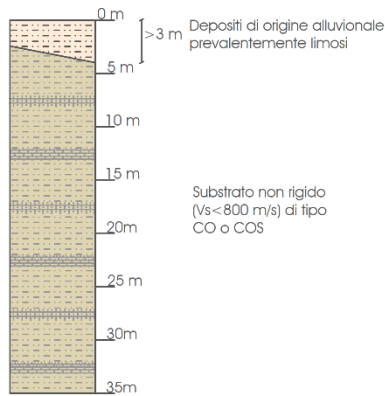
ZONA 2005



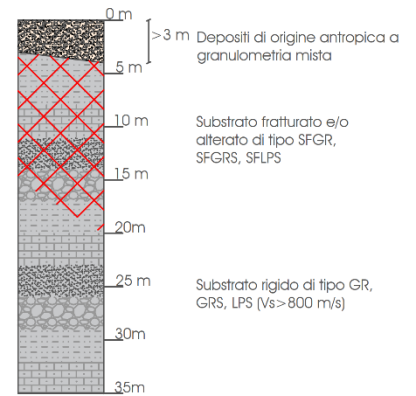
ZONA 2006



ZONA 2007



ZONA 2008



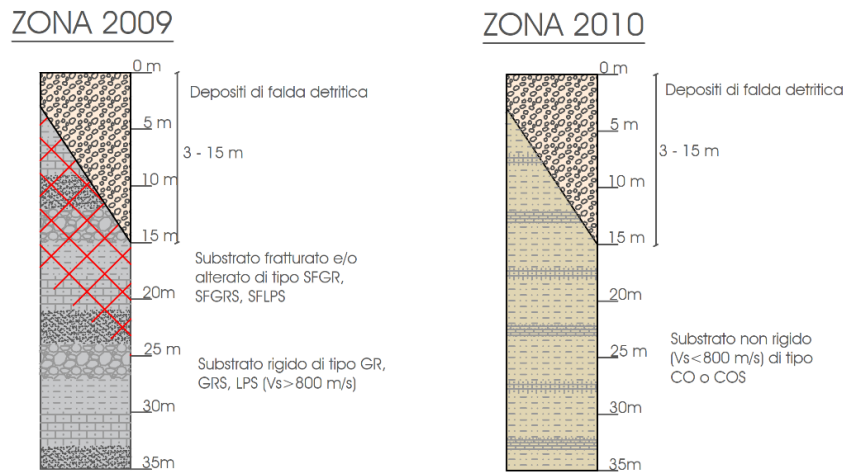


Figura 7-4 - Colonnine litostratigrafiche sintetiche, rappresentative delle microzone stabili suscettibili di amplificazioni locali

e le seguenti 2 Zone di attenzione per instabilità di versante (cfr. Figura 7-5):

- **ZA-FR – Zona di Attenzione per Instabilità di versante – Zona 11**
Successione stratigrafica costituita da una copertura di depositi frana di spessore generalmente compreso tra 3 m e 15 m, costituita da materiali prevalentemente argilloso-limosi, sotto la quale si rinviene un substrato analogo a quello della zona 2099.
- **ZA-FR – Zona di Attenzione per Instabilità di versante – Zona 12**
Successione stratigrafica costituita da una copertura di depositi frana di spessore generalmente compreso tra 3 m e 15 m, costituita da materiali prevalentemente argilloso-limosi, sotto la quale si rinviene un substrato di tipo CO o COS.

ZONE DI ATTENZIONE PER INSTABILITA'

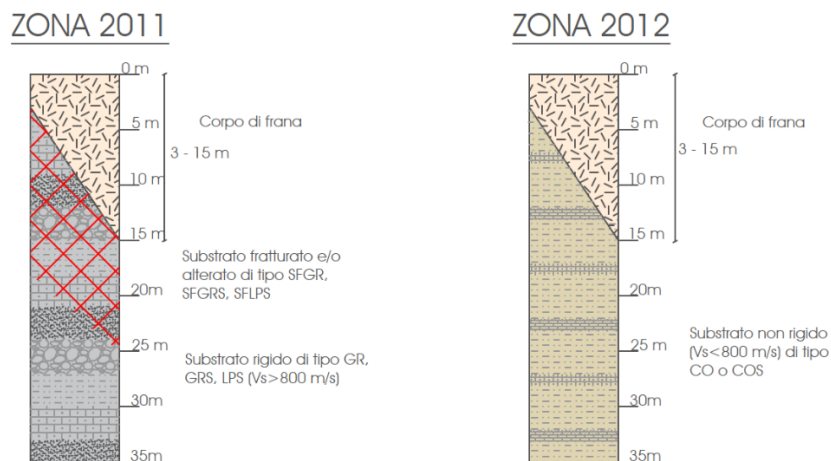


Figura 7-5 - Colonnine litostratigrafiche sintetiche, rappresentative delle microzone di attenzione per instabilità di versante

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	94 di 104



7.5 Carta della 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 (V_s) riferita a tutte le aree oggetto di studio, alla scala 1:5.000.

In tale elaborato sono ubicati i punti di misura, distinguendoli a seconda della tipologia di prova effettuata (MASW, prova tomografica e ReMi) e indicando il corrispondente valore di V_{sH} (in m/s), dove:

$$V_{sH} = \frac{H}{\sum \frac{h_i}{V_{s_i}}}$$

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*)

V_{s_i} = velocità (in m/s) dello strato *i*-esimo (fino al *bedrock*);

I risultati ottenuti hanno consentito di definire i valori di V_{sH} e la relativa profondità H riepilogati nella seguente Tabella 7-2.

PROVA PUNTUALE	PROVA LINEARE	MOPS	H	V_{sH}
037057P19		2002	20.4	284
037057P28		2003	22.7	279
037057P31		2002	6.7	220
037057P45		2002	22.0	423
037057P63		2002	18.3	402
037057P78		2002	28.0	468
037057P85		2003	6.7	302
037057P101		2002	7.6	330
037057P108		2002	15.0	300
037057P113		2002	8.8	171
037057P114		2002	21.4	441
037057P115		2002	6.4	176
037057P119		2002	29.9	380
037057P120		2002	16.7	265
037057P121		2003	5.1	174
037057P123		2002	9.0	169
037057P124		2002	19.1	298
037057P125		2002	17.3	265
037057P126		2002	23.9	291



PROVA PUNTUALE	PROVA LINEARE	MOPS	H	V _{SH}
037057P128		2003	14.5	261
037057P129		2002	5.9	207
037057P135		2003	8.6	254
037057P138		2003	12.1	283
037057P139		2003	24.3	407
037057P140		2003	15.5	318
037057P141		2002	14.1	298
037057P142		2002	17.5	241
037057P143		2002	14.2	329
037057P146		2003	13.5	334
037057P148		2002	25.7	318
037057P149		2003	29.8	400
037057P150		2002	22.2	342
037057P152		2002	29.6	440
037057P166		2004	21.5	416
	037057L1	2002	9.0	219
	037057L2	2002	19.0	393
	037057L3	2003	15.0	241
	037057L4	2002	7.5	220
	037057L5	2002	16.9	353
	037057L6	2002	20.0	447
	037057L7	2002	23.0	434
	037057L8	2002	22.9	448
	037057L9	2002	11.3	291
	037057L11	2002	13.0	335
	037057L12	2002	15.4	260
	037057L13	2002	28.2	284
	037057L14	2003	22.3	260
	037057L15	2003	21.3	314.8
	037057L16	2002	21.9	366.4
	037057L17	2002	27.0	378.3
	037057L18	2003	26.7	485.8
	037057L19	2002	25.0	388.4

Tabella 7-2 - Risultati delle misure di velocità delle onde di taglio S



7.6 Carte di microzonazione sismica

Le Carte di microzonazione sismica di Livello 3, in scala 1:5.000, sono state realizzate facendo riferimento ai locali approfondimenti di terzo livello appositamente eseguiti per il presente studio, ad eccezione dell'area posta in località Loreto, frazione di Tignano, dove si è fatto riferimento ad approfondimenti di secondo livello, mediante utilizzo di abachi.

E' stata redatta una cartografia per ciascuno dei seguenti parametri rappresentativi dello scuotimento sismico, calcolati per un tempo di ritorno $TR=475$ anni, con smorzamento $\zeta = 5\%$ (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 è 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 $0,1s \leq T \leq 0,5s$,
 - SA2 per $0,4s \leq T \leq 0,8s$,
 - SA3 per $0,7s \leq T \leq 1,1s$,
 - SA4 per $0,5s \leq T \leq 1,5s$;
- $FHSI = SI/SI_0$, 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 velocità (o corrispondente grandezza di Intensità di *Housner*) alla superficie del sito per prefissati intervalli di periodi T :
 - SI1 per $0,1s \leq T \leq 0,5s$,
 - SI2 per $0,5s \leq T \leq 1,0s$,
 - SI3 per $0,5s \leq T \leq 1,5s$.

Nella seguente tabella (cfr. Tabella 7-3) sono indicate le analisi di Risposta Sismica Locale utilizzate per calcolare i sopraindicati parametri, al variare della microzona e, all'interno della stessa microzona, della condizione sismostratigrafica, specificando sito, prova MASW e paragrafo cui fare riferimento.

Zona	Tipo di zona	Sito RSL	MASW	Paragrafo
2002	Stabile suscettibile di amplificazioni locali	Parco San Massimiliano Kolbe	037057L16 – MASW 2	5.3.2
		Via Pontecchio	037057L19 – MASW 3	5.3.3
		Parco pubblico Via Achillini	037057L17 – MASW 5	5.3.5

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	97 di 104



Zona	Tipo di zona	Sito RSL	MASW	Paragrafo
2003	Stabile suscettibile di amplificazioni locali	Zona artigianale Pontecchio Marconi	037057L15 – MASW 1	5.3.1
		Istituto professionale B. Ferrarini	037057L18 – MASW 4	5.3.4

Tabella 7-3 - Associazione tra i differenti settori di territorio e l'analisi di Risposta Sismica Locale che ha consentito di determinare i parametri rappresentativi dello scuotimento sismico

Per l'area ubicata in località Loreto, in cui non sono stati effettuati approfondimenti di terzo livello e che non presenta caratteristiche sismo-stratigrafiche analoghe ai siti oggetto di RSL, i fattori di amplificazione sono stati valutati, utilizzando le tabelle proposte nell'Allegato A2 dell'Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (di cui alla DGR 630/2019), paragrafo A2.1.1 – APPENNINO – COPERTURE SU SUBSTRATO RIGIDO (caratterizzato da $V_{sH} \geq 800$ m/s) inserendo quali dati di ingresso i valori di V_{sH} (416 m/s) e H (21.5 m) ricavati da una prova HVSR appositamente eseguita (037057P166).

In Figura 7-6 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.

V_{sH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
5	1,8	1,7	1,4	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
10	2,0	2,0	1,9	1,7	1,5	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0
15	2,0	2,0	2,0	1,9	1,8	1,6	1,4	1,3	1,2	1,0
20	2,0	2,0	2,0	2,0	1,9	1,7	1,6	1,4	1,3	1,0
25	2,0	2,0	2,0	1,9	1,8	1,8	1,6	1,5	1,3	1,0
30		1,9	1,9	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,2
35		1,9	1,9	1,9	1,9	1,7	1,6	1,4	1,4	1,2
40		1,9	1,9	1,9	1,9	1,7	1,6	1,4	1,4	1,2
50		1,9	1,9	1,9	1,9	1,8	1,6	1,4	1,4	1,2

Fattore di Amplificazione **PGA**

V_{sH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
5	1,7	1,4	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
10	2,1	2,0	1,7	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0
15	2,2	2,2	2,0	1,8	1,5	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0
20	2,2	2,2	2,2	2,0	1,8	1,6	1,4	1,3	1,1	1,1
25	2,2	2,2	2,2	2,1	1,9	1,7	1,6	1,4	1,3	1,1
30		2,2	2,2	2,1	2,0	1,8	1,6	1,5	1,3	1,2
35		2,1	2,1	2,1	2,1	1,9	1,7	1,5	1,4	1,2
40		2,1	2,1	2,1	2,0	1,9	1,7	1,6	1,4	1,2
50		2,0	2,0	2,0	2,0	1,9	1,7	1,6	1,5	1,2

Fattore di Amplificazione **SAI** ($0,1s \leq T \leq 0,5s$)



V _{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
10	1,5	1,3	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
15	2,2	1,8	1,4	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
20	2,8	2,5	1,9	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0
25	2,9	2,8	2,4	1,7	1,4	1,2	1,1	1,1	1,0	1,0
30		3,0	2,7	2,0	1,7	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0
35		3,1	2,9	2,4	1,9	1,6	1,4	1,3	1,2	1,1
40		3,1	3,0	2,6	2,2	1,9	1,6	1,4	1,2	1,1
50		2,9	2,9	2,7	2,5	2,2	1,9	1,6	1,4	1,2

Fattore di Amplificazione SA2 (0,4s ≤ T ≤ 0,8s)

V _{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
10	1,2	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
15	1,4	1,3	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
20	2,0	1,5	1,3	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
25	2,7	1,9	1,5	1,2	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0
30		2,5	1,8	1,4	1,2	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0
35		3,1	2,3	1,5	1,3	1,2	1,2	1,1	1,1	1,0
40		3,4	2,9	1,9	1,5	1,3	1,2	1,2	1,1	1,0
50		3,5	3,3	2,8	1,8	1,6	1,4	1,3	1,2	1,1

Fattore di Amplificazione SA3 (0,7s ≤ T ≤ 1,1s)

V _{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
5	1,5	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
10	2,1	2,0	1,6	1,3	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
15	2,4	2,3	2,1	1,7	1,4	1,3	1,1	1,0	1,0	1,0
20	2,4	2,4	2,3	2,0	1,7	1,5	1,3	1,2	1,1	1,0
25	2,4	2,4	2,4	2,2	1,9	1,7	1,5	1,3	1,2	1,0
30		2,4	2,4	2,3	2,1	1,8	1,6	1,5	1,3	1,1
35		2,3	2,3	2,3	2,2	1,9	1,7	1,5	1,4	1,2
40		2,2	2,2	2,2	2,2	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2
50		2,1	2,1	2,1	2,1	2,0	1,8	1,6	1,5	1,3

Fattore di Amplificazione SI1 (0,1s ≤ T ≤ 0,5s)

V _{SH} (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
10	1,3	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
15	1,6	1,4	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
20	2,6	1,9	1,5	1,2	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
25	2,9	2,5	1,9	1,4	1,2	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0
30		2,9	2,3	1,6	1,4	1,2	1,1	1,1	1,0	1,0
35		3,2	2,8	1,9	1,5	1,4	1,2	1,1	1,1	1,0
40		3,4	3,1	2,4	1,8	1,5	1,4	1,2	1,1	1,0
50		3,2	3,2	2,9	2,2	1,9	1,6	1,4	1,3	1,1

Fattore di Amplificazione SI2 (0,5s ≤ T ≤ 1,0s)

Tabella 7-4 - Tabelle da utilizzare per la stima di F.A. per APPENNINO in caso di coperture poggianti su substrato rigido

	1.1 - 1.2
	1.3 - 1.4
	1.5 - 1.6
	1.7 - 1.8
	1.9 - 2.0
	2.1 - 2.2
	2.3 - 2.4
	2.5 - 3.0
	3.1 - 3.5
	>3.5

Figura 7-6 - Legenda adottata per l'accorpamento dei fattori di amplificazione nelle zone stabili suscettibili di amplificazioni locali



7.7 Carte dello scuotimento atteso

Quali ultimi elaborati grafici, come prescritto dall'Allegato A2 della delibera regionale, sono state redatte le 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:

- $0,1s \leq T \leq 0,5s$ (cfr. Elaborato 6.d.1 - Carta di microzonazione sismica - H_{SM}),
- $0,4s \leq T \leq 0,8s$ (cfr. Elaborato 6.d.2 - Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,4-0,8\ s}$),
- $0,7s \leq T \leq 1,1s$ (cfr. Elaborato 6.d.3 - Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,7-1,1\ s}$),
- $0,5s \leq T \leq 1,5s$ (cfr. Elaborato 6.d.4 - Carta di microzonazione sismica - $H_{SM\ 0,5-1,5\ s}$),

I valori di $ASI_{UHS}/\Delta T$, per $0,1s \leq T \leq 0,5s$, per i punti della griglia INGV, per un tempo di ritorno T_R 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 $T_R=475$ anni, dallo spettro su suolo A utilizzando i dati di accelerazione spettrale ($Se(T)$) forniti da INGV¹⁶ 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 definite dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna.

¹⁶ 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>

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	100 di 104



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
- Amorosi A., Colalongo M.L. & Vaiani S.C. (1996): Revisione litostratigrafica dell'Unità Bismantova (Miocene epiligure, Appennino settentrionale). Boll. Sc. Geol. It., 115, 355-367.
- Bortolotti V. (1966): La tettonica trasversale dell'Appennino. 1. La linea Livorno-Sillaro. Boll. Soc. Geol. It., 85, 529-540
- Camassi R., Martelli L, Mucciarelli M. (2015): I terremoti dell'Appennino Bolognese. La storia. Neuter, XLI, n. 82, 379-386.
- 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.
- Città Metropolitana di Bologna (2021): Piano Territoriale Metropolitan (P.T.M.) – Rischio sismico: relazione illustrativa
- Comune di Sasso Marconi (2008): Piano Strutturale Comunale (P.S.C.) – Quadro conoscitivo – Relazione geologica QCGI.
- Comune di Sasso Marconi (2015): Piano Operativo Comunale (P.O.C.) – Variante N. 3
- 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 Research Institute (EPRI), 1993, Guidelines for determining design basic ground motions, v. 1: Method and guidelines for estimating earthquakes 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, dicembre 2004

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	101 di 104



- 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., Martelli L, Tendo 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., L. Calabrese, G. Ercolessi, P. Severi, G. Tarabusi, D. Pileggi, S. Rosselli, L. Minarelli, F. Pergalani, M. Compagnoni, G. Vannucchi, C. Madiari, 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
- Martelli L., P. Severi, G. Biavati, S. Rosselli, R. Camassi, E. Ercolani, A. Marcellini, A. Tendo, 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
- Martelli L. e Romani M. (2013): Microzonazione Sismica e Analisi della Condizione Limite per l'Emergenza delle aree epicentrali dei terremoti della pianura emiliana di maggio-giugno 2012 (Ordinanza del Commissario Delegato - Presidente della Regione Emilia-Romagna n.70/2012)
- Mascandola C., Massa M., Barani S., Albarello D., Lovati S., Martelli L., Poggi V. (2019): Mapping the Seismic Bedrock in the Po-Plain (Italy) through ambient vibration monitoring. Bull. Seism. Soc. Am., 109(1), 164-177. doi: 10.1785/0120180193
- Meletti C. e Valensise G., (2004): ZONAZIONE SIMOGENETICA 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.

 EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	102 di 104



- NOTE ILLUSTRATIVE DELLA CARTA GEOLOGICA D'ITALIA alla scala 1:50.000 – FOGLIO 237, Sasso Marconi – REGIONE EMILIA-ROMAGNA, S.EL.CA. s.r.l., Firenze 2002
- NOTE ILLUSTRATIVE DELLA CARTA GEOLOGICA D'ITALIA alla scala 1:50.000 – FOGLIO 220, Casalecchio di Reno – REGIONE EMILIA-ROMAGNA, SystemCart s.r.l., Roma, 2009
- 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
- Pieri M. & Groppi G. (1981): Subsurface geological structure of the Po Plain, Italy. Pubbl. 414, P.F. Geodinamica, C.N.R., pp. 23
- Rollins K.M., Evans M.D., Diehl N.B., Daily W.D. (1998) – Shear modulus and damping relationships for gravels. JGGE, 124, 396-405
- Seed H. B., Idriss I. M. – 1970 – Soil moduli 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 Interpretation – European research project.p
- Vucetic M., Dobry R. – 1991 – Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response - Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 117, Issue 1

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	103 di 104



9. ALLEGATI

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

Elaborato		scala
1	Carta delle indagini	1:10.000
2	Carta geologico-tecnica	1:10.000
3	Carta delle frequenze naturali dei terreni	1:5.000
4	Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica	1:10.000
5	Carta della velocità delle onde di taglio S (Vs)	1:5.000
6.a	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - FA_{PGA}	1:5.000
6.b.1	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FA_{SA} 0.1s < T_0 < 0.5s$	1:5.000
6.b.2	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FA_{SA} 0.4s < T_0 < 0.8s$	1:5.000
6.b.3	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FA_{SA} 0.7s < T_0 < 1.1s$	1:5.000
6.b.4	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FA_{SA} 0.5s < T_0 < 1.5s$	1:5.000
6.c.1	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FH_{IS} 0.1s < T_0 < 0.5s$	1:5.000
6.c.2	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FH_{IS} 0.5s < T_0 < 1.0s$	1:5.000
6.c.3	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $FH_{IS} 0.5s < T_0 < 1.5s$	1:5.000
6.d.1	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - H_{SM}	1:5.000
6.d.2	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $H_{SM} 0.4s-0.8s$	1:5.000
6.d.3	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $H_{SM} 0.7s-1.1s$	1:5.000
6.d.4	Carta di microzonazione sismica Livello 3 - $H_{SM} 0.5s-1.5s$	1:5.000

Inoltre, alla presente relazione, è allegato l'Elaborato 7 – Nuove indagini, contenente le indagini di nuova esecuzione.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	MS 3 - Relazione illustrativa	Settembre 2022	0	104 di 104