



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

Livello 3

Regione Emilia-Romagna

Comune di Monchio delle Corti



Regione

Emilia-Romagna

Soggetto realizzatore



Dott. Geol. Stefano Castagnetti

Data

Gennaio 2020

INDICE

1.	INTRODUZIONE	1
2.	DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO	3
2.1	INQUADRAMENTO	3
2.2	STORIA SISMICA.....	8
2.3	CLASSIFICAZIONE SISMICA	10
3.	DATI GEOTECNICI E GEOFISICI	11
3.1	ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DEI DATI	11
4.	MODELLO DEL SOTTOSUOLO	12
5.	METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI	13
6.	ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE.....	15
6.1	Pericolosità sismica di base	15
6.2	Segnali in input	16
6.3	Modello geofisico del sottosuolo	17
6.4	Procedura di analisi RSL.....	20
6.5	Analisi dei risultati	25
7.	STABILITÀ DI VERSANTE	40
7.1	Metodo di verifica.....	40
7.2	Le ipotesi verificate	43
8.	ELABORATI CARTOGRAFICI	52
8.1	Carta delle indagini	52
8.2	Carta geologico-tecnica per microzonazione sismica.....	53
8.3	Carta delle frequenze naturali dei terreni.....	55
8.4	Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica.....	56
8.5	Carta delle velocità delle onde di taglio S.....	61
8.6	Carte di microzonazione sismica	63
9.	ELENCO ELABORATI	68

1. INTRODUZIONE

Nella presente Relazione illustrativa vengono descritte le attività svolte e i risultati ottenuti nel corso dello Studio di microzonazione sismica di Livello 3 del Comune di Monchio delle Corti (Provincia di Parma), effettuato su incarico dell'Unione Montana Appenino Parma Est (Determinazione Dirigenziale n° 282 del 18/07/2019 – CUP: E12G18000090006 – CIG: ZA02915CB3) e finanziato con contributi derivanti dall'OCDPC n° 532/2018 “Attuazione dell'articolo 11 del decreto-legge 28 aprile 2009 n. 39, convertito, con modificazioni, dalla legge 24 giugno 2009, n. 77, in materia di contributi per gli interventi di prevenzione del rischio sismico - annualità 2016” e dalla DGR n° 2047/2018 e assegnati con Determinazione Dirigenziale n° 106 del 08.01.2019.

Il Comune di Monchio delle Corti è dotato di uno studio di Microzonazione Sismica di secondo livello realizzato nel gennaio 2015 da un'ATI con mandataria EN GEO srl e mandanti dott. geol. Marco Baldi, dott. geol. Domenico Bianco, dott. geol. Stefano Castagnetti, dott. geol. Federico Madini e dott. geol. Massimiliano Trauzzi.

Tale studio venne finanziato con i contributi di cui alla OPCM 4007/2012 e alle D.G.R. 1302/2012 e 1514/2012. Lo studio è stato validato dalla riunione della Commissione Tecnica per il monitoraggio degli studi di microzonazione sismica del 20/07/2015 e 23/11/2015 e certificato dalla Regione Emilia-Romagna con protocollo PG.2015.00872504 del 15.12.2015.

Le attività di ricerca, acquisizione ed implementazione dati oltre che la predisposizione degli elaborati prodotti nell'ambito del presente studio, sono stati condotti in ottemperanza delle direttive e agli atti tecnici sotto elencati:

- Allegato A della D.G.R. 29 aprile 2019, n. 630. Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017).
- “Indicazioni per l'archiviazione informatica, rappresentazione e fornitura dei dati degli studi di microzonazione sismica e dell'analisi della condizione limite per l'emergenza, di cui all'Ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile n. 52/2013 e decreto del 15 aprile 2013 del Capo del Dipartimento della Protezione Civile” della deliberazione di Giunta Regionale n. 1919 del 16.12.2013 “Approvazione dei criteri per gli studi di microzonazione sismica ed assegnazione

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	1 di 68

dei contributi di cui all'Ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile n. 52/2013 a favore degli Enti Locali" (Allegato D della delibera regionale).

- “Microzonazione sismica - Standard di rappresentazione e archiviazione informatica” - Versione 4.1, Roma, novembre 2018 - Elaborato e approvato nell’ambito dei lavori della Commissione tecnica per la microzonazione sismica, nominata con DPCM 21 aprile 2011 (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 (ICMS).

Il presente studio di Livello 3 è stato condotto a partire dal citato studio di Livello 2, provvedendo ad aggiornare ed integrare gli elaborati precedentemente realizzati, in modo da renderli conformi alle nuove specifiche tecniche.

Gli elaborati redatti sono stati predisposti in versione cartacea e in versione digitale (PDF con risoluzione di 300 dpi). I dati cartografici sono stati allestiti anche in formato vettoriale (*shapefile*).

Per l’archiviazione dei dati e l’editing dei documenti sono stati seguiti gli standard di riferimento forniti dall’Allegato D della DGR 1919/2013 e dagli SRAI (Standard di rappresentazione e archiviazione informatica) versione 4.1.

Per l’inserimento dei dati alfanumerici dei siti, delle indagini e dei parametri è stato utilizzato l’apposito software: “MS - SoftMS”, versione 4.1.1.

Lo studio di MS è stata corredato dall’analisi della Condizione Limite per l’Emergenza le cui risultanze sono riportate in specifica relazione.

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	2 di 68

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

2.1 INQUADRAMENTO

Il Comune di Monchio delle Corti appartiene alla Regione Emilia-Romagna e ricade nella fascia di alta montagna della Provincia di Parma (Fig. 1).



Fig. 1 - Ubicazione del Comune di Monchio delle Corti

Per quanto riguarda l'assetto geologico e tettonica dell'areale si rimanda a quanto esposto nel citato studio di secondo livello.

In questa sede ci si limita a riproporre lo schema di inquadramento geologico del territorio comunale di Monchio delle Corti (Fig. 2), in cui si possono osservare le unità liguri alloctone sovrascorse (Flysch terziario di M. Caio e Complessi di base pre-flyscoidi) e le sottostanti unità intermedie Sub-liguri (Argille e Calcari di Canetolo, Arenarie di P. Bratica e Petrignacola, ecc.), che nella fascia di crinale lasciano spazio a depositi di avanfossa sottostanti di affinità toscano - umbra qui costituiti dal Macigno.

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	3 di 68

STUDIO DI MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO

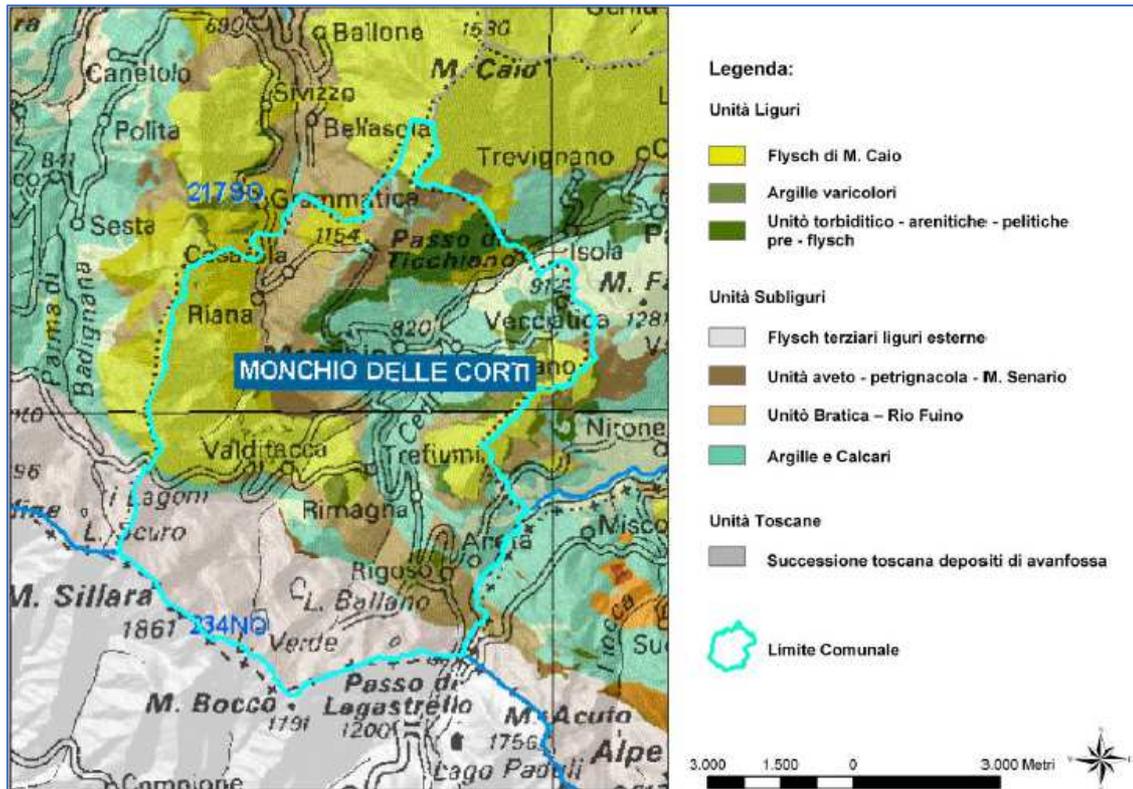


Fig. 2 - Inquadramento geologico schematico del Comune di Monchio delle Corti (Progetto CARG della Regione Emilia – Romagna, Servizio Geologico e Sismico dei Suoli)

Per quanto concerne le caratteristiche sismotettoniche, l'inquadramento generale delle principali strutture attive sismogenetiche dell'Emilia-Romagna, è rappresentato nella Mappa di sintesi realizzata dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli dell'Emilia-Romagna (Fig. 3).

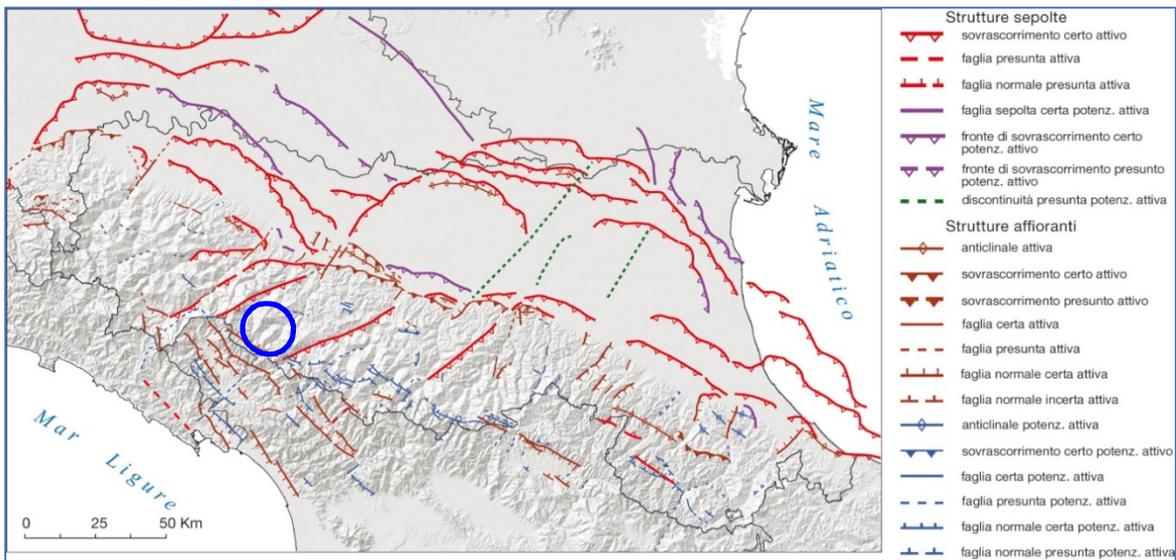


Fig. 3 - Mappa di sintesi delle strutture tettoniche attive e potenzialmente attive riconosciute in Emilia-Romagna (da: "Note illustrative della Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna ed aree limitrofe" - Servizio Geologico Sismico e dei Suoli - Regione Emilia-Romagna, 2017)

 <p>Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti</p>	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	4 di 68

Le sorgenti sismogenetiche e le faglie potenzialmente attive e capaci, interessanti il territorio comunale di Monchio delle Corti, sono state ricavate dal *Database of Individual Seismogenic Sources* (DISS) dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), Version 3.2.1, che costituisce il database delle sorgenti sismogenetiche italiane, potenzialmente in grado di generare sismi con magnitudo superiore a M 5,5 nell'area Italiana¹.

Con riferimento all'immagine di **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**⁴, le sorgenti sismogenetiche più significative al contorno dell'area in studio sono:

- **ITCS026 – Lunigiana**, con una magnitudo massima attesa Mw = 6,0
- **ITCS027 – Bore-Montefeltro-Fabriano-Laga**, con magn. max attesa Mw = 6,2

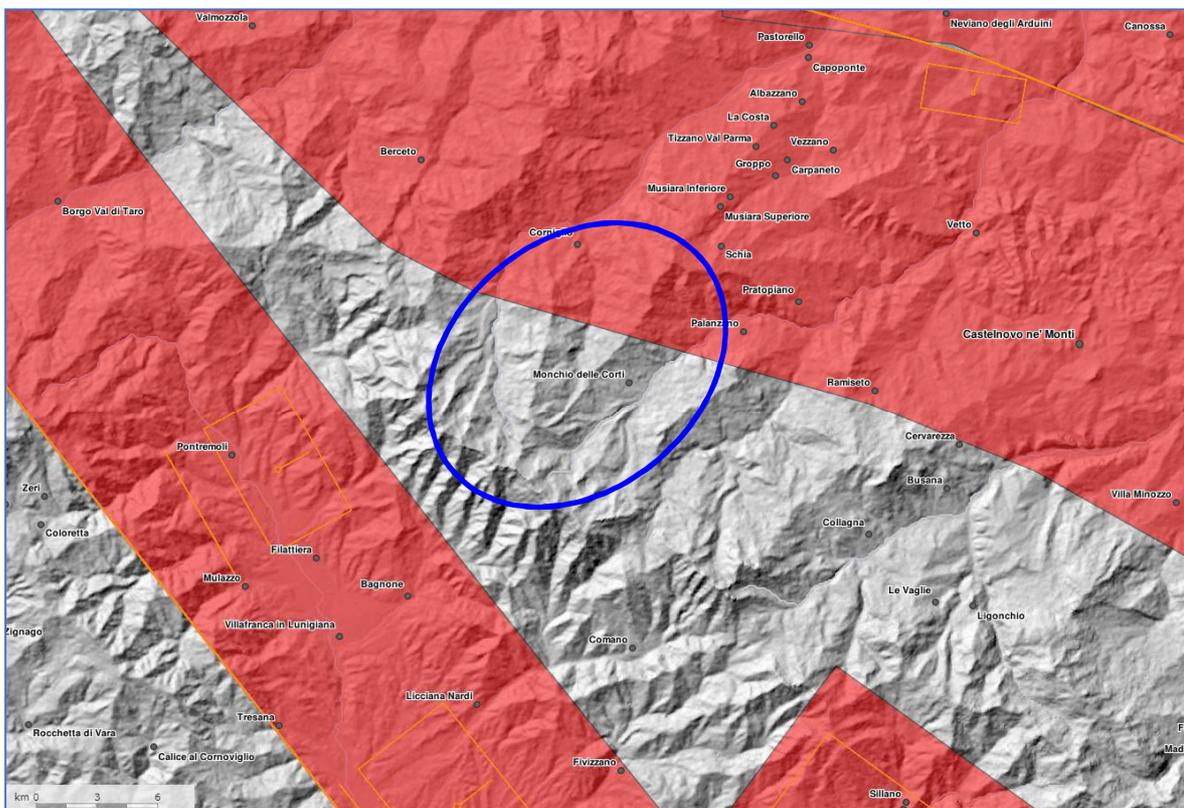


Fig. 4 - Ubicazione delle sorgenti sismogenetiche da DISS 3.2.1 <http://diss.rm.ingv.it/dissmap/dissmap.phtml> Il cerchio blu individua approssimativamente il territorio del Comune di Monchio delle Corti

Con riferimento alla Zonazione sismogenetica ZS9 dell'INGV, il territorio comunale di Monchio delle Corti ricade nella zona all'interno della zona sismogenetica "915 -

¹ 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*.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	5 di 68

Garfagnana – Mugello” (Fig. 5), che è caratterizzata da movimenti prevalentemente distensivi. Il maggior numero di terremoti che si verificano in questa zona, presenta il proprio ipocentro a profondità comprese tra 8 e 12 km e i valori di magnitudo massima previsti sono pari a $M_{wmax} = 6,60$.

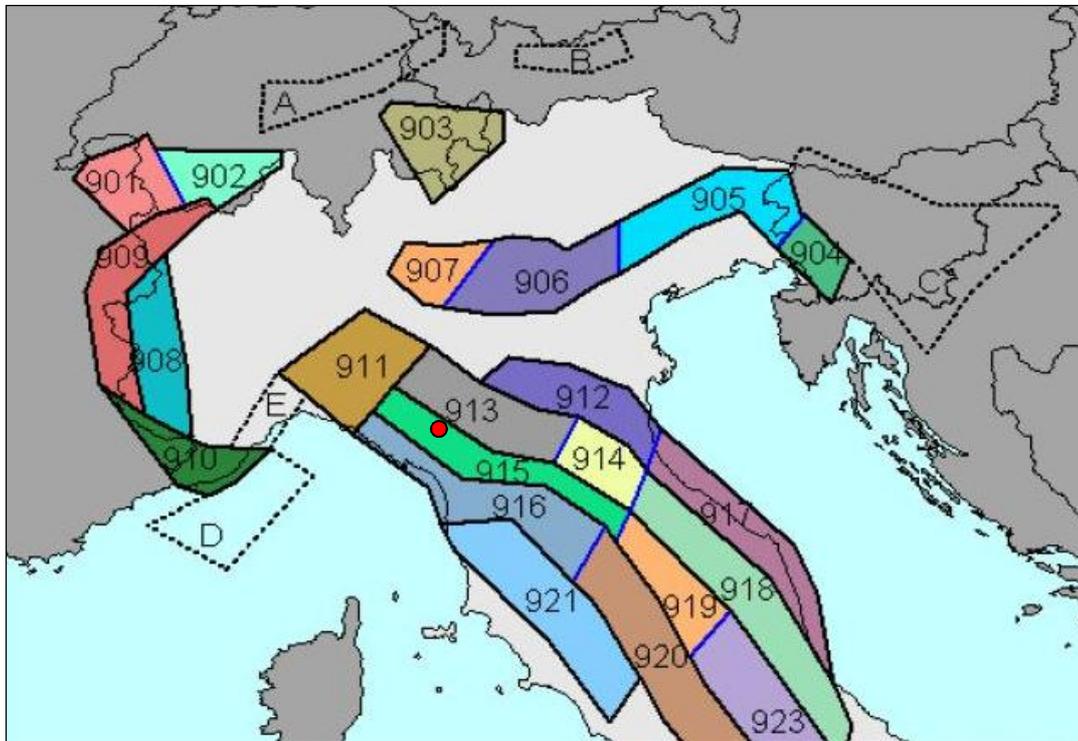


Fig. 5 – Zonazione sismogenetica ZS9 (Tratta da: “Redazione della Mappa di Pericolosità Sismica – Rapporto conclusivo – bozza aprile 2004” - INGV). Il punto rosso segna approssimativamente il Comune di Monchio delle Corti.

Nella mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale, redatta a cura dell’INGV la pericolosità di ciascuna zona è espressa in termini di accelerazione massima al suolo con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni riferita a suoli rigidi contraddistinti da $V_s > 800$ m/s.

Il territorio in esame ricade in un’area caratterizzata da un’accelerazione sismica orizzontale massima a_g pari a 0,175-0,225 g (Fig. 6).

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	6 di 68

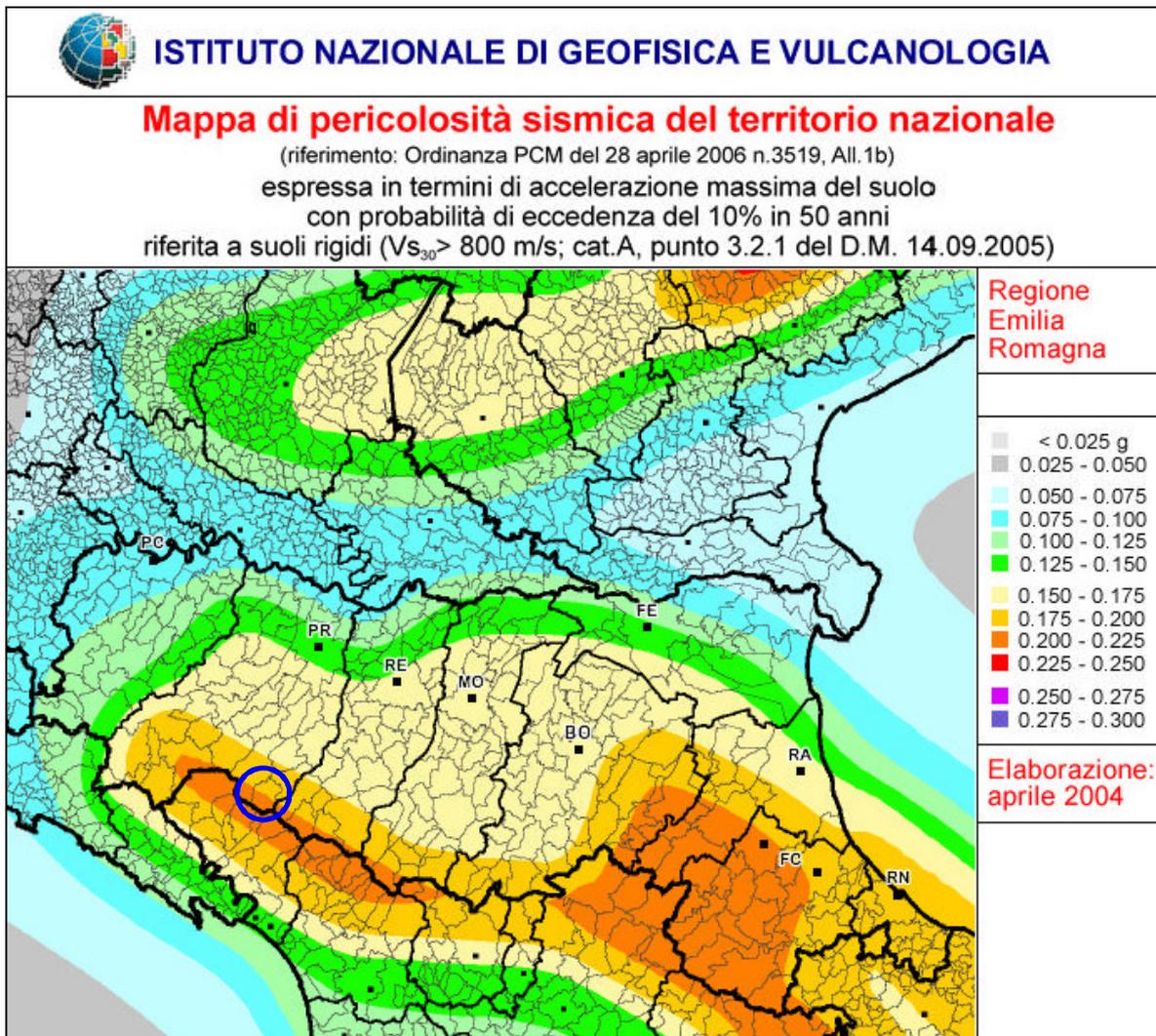


Fig. 6 - Estratto della Mapa di pericolosità sismica del territorio nazionale. Il cerchio di colore blu individua il Comune di Monchio delle Corti

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	7 di 68

2.2 STORIA SISMICA

La storia sismica del Comune di Monchio delle Corti è stata desunta dal Database Macrosismico Italiano, versione DBMI15², che contiene informazioni relative a 122.701 osservazioni macrosismiche dall'anno 1000 al 2014 riferite a circa 20.000 località, di cui 15.213 italiane.

Secondo quanto riportato in DBMI15, la storia sismica di Monchio delle Corti è riassunta graficamente nel diagramma riportato in Fig. 7, mentre in Tab. sono elencati gli eventi di maggiore intensità, indicando per ciascuno di essi, oltre agli effetti provocati al sito, espressi come I(MCS), la data e l'ora in cui si è verificato, il numero di località in cui è stato registrato l'evento (Np), l'intensità massima epicentrale in scala MCS (Io) e la magnitudo momento (Mw).

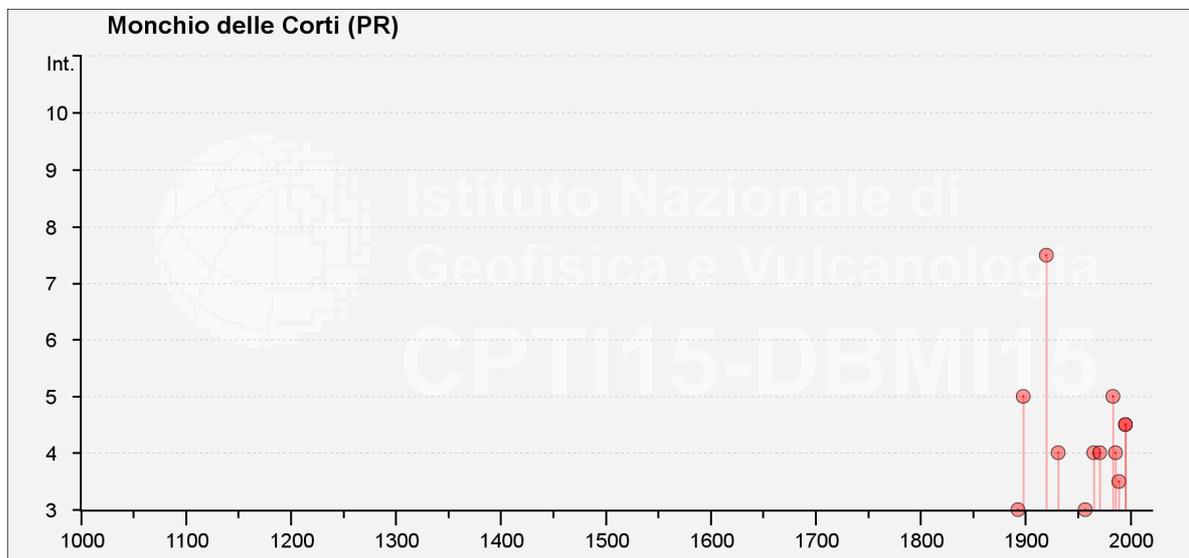


Fig. 7 – Eventi sismici di maggiore intensità registrati nel Comune di Monchio delle Corti

² 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>

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	8 di 68

STUDIO DI MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO

Effetti	In occasione del terremoto del									
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
7-8	1920	09	07	05	55	4	Garfagnana	750	10	6.53
5	1898	03	04	21	05		Parmense	313	7-8	5.37
5	1983	11	09	16	29	5	Parmense	850	6-7	5.04
4-5	1995	03	03	16	16	4	Lunigiana	43	5	4.20
4-5	1995	10	10	06	54	2	Lunigiana	341	7	4.82
4	1931	01	25	10	48	2	Lunigiana	12	5-6	4.29
4	1965	05	10	05	01	5	Appennino reggiano	11	4-5	4.29
4	1971	07	15	01	33	2	Parmense	228	8	5.51
4	1986	10	01	19	53	3	Lunigiana	68	5	4.46
3-4	1989	10	03	09	41	3	Appennino parmense	91	4	4.04
3	1893	10	20	20	15		Appennino parmense	25	4-5	4.04
3	1957	10	25	23	02	0	Appennino reggiano	79	5-6	4.27
NF	1986	12	06	17	07	1	Ferrarese	604	6	4.43
NF	1987	05	02	20	43	5	Reggiano	802	6	4.71
NF	1995	12	31	21	29	4	Appennino reggiano	96	4-5	4.51
NF	1996	07	11	19	09	2	Lunigiana	80	5	4.06

I [MCS]	Intensità macrosismica espressa in scala MCS. Alcuni effetti non sono esprimibili con la scala MCS per cui vengono utilizzati dei codici alternativi (si veda la relativa tabella)
Data	Data del terremoto
Ax	Area epicentrale, area geografica in cui sono stati riscontrati gli effetti maggiori del terremoto
NMDP	Numero di punti, numero di osservazioni macrosismiche disponibili per il terremoto
Io	Intensità macrosismica epicentrale, da CPTI15, espressa in scala MCS, Mercalli-Cancani-Sieberg [dettagli]
Mw	Magnitudo momento, da CPTI15

Tab. 1 - Elenco dei terremoti più forti risentiti nell'area di Monchio delle Corti il 1000 e il 2014 (A. Rovida, M. Locati, R. Camassi, B. Loli e P. Gasperini (a cura di), 2015. DBMI15, la versione 2015 del Database Macrosismico Italiano. Milano, Bologna, <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/> - parz. modificato)

Dall'analisi di Fig. 7 e **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** si evidenzia che il massimo evento sismico censito e osservato a Monchio delle Corti si è verificato il 07 Settembre 1920 con un'intensità al sito del VII-VIII grado della scala MCS. Le cronache dell'epoca raccontano che l'evento sismico causò spaccature nel terreno, frane con cadute di massi a Castiglione di Garfagnana e nelle frazioni di Rigoso e Trefiumi poste nel comune di Monchio delle Corti nei pressi del confine con il Comune di Palanzano. Il sisma provocò effetti e modificazioni sul regime delle acque della zona (intorbidimento, e variazione dei regimi sorgentizi).

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	9 di 68

2.3 CLASSIFICAZIONE SISMICA

A seguito dell'emanazione dell'OPCM n° 3274/2003 "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica" e s.m.i., il Comune di Monchio delle Corti è stato classificato sismico in ZONA 2. In precedenza, sotto il profilo della normativa sismica, il Comune di Monchio delle Corti risultava classificato in 2^a categoria sismica.

Con la DGR n° 1164/2018 "Aggiornamento della classificazione sismica di prima applicazione dei comuni dell'Emilia-Romagna", il Comune di Monchio delle Corti è stato confermato sismico in ZONA 2 (Fig. 8).

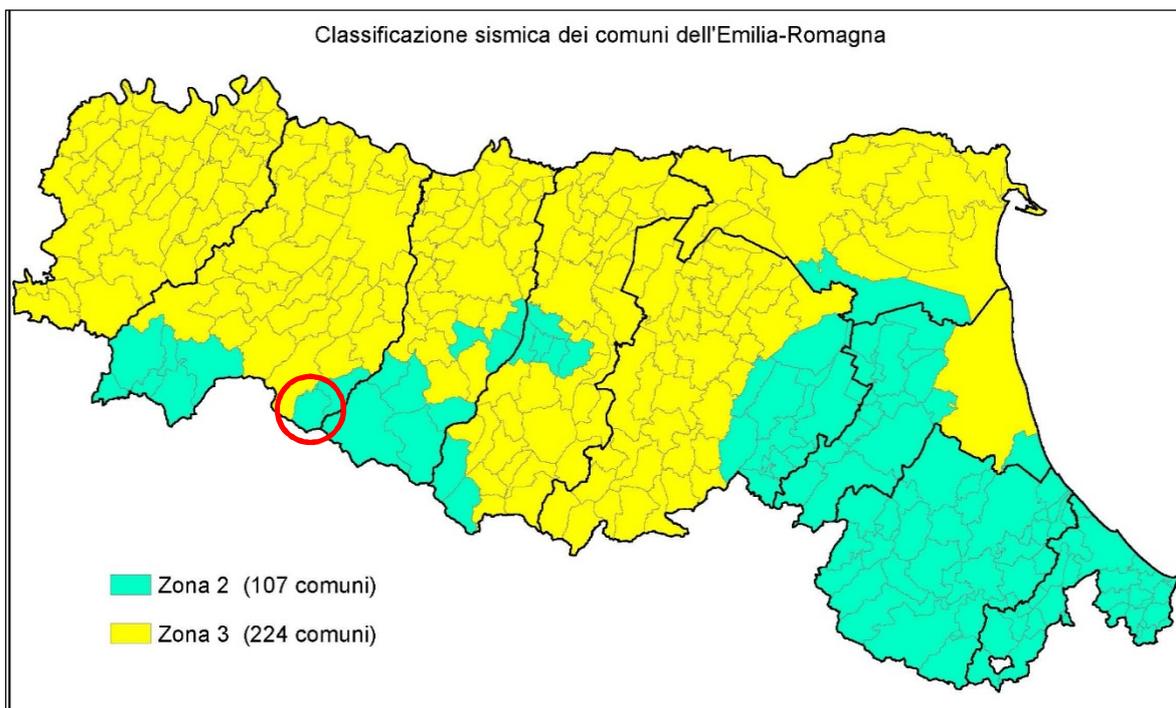


Fig. 8 - Classificazione sismica dell'Emilia-Romagna di cui alla DGR 1164 del 23.07.2018. Regione Emilia-Romagna. Il cerchio rosso individua il Comune di Monchio delle Corti

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	10 di 68

3. DATI GEOTECNICI E GEOFISICI

3.1 ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DEI DATI

La ricerca effettuata presso gli archivi dell'Ufficio Tecnico Comunale, dell'Unione Montana Appennino Parma Est e dell'Agenzia Regionale Sicurezza Territoriale e Protezione Civile ha consentito di esaminare ulteriori relazioni geologiche, prodotte a corredo di varianti agli strumenti urbanistici, di progetti edilizi, di PUA e di opere pubbliche nel lasso di tempo intercorso tra lo studio di MS2 e quello attuale e di acquisire copia delle indagini geognostiche eseguite.

I dati acquisiti sono andati ad integrare il database geognostico a suo tempo fornito dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna.

Una volta completato il quadro dei dati disponibili, è stata pianificata e condotta una specifica campagna di indagini integrative consistita nell'esecuzione di n° 3 MASW.

Tutte le indagini sono state trasformate in formato digitale con modalità georiferita, al fine di consentirne l'elaborazione in ambiente GIS. A tal proposito sia i dati di base, che i dati elaborati sono stati organizzati in formato vettoriale (*shapefile*).

In Tab. 3 è rappresentato il quadro d'insieme delle prove acquisite ricadenti nel territorio comunale o appositamente realizzate nelle aree interessate dal secondo e dal terzo livello d'approfondimento.

Prove in sito	RER	archivi locali	Prove MS2	Prove MS3	Totale
Sondaggi a carotaggio continuo		21			21
Saggi esplorativi con escavatore		8	4		12
Prove penetrometriche dinamiche super-pesanti (DS)		9			9
Prove penetrometriche dinamiche pesanti (DP)		4			4
Prove penetrometriche dinamiche medie (DN)		4			4
Prove penetrometriche dinamiche leggere (DL)		3			3
Prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT)		2			2
MASW		7		3	10
Microtremori (HVSr)		14	35		49
Profilo sismico a rifrazione		14			14
Totali	0	86	39	3	128

Tab. 2 – Prove in sito disponibili per il Comune di Monchio delle Corti

L'ubicazione degli elementi stratigrafici e geofisici acquisiti è riportata nella Carta delle indagini in scala 1:5.000.

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	11 di 68

4. MODELLO DEL SOTTOSUOLO

La base per uno studio di microzonazione sismica è la definizione, quanto più accurata possibile, del modello geologico del sottosuolo, cercando di individuare come varia la successione stratigrafica all'interno delle aree in esame, con particolare riferimento all'individuazione della profondità del substrato geologico.

Per quanto concerne il modello generale del sottosuolo del Comune di Monchio delle Corti, in questa sede viene fatto riferimento a quanto già definito e descritto nello studio di Microzonazione sismica di secondo livello, al quale si rimanda per particolari ed approfondimenti.

 Studio di geologia <i>dott. Stefano Castagnetti</i>	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	12 di 68

5. METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI

Nella prima fase di lavoro, come descritto in precedenza, sono stati acquisiti tutti i dati bibliografici e di archivio disponibili, sono stati condotti puntuali rilievi sul territorio ed è stata analizzata la cartografia geologica e geomorfologica fruibile. In seguito, tenendo conto dell'insieme degli elementi acquisiti, è stata predisposta ed eseguita una campagna di rilievi integrativi e di controllo. A conclusione di questa fase sono stati predisposti i seguenti elaborati:

- **Carta delle indagini (scala 1:5.000)** - In questa carta è riportata l'ubicazione, di tutte le indagini in sito acquisite o realizzate in questa sede, distinte in base alla specifica tipologia (sondaggi, penetrometrie, prove geofisiche, ecc.);
- **Carta geologico-tecnica (scala 1:10.000)** - Questa carta, estesa all'intero territorio comunale, prende in esame i terreni di copertura, il substrato geologico, le instabilità dei versanti, gli elementi geologici, morfologici e idrogeologici e gli ambienti genetico-deposizionali dei terreni di copertura. Per motivi di praticità la carta è stata suddivisa in due tavole, relative rispettivamente al Settore Nord ed al Settore Sud del territorio comunale;
- **Carta delle frequenze naturali dei terreni (scala 1:5.000)** - In questa carta sono riportate le ubicazioni dei punti ove sono state eseguite le indagini sismiche HVSR, con simbolicamente rappresentato il valore F_0 del picco significativo, corrispondente alla frequenza di risonanza fondamentale (*frequenza principale*). A fianco di ciascun simbolo è riportata la frequenza relativa al primo picco significativo e, qualora presente, è indicata anche la frequenza di un secondo picco (*frequenza secondaria*). Le misure inoltre sono state suddivise in classi sulla base delle frequenze e dell'ampiezza del picco;
- **Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (scala 1:10.000)** - In questa carta, estesa all'intero territorio comunale, sono state individuate le zone stabili suscettibili di amplificazioni locali, distinte in sette zone, le zone di attenzione per instabilità di versante e i punti di misura di rumore ambientale. Anche questa carta è stata suddivisa in due tavole relative rispettivamente al Settore Nord ed al Settore Sud del territorio comunale.

Successivamente è stato predisposto il seguente elaborato:

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	13 di 68

- **Carta delle velocità delle onde di taglio S (scala 1:10.000)** - In questa carta è stata riportata l'ubicazione delle prove MASW e HVSR a stazione singola. A fianco di ciascuna prova è rappresentato il rispettivo valore di V_{s30} e/o V_{sH} in m/s.

Infine si è proceduto con la terza ed ultima fase di lavoro, in cui è stata sviluppata l'analisi approfondita che ha portato alla determinazione dello spettro di risposta in superficie e dei fattori di amplificazione, che hanno permesso di realizzare le verifiche di stabilità di alcune aree potenzialmente soggette ad instabilità di versante e sono stati prodotti i seguenti elaborati:

- **Carte di microzonazione sismica (scala 1: 5.000)** - In queste carte, basate su quanto predisposto nell'indagine di secondo livello, sono stati riportati gli approfondimenti realizzati nell'ambito del presente studio. Più in particolare sono stati predisposti i seguenti elaborati cartografici:
 - Carta di microzonazione sismica - FA PGA
 - Carta di microzonazione sismica - FA SA 0,1 - 0,5 s
 - Carta di microzonazione sismica - FA SA 0,4 - 0,8 s
 - Carta di microzonazione sismica - FA SA 0,7 - 1,1 s
 - Carta di microzonazione sismica - FA SA 0,5 - 1,5 s
 - Carta di microzonazione sismica - FA SI 0,1 - 0,5 s
 - Carta di microzonazione sismica - FA SI 0,5 - 1,0 s
 - Carta di microzonazione sismica - FA SI 0,5 - 1,5 s
 - Carta di microzonazione sismica - HSM
 - Carta di microzonazione sismica - H 0,4 - 0,8 s
 - Carta di microzonazione sismica - H 0,7 - 1,1 s
 - Carta di microzonazione sismica - H 0,5 - 1,5 s

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	14 di 68

6. ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE

L'analisi di terzo livello, per il Comune di Monchio, è stata realizzata su tre siti in cui si disponevano informazioni sufficientemente affidabili almeno in termini di stratigrafia e Vs. Di seguito vengono fornite alcune informazioni di carattere generale sulle procedure di valutazione di risposta sismica locale, valide per i tre siti indagati nel Comune di Monchio delle Corti (Fig.) ed in seguito si analizzano i risultati della RSL.

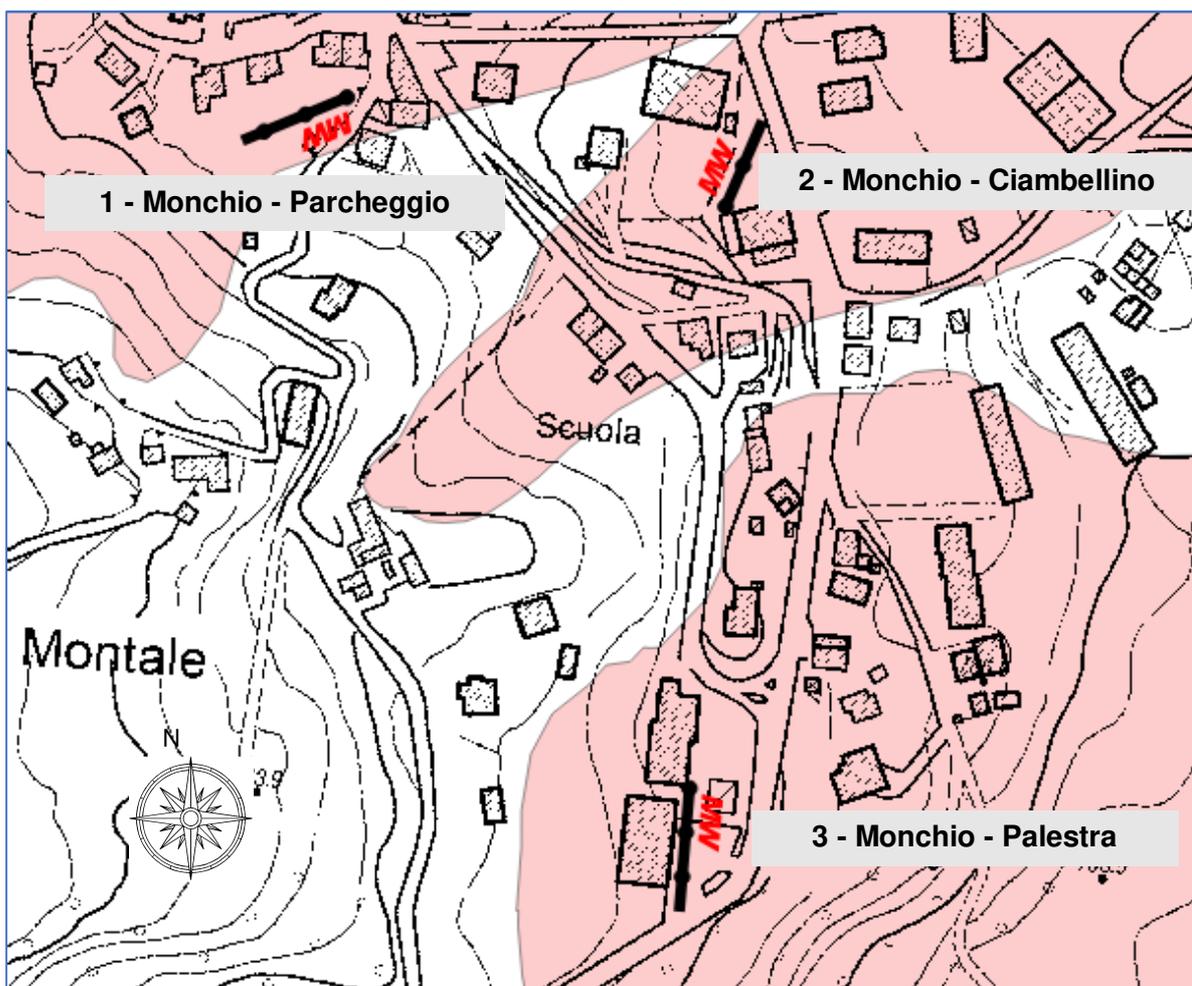


Fig. 9 – Ubicazione siti oggetto di analisi di risposta sismica locale

6.1 Pericolosità sismica di base

Nel caso della valutazione della risposta sismica locale di 3° livello 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 e confermati nella nuova DGR 630/2019. In particolare l'Allegato A4 contiene:

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	15 di 68

- 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_{refg} (10% di probabilità di superamento in 50 anni) di ogni sito indagato.

Per i punti di indagine il parametro a_{refg} risulta il medesimo (Tab. 3)

<i>Sito</i>	<i>a_{refg} (a_g/g)</i>
Monchio delle Corti	0,199

Tab. 3 – Valori di a_{refg} (10% di probabilità di superamento in 50 anni)

6.2 Segnali in input

Quali dati di input sismico sono stati utilizzati, quelli forniti dal software SEISM-HOME³ di Eucentre.

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, sempre con il 10% di probabilità di eccedenza in 50 anni.

Il software SEISM-HOME fornisce 7 accelerogrammi per ciascun nodo del reticolo di riferimento della pericolosità sismica locale dell'Allegato A delle NTC 2008.

Per i tre siti indagati in Comune di Monchio sono stati utilizzati i sismi riferiti al nodo più vicino ossia il 17157.

Nel complesso, quindi, per ciascun sito, sono stati utilizzati 7 diversi accelerogrammi per le verifiche di risposta sismica locale (Tab. 4 e Fig. 10). Ovviamente, tutti i sismi sono stati scalati in accelerazione per ottenere un valore massimo di input compatibile con quello previsto dalla RER. In **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** è riportato l'elenco dei diversi accelerogrammi utilizzati.

³ Rota M., Zuccolo E., Taverna L., Corigliano M., Lai C.G., Penna A. [2012] "Mesozonation of the Italian territory for the definition of real spectrum-compatible accelerograms", Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 10, No. 5, pp. 1357-1375.

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	16 di 68

Segnali Seism-Home
SLV1_TR475_ID17157_ESD_001249xa.cor
SLV2_TR475_ID17157_ESD_000182xa.cor
SLV3_TR475_ID17157_ESD_000234ya.cor
SLV4_TR475_ID17157_NGA_0455X.txt
SLV5_TR475_ID17157_NGA_0765y.txt
SLV6_TR475_ID17157_NGA_1091y.txt
SLV7_TR475_ID17157_KNET1_SAG0010503201053.NS

Tab. 4 – Segnali in input utilizzati nelle analisi di RSL

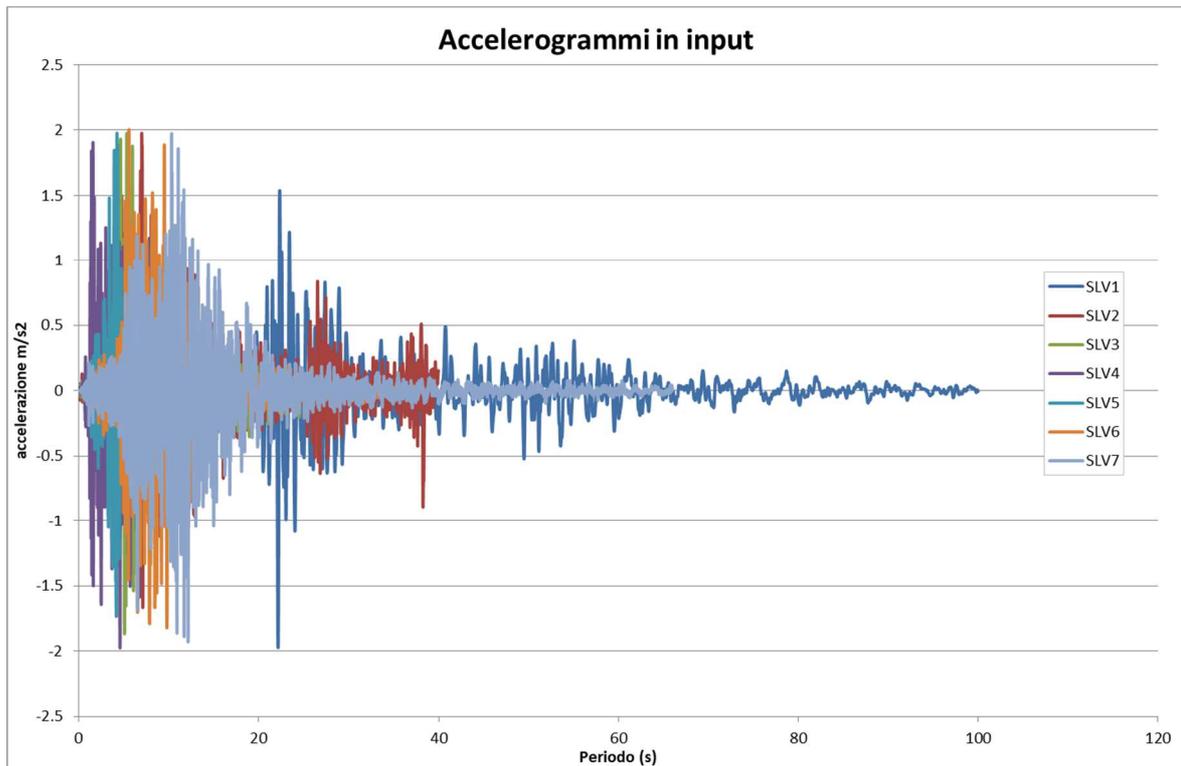


Fig. 10 – Segnali di input nell’analisi di RSL

6.3 Modello geofisico del sottosuolo

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

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

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	17 di 68

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

6.3.1 Litologia

Per la determinazione delle caratteristiche litologiche sono stati utilizzati i dati delle stratigrafie delle prove sismiche MASW (codici prove: 034022L22MASW22 - 034022L23MASW23 - 034022L24MASW24) appositamente realizzate durante lo studio di microzonazione sismica, integrate con informazioni al contorno laddove disponibili. Nel solo caso del sito "Monchio – Palestra" l'identificazione della profondità del bedrock sismico deriva da un inclinometro posto nelle immediate vicinanze (034022P93SI108), che poco si discosta da quanto rilevato con prova sismica.

6.3.2 Determinazione della V_s e del bedrock sismico

Per quanto riguarda la velocità delle onde S in funzione della profondità per i diversi siti si è fatto riferimento alle misure delle prove MASW appositamente realizzate, fino alla massima profondità indagata.

Le V_s registrate nel corso delle prove MASW sono state discretizzate nel numero di orizzonti presenti in sito, attribuendo ad ogni strato una corrispondente velocità media come si riporta a titolo esemplificativo di seguito.

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	18 di 68

STUDIO DI MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO

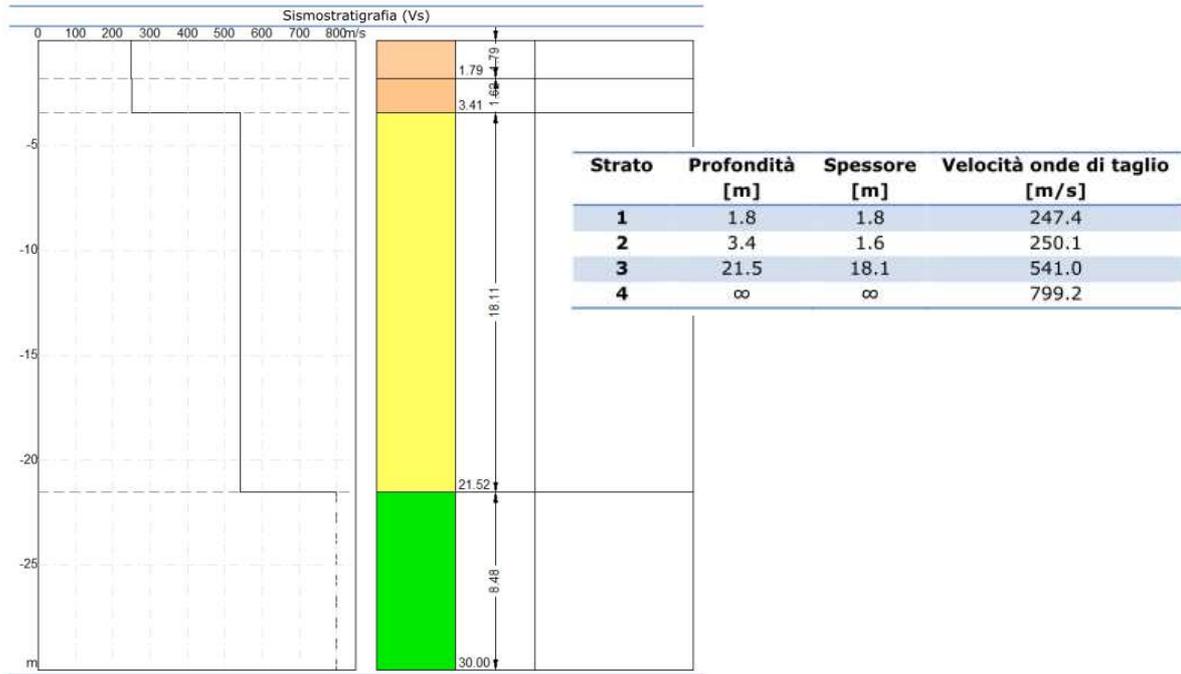


Fig. 11 – Esempio discretizzazione velocità da prova sismica MASW

6.3.3 Curve di variazione dello smorzamento (D) e della rigidezza (G/G0) 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/G0) in funzione della deformazione di taglio, è stata utilizzata una curva da letteratura per terreni franosi consimili a quelli in sito, i cui parametri sono riportati in Tab. 5.

Litologia	Parametri curve G/G0 e D			
	α	β	η	λ
Frana	24,48	1,36	25,03	1,86

Tab. 5 – Riepilogo dei parametri

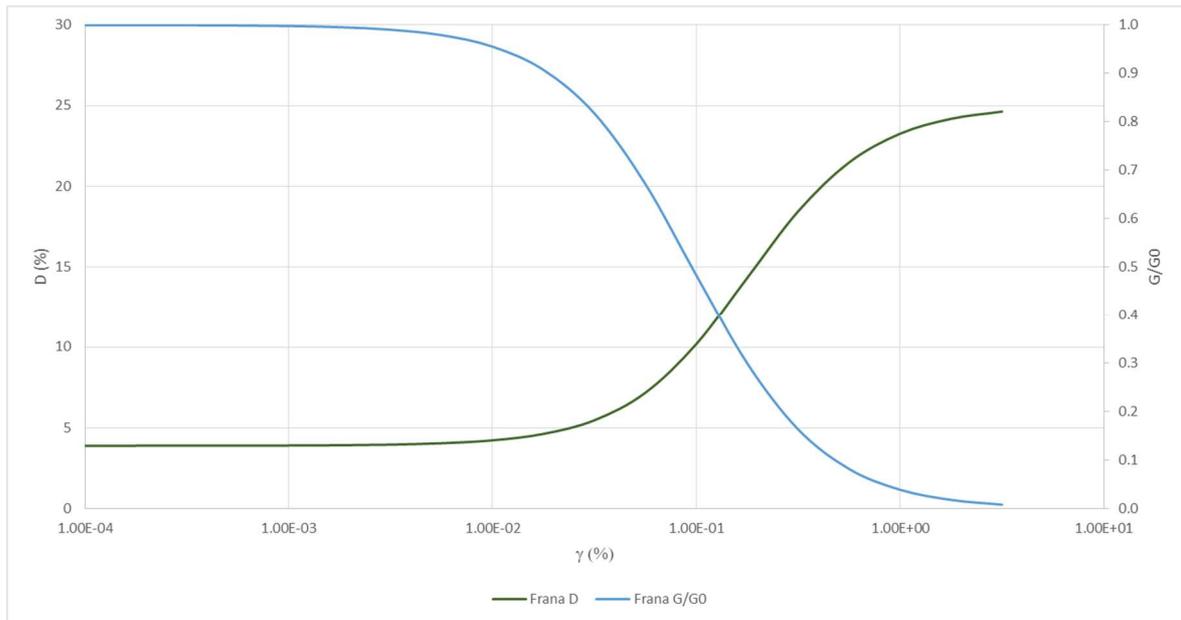


Fig. 12 – Grafico delle curve G/G₀ e di D

6.4 Procedura di analisi RSL

Per la valutazione della risposta sismica locale è stato utilizzato il codice di calcolo LSR 2D (Local Sismic Response 2D) Ver. 4.5 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.

6.4.1 Metodo lineare equivalente

Il comportamento meccanico dei terreni sotto l'effetto di carichi ciclici ad elevata frequenza è alquanto complesso e caratterizzato da marcata non linearità, accumulo di deformazioni permanenti, dissipazione di energia e degradazione progressiva delle caratteristiche meccaniche per effetto del numero di cicli di carico applicati. In presenza di

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	20 di 68

fluido interstiziale, alle suddette problematiche si aggiunge l'accumulo di sovrappressioni interstiziali in condizioni di drenaggio impedito o parziale, che sono comunque le più frequenti, in considerazione della velocità di applicazione del carico.

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

In particolare, per quanto riguarda la risposta sismica dei depositi, l'approccio visco-elastico lineare equivalente rappresenta un valido compromesso tra semplificazione delle analisi ed accuratezza dei risultati. La strategia consiste sostanzialmente nel fare riferimento alle soluzioni visco-elastiche lineari per la propagazione delle onde sismiche adeguando in modo iterativo i parametri costitutivi in funzione del livello deformativo indotto dal moto sismico nel terreno.

Tale modello lineare equivalente, studia il comportamento tra tensione e deformazione del terreno basandosi sul modello di Kelvin-Voigt, illustrato in Fig. 13. 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

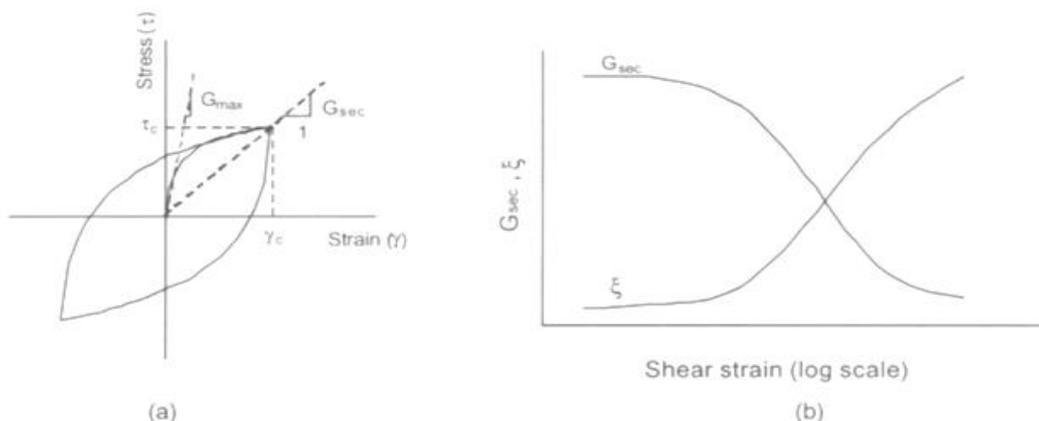


Fig. 13 – Modello lineare equivalente: (a) curve tensioni - deformazioni; (b) variazione del modulo

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	21 di 68

Il comportamento non lineare del terreno, durante un ciclo di carico, viene approssimato per come mostrato in Fig. 13. 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:

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

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

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

dove:

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

In definitiva la risposta non lineare del terreno tramite il modello viscoelastico lineare equivalente viene riassunta mediante delle curve di riduzione del modulo di taglio e di incremento del rapporto di smorzamento (Fig. 13b).

6.4.2 Soluzione alla singola iterazione mediante FEM

L'approccio utilizzato per la soluzione visco-elastica lineare all'interno dell' i -esimo ciclo iterativo utilizza il metodo degli elementi finiti. In particolare, il deposito di terreno viene discretizzato mediante una "mesh" di elementi finiti piani che possono avere forma quadrangolare o rettangolare a seconda dei casi (Fig. 14) 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.

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	22 di 68

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

dove:

M = matrice di massa del sistema;

C = matrice di smorzamento del sistema;

K = matrice di rigidità 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

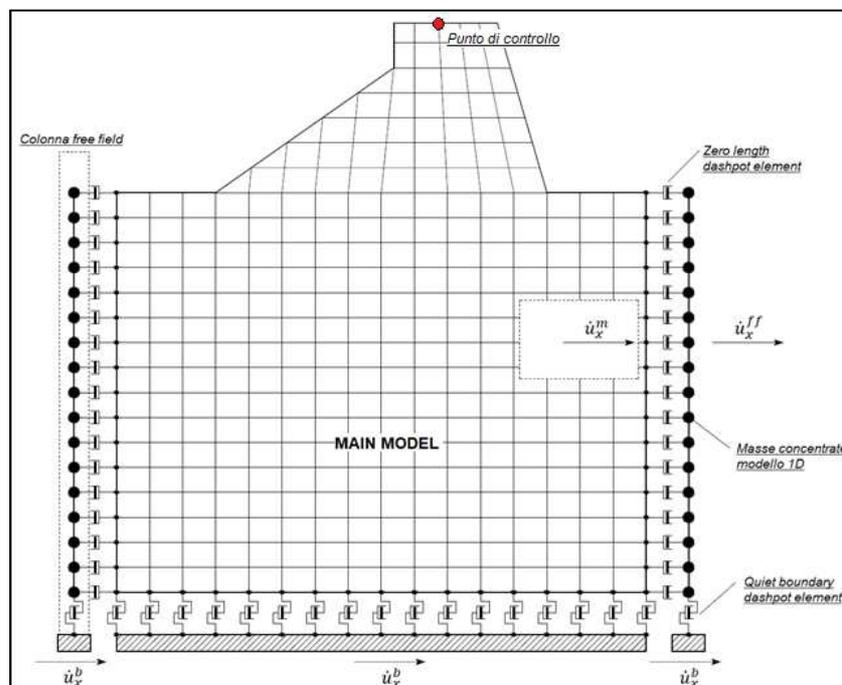


Fig. 14 – Discretizzazione FEM del terreno

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	23 di 68

6.4.2.1 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:

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

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;

6.4.3 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)

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	24 di 68

4. aggiornamento dei valori $G1 = G(\gamma1)$ e $D1 = D(\gamma1)$
5. iterazione dei passi 3 e 4 fino a convergenza ($\gamma_i - 1 \sim \gamma_i$)

6.4.4 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.

6.5 Analisi dei risultati

I risultati della analisi condotte con il codice di calcolo LSR 2D (Local Sismic Response 2D) Ver. 4.5 di STACEC, elaborati nel dominio del tempo e delle frequenze, hanno consentito di definire per il sito in esame:

- La funzione di trasferimento del segnale sismico dal bedrock alla superficie;
- Lo spettro di risposta elastico in pseudoaccelerazione (PSA); 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;
- Il fattore di amplificazione in termini di picco di accelerazione (FaPGA), definito come il rapporto tra l'accelerazione massima in superficie ed il valore di riferimento per il sito su suolo rigido;
- I fattori di amplificazione di sito in termini di rapporto tra intensità dello spettro di risposta in accelerazione (FaSA) calcolato in superficie e quello calcolato su suolo rigido negli intervalli 0.1-0.5 s, 0.4-0.8 s, 0.5-1.5 e 0.7-1.1 s.
- I fattori di amplificazione di sito in termini di rapporto tra intensità dello spettro di risposta in velocità (FaS) calcolato in superficie e quello calcolato su suolo rigido negli intervalli 0.1-0.5 s, 0.5-1.0 s e 0.5-1.5 s.

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	25 di 68

Tali 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 (Fig. 15 e Fig. 16).

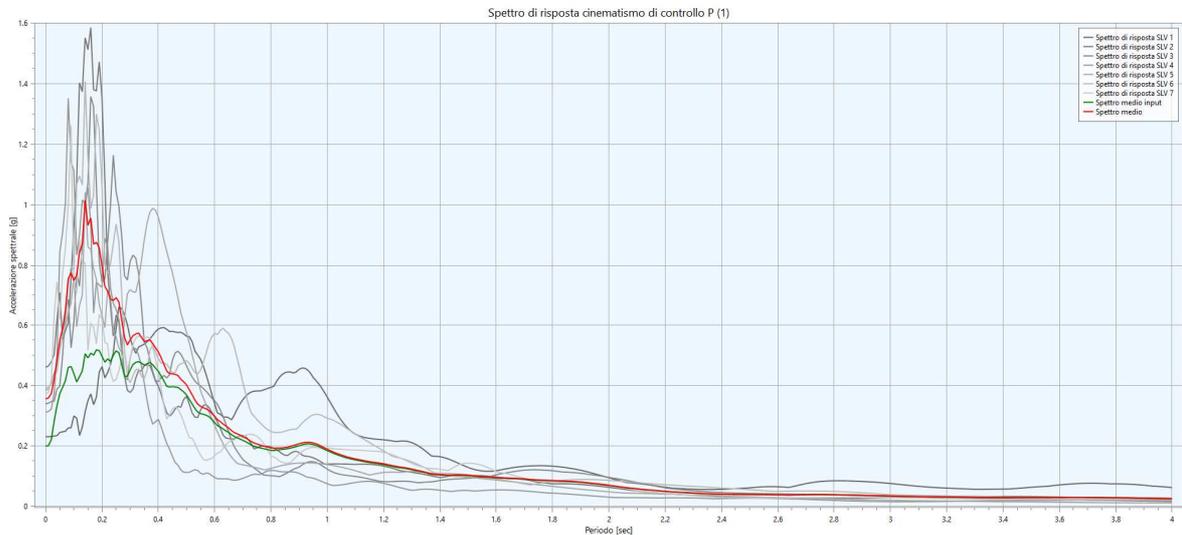


Fig. 15 – Esempio di confronto tra lo spettro medio in accelerazione in input (verde) e lo spettro medio in accelerazione in output (rosso)



Fig. 16 – Esempio fattori di amplificazione in termini di accelerazione e velocità ottenuti dal confronto di Fig. 15

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	26 di 68

Di seguito vengono sinteticamente riportati i risultati delle analisi di risposta sismica locale per tutti i siti indagati.

Dapprima si fornisce la rappresentazione sintetica del modello sismostratigrafico adottato e quindi vengono rappresentati:

- Il grafico dello spettro elastico in accelerazione da RSL confrontato con quello semplificato derivato dalle NTC per la categoria di sottosuolo corrispondente e con lo spettro su suolo rigido fornito dalla Regione Emilia Romagna;
- Il grafico della variazione dell'accelerazione con la profondità;
- La tabella con i vari fattori di amplificazione calcolati.

6.5.1 Risposta sismica locale Monchio - Parcheggio

I parametri del modello geofisico adottato sono i seguenti:

Litologia	Spessore	Curva	γ	Vs
	(m)		(kN/m ³)	(m/s)
Frana	5,50	Frana	18	230
Frana_2	2,80	Frana	18	470
Frana_3	5,20	Frana	19	590
Bedrock			22	780

Tab. 6 – Modello geofisico

Come si evince dalla Fig. 17, il modello utilizzato coincide con quello ricavato in sito da indagine sismica di tipo MASW (034022L23MASW23).

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	27 di 68

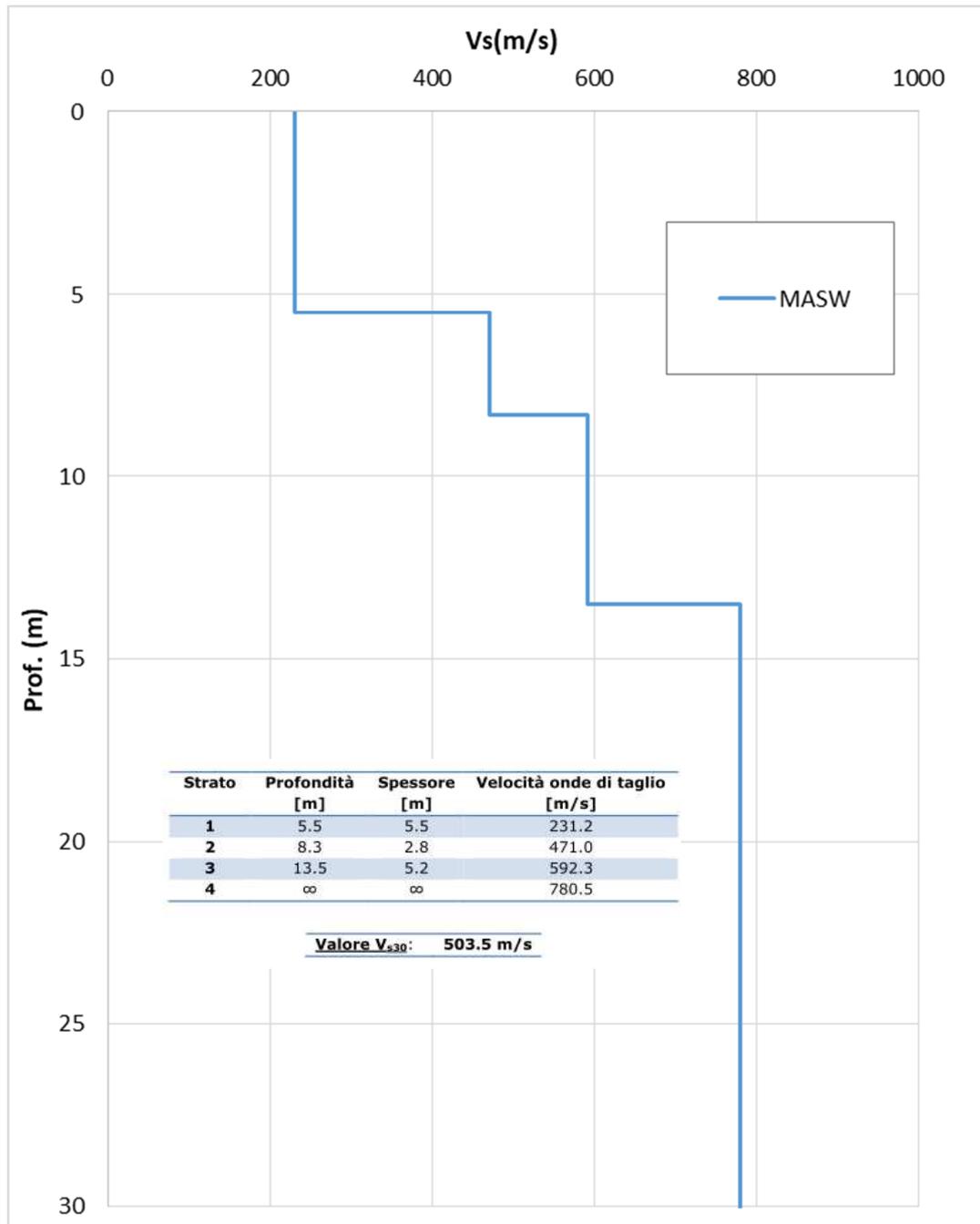


Fig. 17 – Discretizzazione della Vs basato sulla prova MASW 034022L23MASW23

Di seguito si riportano i grafici di output dell’analisi di risposta sismica locale (Fig. 18 e Fig. 19):

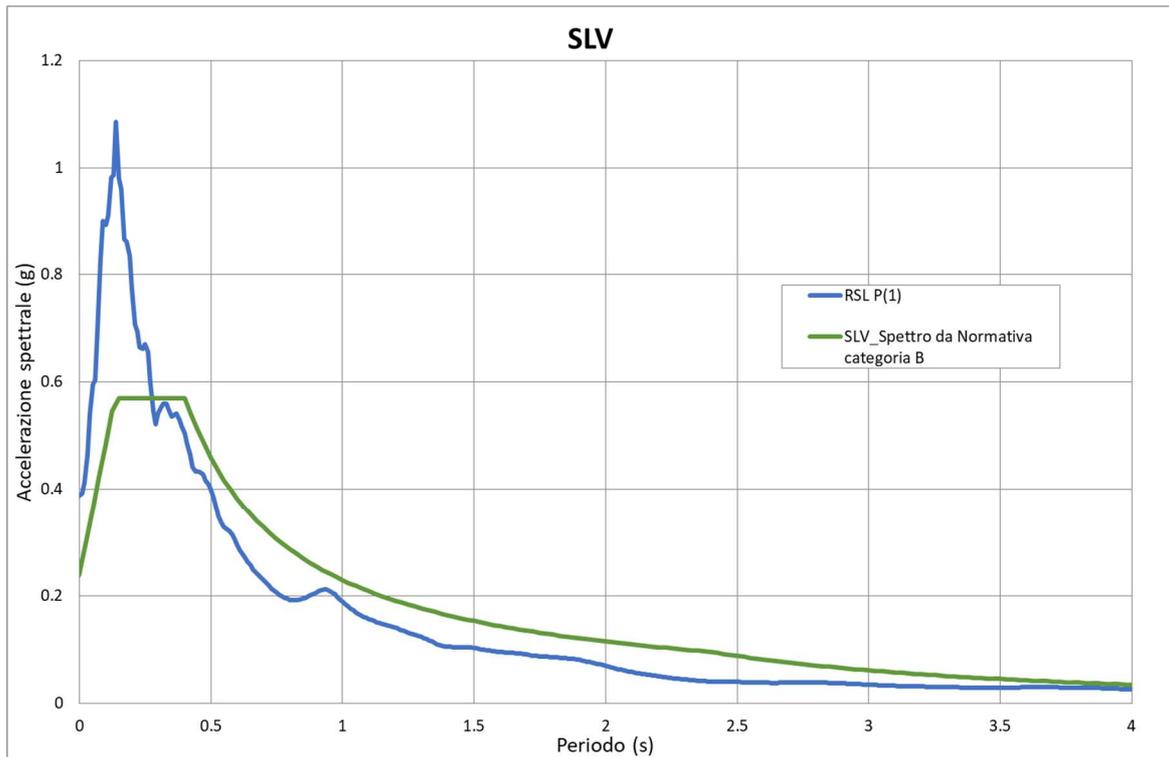


Fig. 18 – Confronto tra lo spettro medio in output in accelerazione per il sito e lo spettro di riferimento da normativa

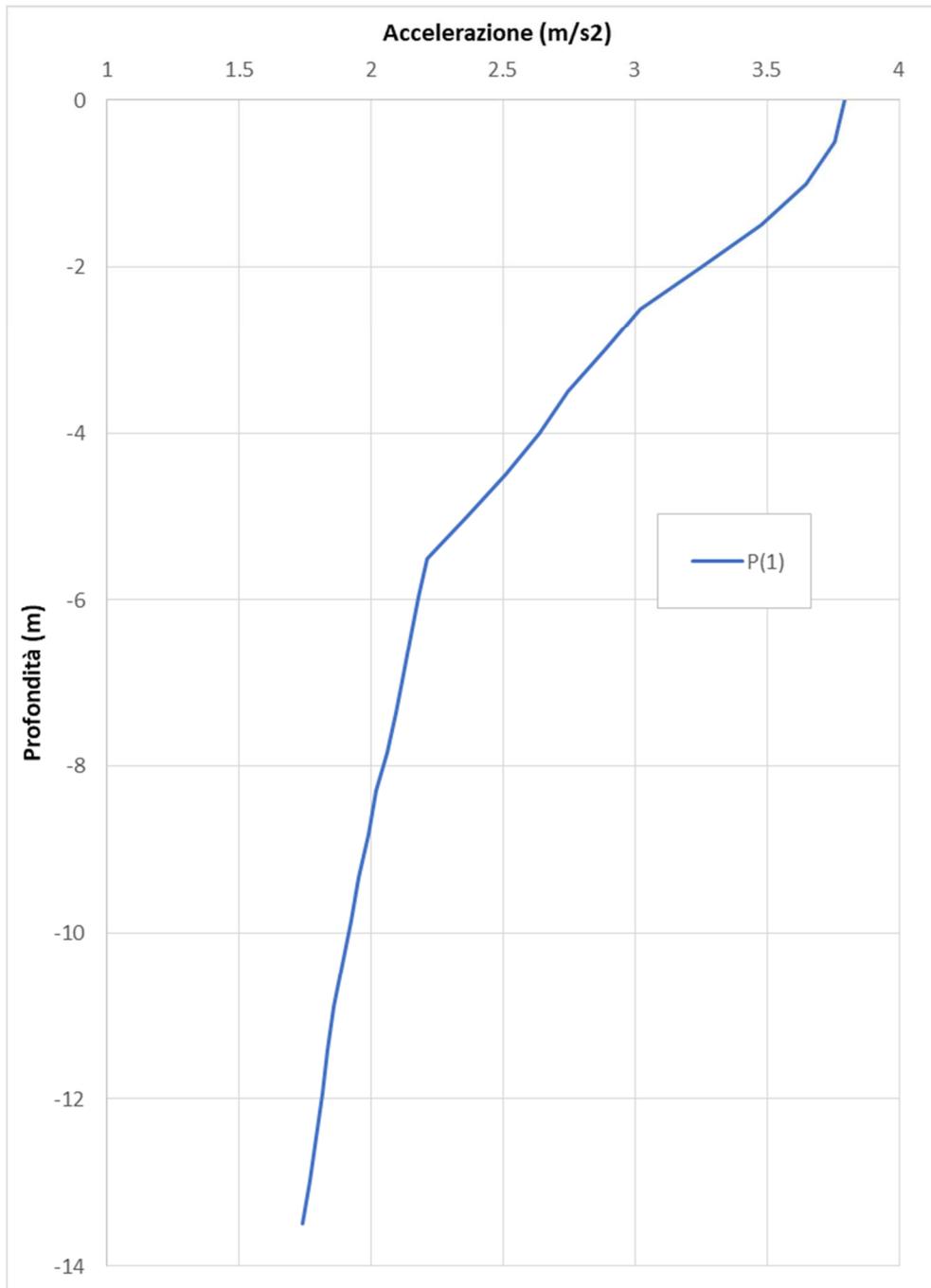


Fig. 19 – Variazione dell’accelerazione con la profondità

In Tab. 7 si riportano i fattori di amplificazione ottenuti per diversi intervalli di periodo:

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	30 di 68

STUDIO DI MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO

	RSL
FA_{PGA}	1,89
FH_{SA1 0.1-0.5}	1,40
FA_{SA2 0.4-0.8}	1,07
FA_{SA3 0.7-1.1}	1,03
FA_{SA4 0.5-1.5}	1,04
FA_{SI1 0.1-0.5}	1,35
FA_{SI 0.5-1.0}	1,09
FA_{SI 0.5-1.5}	1,08

Tab. 7 – Fattori di amplificazione Monchio - Parcheggio

6.5.2 Risposta sismica locale Monchio - Ciambellino

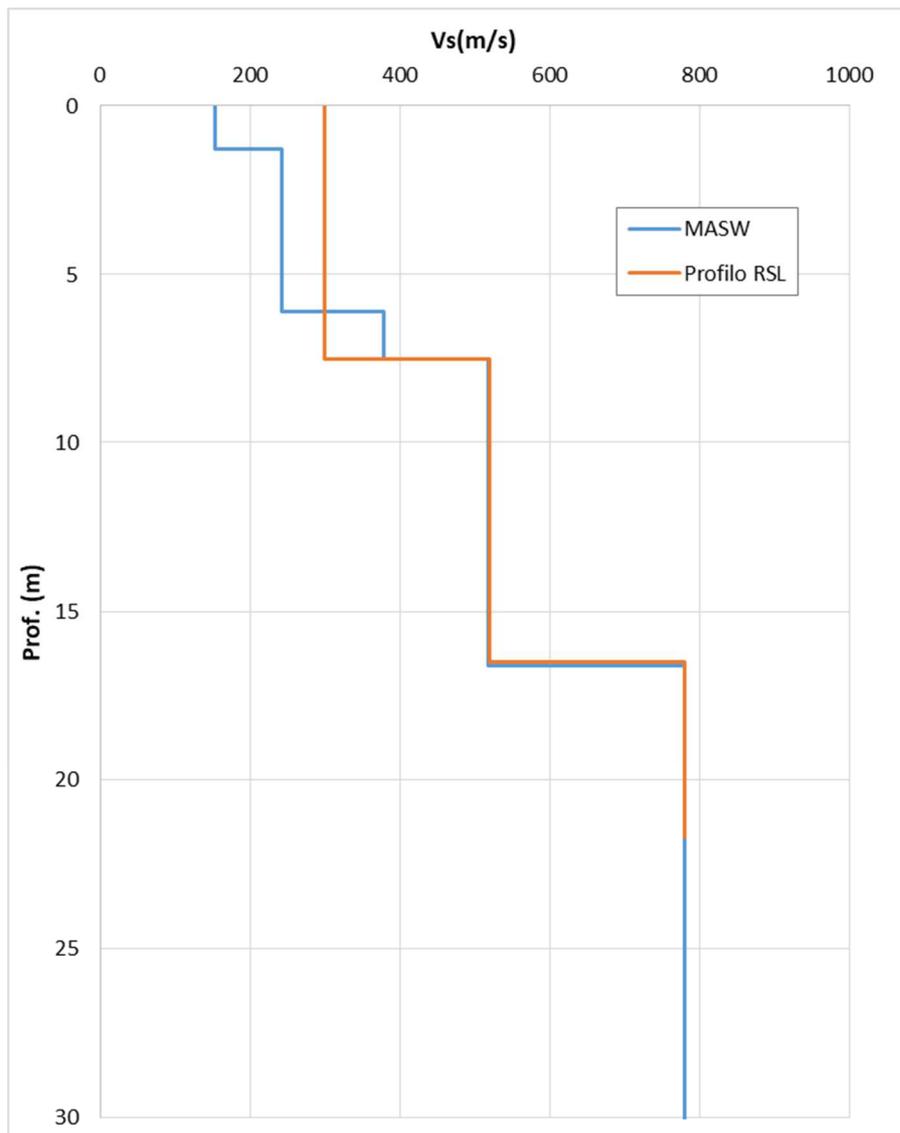
I parametri del modello geofisico adottato sono i seguenti:

Litologia	Spess.	Curva	γ	Vs
	(m)		(kN/m ³)	(m/s)
Frana	7,50	Frana	18	300
Frana_2	8,50	Frana	20	520
Bedrock			22	780

Tab. 8 – Modello geofisico

Anche in questo caso, l'analisi di risposta sismica locale è stata interamente basata sui risultati della prova MASW (034022L22MASW22), semplificando la stratigrafia superficiale.

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	31 di 68



Strato	Profondità [m]	Spessore [m]	Velocità onde di taglio [m/s]
1	1.3	1.3	153.7
2	6.1	4.8	243.1
3	7.5	1.4	378.1
4	16.6	9.1	518.9
5	∞	∞	718.2

Valore V_{s30} : 440.6 m/s

Fig. 20 – Discretizzazione della Vs e modello geofisico del codice di calcolo basato sulla prova MASW 034022L22MASW22

Di seguito si riportano i grafici di output dell’analisi di risposta sismica locale (Fig. 21 e Fig. 22):

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	32 di 68

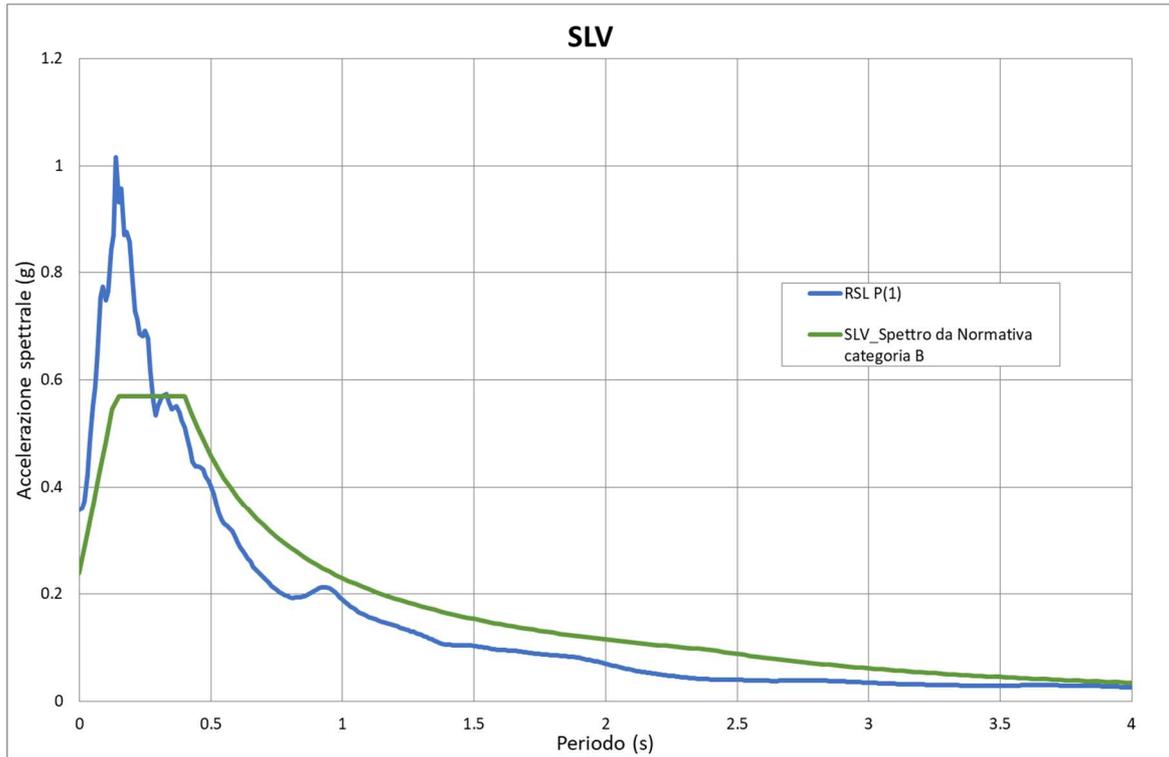


Fig. 21 – Confronto tra lo spettro medio in output in accelerazione per il sito e lo spettro di riferimento da normativa

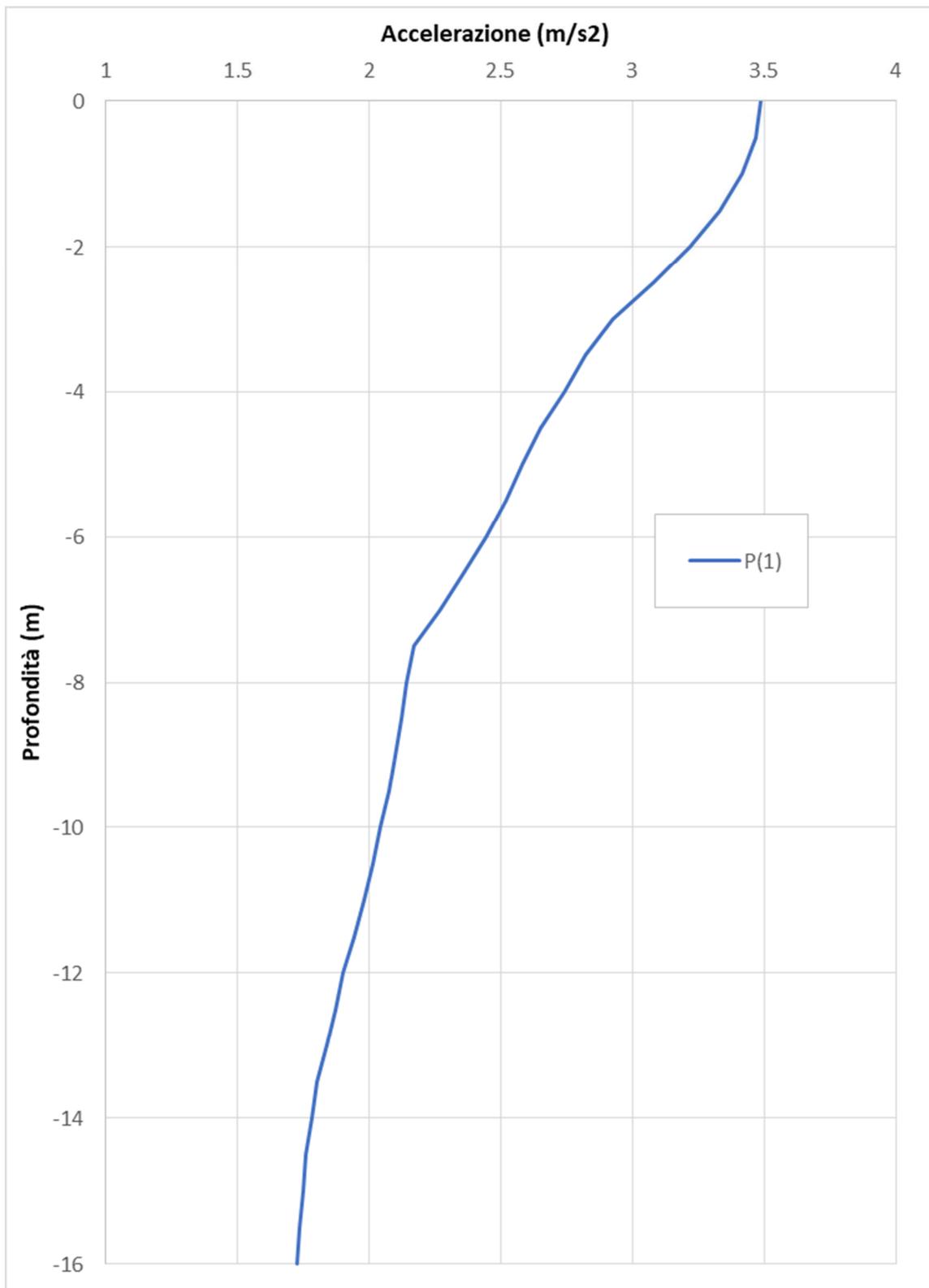


Fig. 22 – Variazione dell’accelerazione con la profondità

In Tab. 9 si riportano i fattori di amplificazione ottenuti per diversi intervalli di periodo:

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	34 di 68

	RSL
FA_{PGA}	1,75
FH_{SA1 0.1-0.5}	1,39
FA_{SA2 0.4-0.8}	1,08
FA_{SA3 0.7-1.1}	1,04
FA_{SA4 0.5-1.5}	1,04
FA_{SI1 0.1-0.5}	1,34
FA_{SI 0.5-1.0}	1,10
FA_{SI 0.5-1.5}	1,08

Tab. 9 – Fattori di amplificazione Monchio – Ciambellino

6.5.3 Risposta sismica locale Monchio - Palestra

I parametri del modello geofisico adottato sono i seguenti:

Litologia	Spess.	Curva	γ	Vs
	(m)		(kN/m³)	(m/s)
Frana	8,07	Frana	19	250
Frana_2	23,93	Frana	20	540
Bedrock			22	800

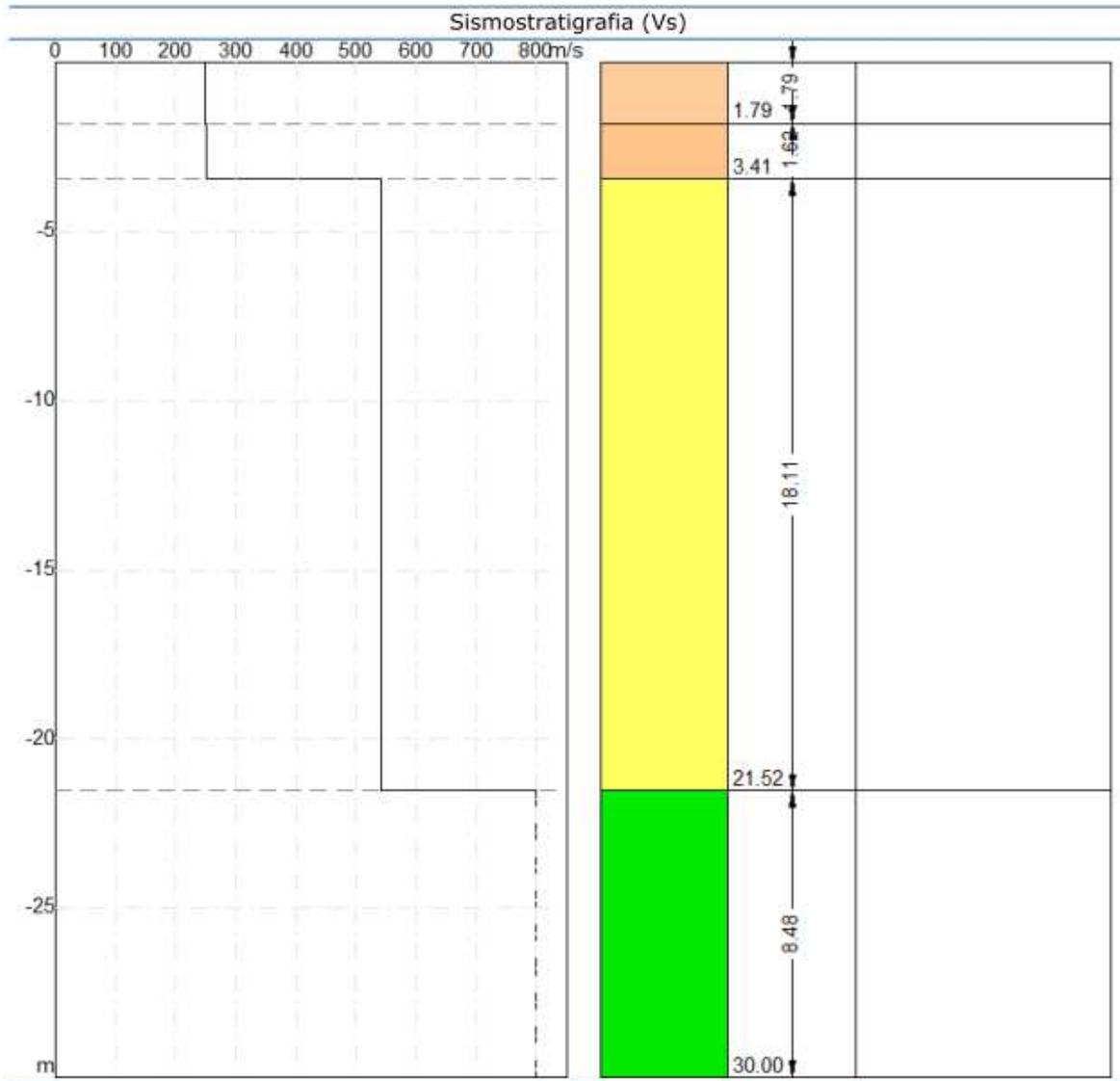
Tab. 10 – Modello geofisico

Nel caso in esame la discretizzazione è stata realizzata considerando anche le informazioni al contorno. Nota, infatti, la stratigrafia nell'intorno dell'area di interesse grazie a sondaggi a carotaggio continuo posti in sito (034022P91SS106 - 034022P92SS107), l'analisi di risposta sismica locale è stata effettuata in prossimità di un inclinometro (034022P93SI108) che ha permesso di definire con esattezza la profondità del bedrock sismico a 32 m da p.c.

Per la caratterizzazione delle Vs, considerato che presumibilmente gli strati individuati in prossimità del punto di RSL siano i medesimi individuati da prova MASW (034022L24MASW24), si è fatto riferimento a tali velocità, sebbene il bedrock da prova sismica sia risultato più superficiale. Tale discrepanza è giustificabile dalla perdita di risoluzione in funzione della profondità a cui questo tipo di prova è soggetto.

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	35 di 68

STUDIO DI MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO



Strato	Profondità [m]	Spessore [m]	Velocità onde di taglio [m/s]
1	1.8	1.8	247.4
2	3.4	1.6	250.1
3	21.5	18.1	541.0
4	∞	∞	799.2

Fig. 23 – Modello geofisico da prova MASW (034022L24MASW24)

Di seguito si riportano i grafici di output dell’analisi di risposta sismica locale (Fig. 24 e Fig. 25):

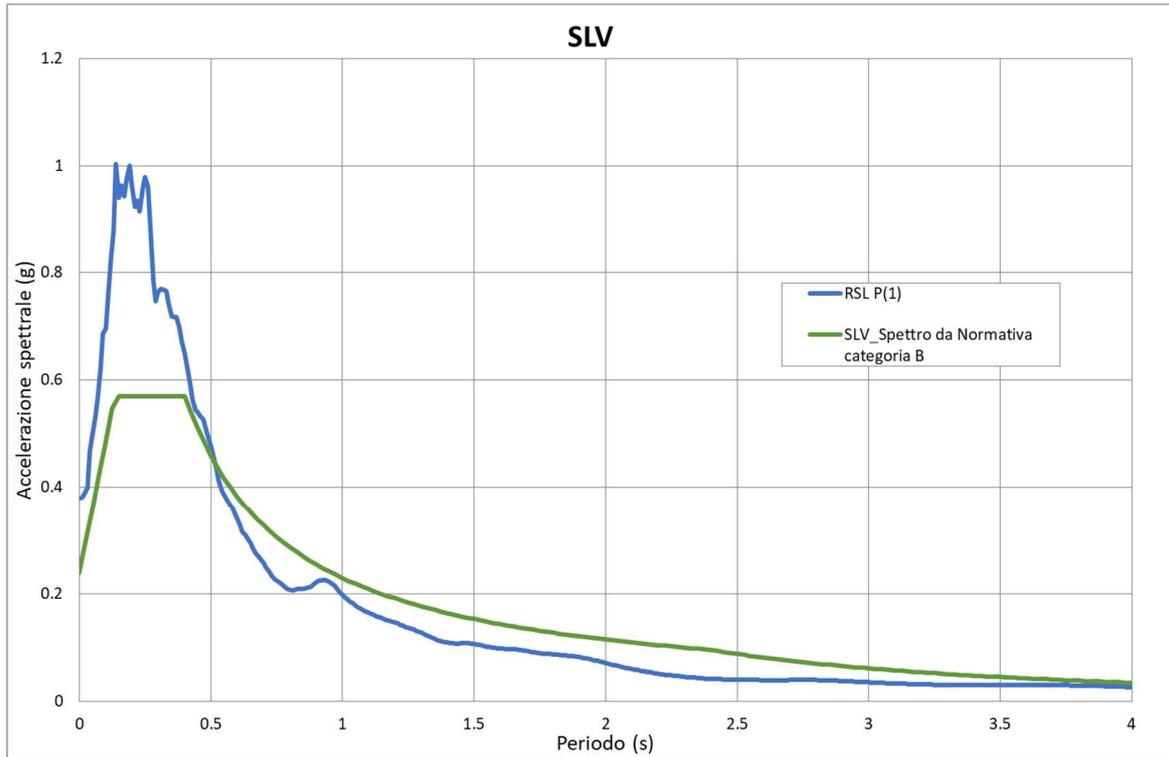


Fig. 24 – Confronto tra lo spettro medio in output in accelerazione per il sito e lo spettro di riferimento da normativa

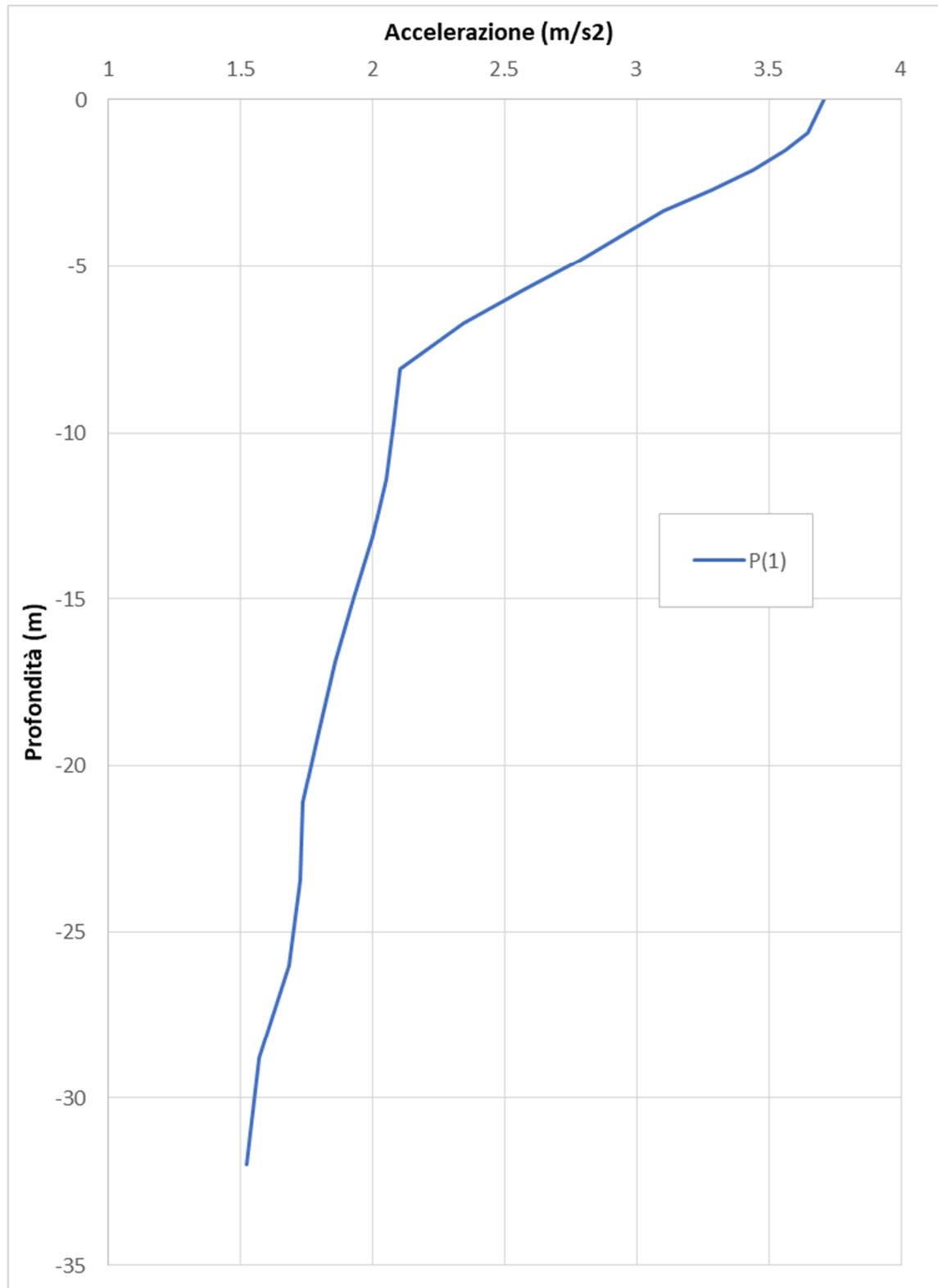


Fig. 25 – Variazione dell’accelerazione con la profondità

In Tab. 11 si riportano i fattori di amplificazione ottenuti per diversi intervalli di periodo:

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	38 di 68

STUDIO DI MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO

	<i>RSL</i>
FA_{PGA}	1,87
FH_{SA1 0.1-0.5}	1,69
FA_{SA2 0.4-0.8}	1,27
FA_{SA3 0.7-1.1}	1,11
FA_{SA4 0.5-1.5}	1,14
FA_{SI1 0.1-0.5}	1,68
FA_{SI 0.5-1.0}	1,25
FA_{SI 0.5-1.5}	1,20

Tab. 11 – Fattori di amplificazione Monchio – Palestra

7. STABILITÀ DI VERSANTE

Come detto in precedenza l'abitato di Monchio è interessato da tre frane attive. Pertanto su queste aree, oltre all'analisi di riposta sismica locale illustrata nel capitolo precedente, è stata eseguita analisi di stabilità di versante come di seguito illustrato.

7.1 Metodo di verifica

La valutazione dei fattori di sicurezza alla stabilità è stata condotta mediante il programma di calcolo SLOPE della GEOSTRU. In particolare, in questa sede si è fatto riferimento al metodo di Jambu, che prevede l'utilizzo di superfici di scivolamento di forma qualsiasi.

Il metodo di Jambu è un semplice, ma accurato, metodo per l'analisi di stabilità dei pendii, basato sul principio dell'equilibrio limite e delle strisce, pertanto viene considerato l'equilibrio di una potenziale massa di terreno in scivolamento suddivisa in n strisce verticali di spessore sufficientemente piccolo da ritenere ammissibile l'assunzione che lo sforzo normale N_j agisce nel punto medio della base della striscia.

Le equazioni da prendere in considerazione sono:

- L'equazione di equilibrio alla traslazione orizzontale del singolo concio;
- L'equazione di equilibrio alla traslazione verticale del singolo concio;
- L'equazione di equilibrio dei momenti.

Il fattore di sicurezza risulta calcolato dalla seguente formula

$$F = \frac{\sum \{c_i \times b + (W_i - u_i \times b_i + \Delta X_i) \times \tan \varphi_i\} \times \frac{\sec^2 \alpha_i}{1 + \tan \alpha_i \times \tan \varphi_i} / F}{\sum W_i \times \tan \alpha_i}$$

in cui i diversi parametri assumono i significati descritti in Fig. 26

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	40 di 68

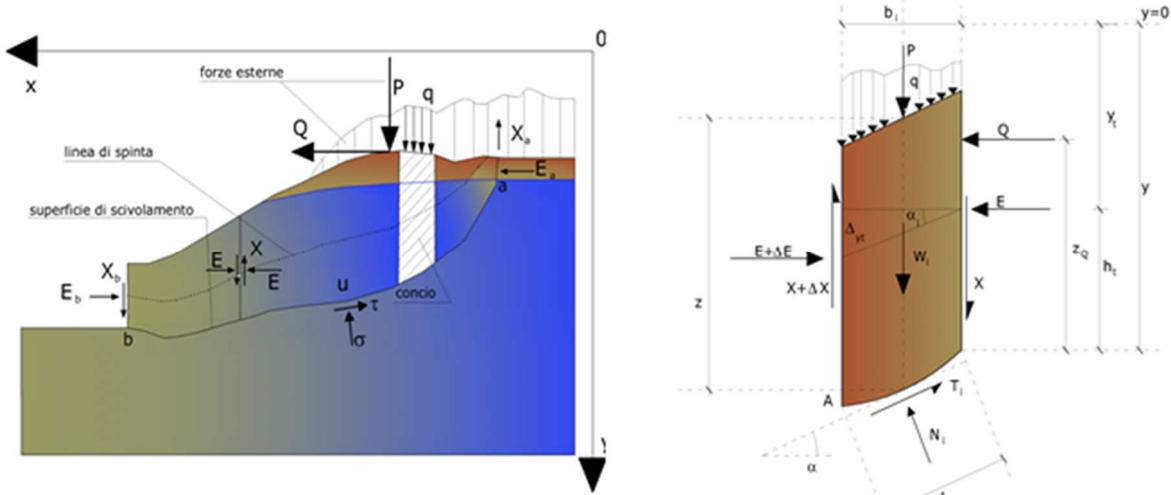


Fig. 26 – Azioni sul concio i-esimo secondo le ipotesi di Janbu e rappresentazione d'insieme dell'ammasso

Janbu, inoltre, propone un metodo per la correzione del fattore di sicurezza che tiene conto della forma della frana e dei parametri geotecnici:

$$F_{\text{corretto}} = f_0 \cdot F$$

dove f_0 è riportato in grafici funzione di geometria e parametri geotecnici (Fig. 27). Tale correzione è molto attendibile per pendii poco inclinati.

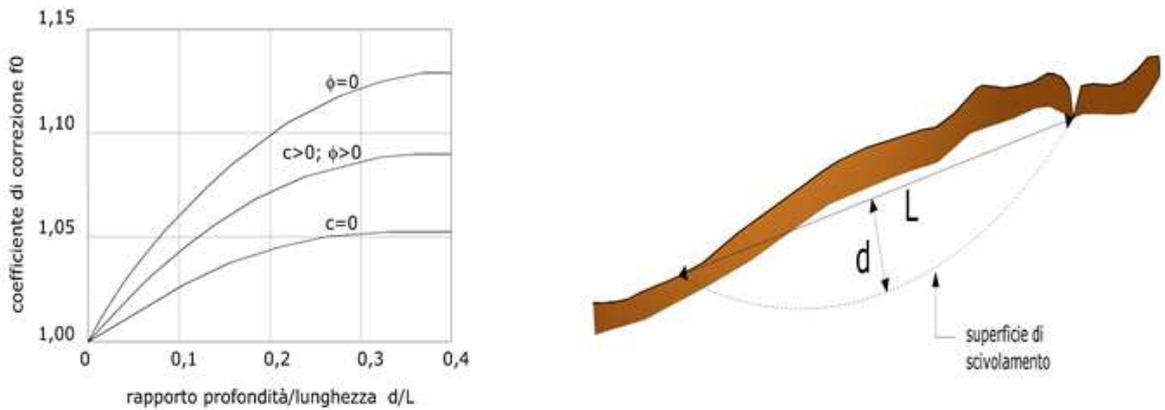


Fig. 27 – Correzione del fattore di sicurezza in funzione della forma della frana e dei parametri geotecnici

La stabilità nei confronti dell'azione sismica viene verificata con il metodo pseudo-statico considerando un incremento della spinta a tergo del blocco dovuta all'accelerazione (verticale ed orizzontale) provocata dal sisma stesso. Tali valori dell'accelerazione provocata dal sisma sono valutati come una frazione dell'accelerazione di gravità g e i coefficienti moltiplicatori di g (K_x e K_y) variano con le caratteristiche

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	41 di 68

sismiche della zona. Per i terreni che sotto l'azione di un carico ciclico possono sviluppare pressioni interstiziali elevate viene considerato un aumento in percento delle pressioni neutre che tiene conto di questo fattore di perdita di resistenza.

Ai fini della valutazione dell'azione sismica vengono quindi considerate le seguenti forze:

$$F_H = K_x W$$

$$F_V = K_y W$$

Essendo F_H e F_V rispettivamente la componente orizzontale e verticale della forza d'inerzia applicata al baricentro di ogni concio, W il peso del concio e K_x e K_y i coefficienti sismici orizzontale e verticale già introdotti in precedenza.

Gli effetti dello spostamento indotto dal sisma sono stati calcolati con il metodo di *Newmark*.

L'analisi alla *Newmark* è un metodo di analisi numerica utile alla definizione dello spostamento di una frana potenziale, considerata come un blocco rigido disposto su un pendio, imponendo le forze dinamiche (sisma) agenti sul blocco stesso. In sostanza il metodo valuta lo spostamento di un blocco di massa pari a quella del corpo in frana, sottoposto alla accelerazione indotta dal sisma (cfr. Fig. 28).

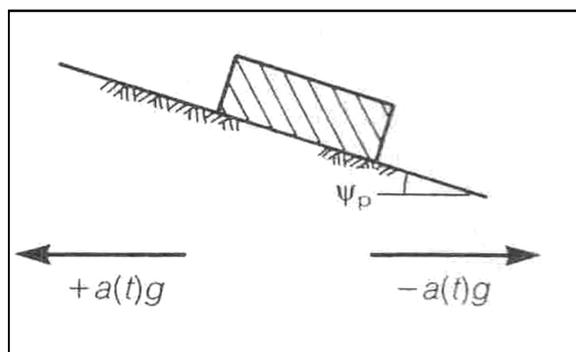


Fig. 28 – Schematizzazione del metodo di *Newmark*

Una volta definita la superficie di scorrimento il programma utilizzato (QSIM della GEOSTRU) definisce l'accelerazione critica che determina il movimento del blocco equivalente al volume della frana e successivamente confronta tale valore con l'accelerogramma del sito per valutare per quanto tempo il blocco rimane in condizioni di accelerazione superiori a quella critica (cfr. Fig. 29).

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	42 di 68

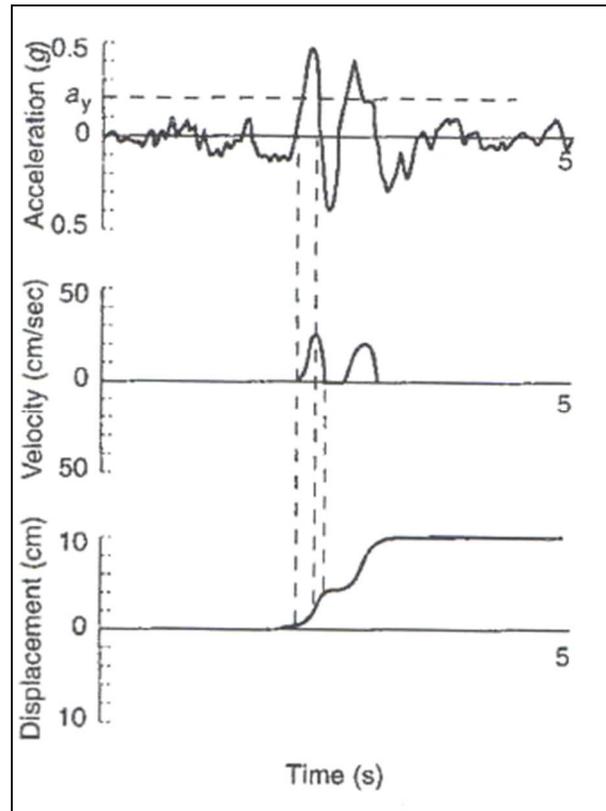


Fig. 29 – Esempificazione della metodologia di *Newmark*, con doppia integrazione dell'accelerogramma

Il calcolo degli spostamenti permanenti avviene attraverso la doppia integrazione (accelerazione>>velocità>>spostamento) delle porzioni dell'accelerogramma che supera il valore di accelerazione critica (al di sopra del quale si ha instabilità).

In pratica il programma calcola lo spostamento massimo per ciascun accelerogramma considerato di riferimento, per la porzione di pendio di cui il metodo pseudostatico ha definito il fattore di sicurezza minimo.

7.2 Le ipotesi verificate

La verifica è stata effettuata sulle zone di attenzione per instabilità di versante presenti a Monchio e identificata nella Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica.

Le dimensioni degli ammassi franosi non hanno consentito, anche in relazione ai fondi disponibili, di effettuare le indagini che l'Allegato A3 punto C) della DGR 630/2019

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	43 di 68

indica come opportune per la verifica di stabilità in condizioni sismiche. In particolare, non sono disponibili dati affidabili relativi ai parametri geotecnici dei materiali in frana.

Per questo motivo si è preferito procedere con una metodologia di verifica mediante *back analysis*: definita la superficie di scorrimento della frana si è effettuata una verifica in condizioni non sismiche che ha fornito le coppie dei parametri geotecnici ϕ' e c' che determinano un coefficiente di sicurezza $F_s=1$ (cfr. Fig. 30).

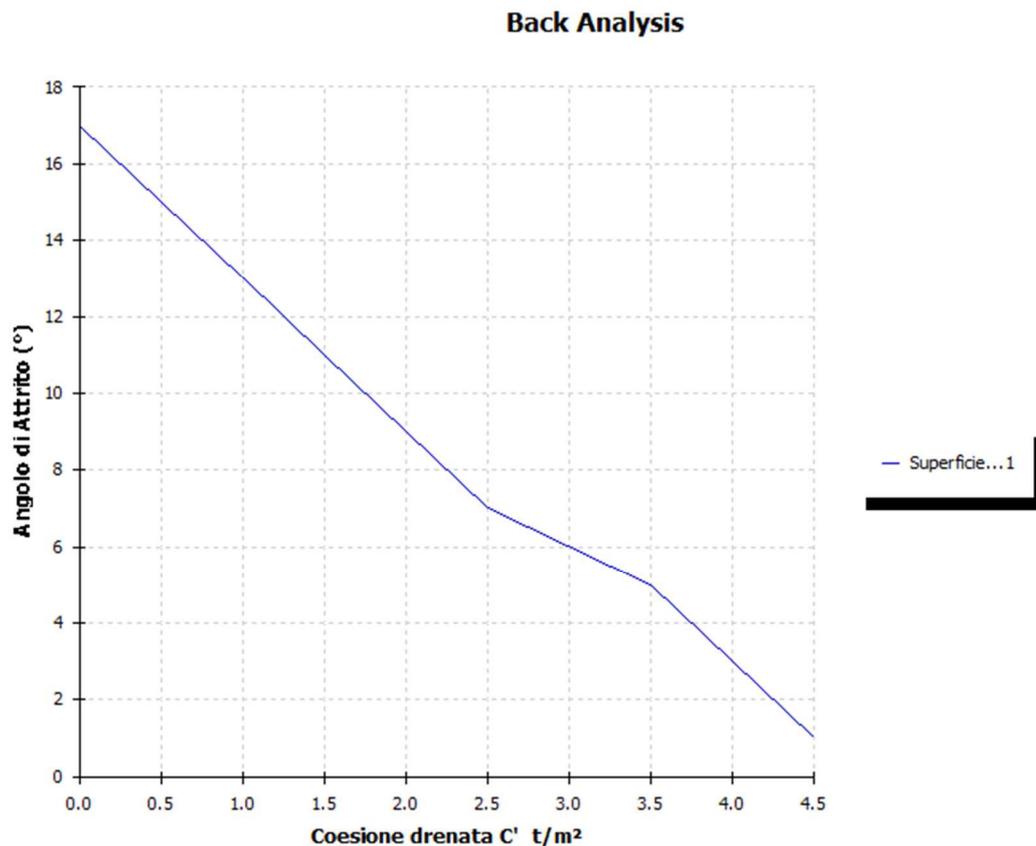


Fig. 30 – Esempio *Back analysis* per la frana di Monchio – Parcheggio

Successivamente è stata calcolata l’accelerazione critica ed è quindi stata effettuata l’analisi dinamica.

La verifica dinamica, per ciascun sito, è stata effettuata per l’accelerogramma fornito dal software SEISM-HOME⁴ di Eucentre maggiormente rappresentativo di ciò che si verifica in sito, opportunamente scalato mediante i metodi della risposta sismica locale

⁴ Rota M., Zuccolo E., Taverna L., Corigliano M., Lai C.G., Penna A. [2012] “Mesozonation of the Italian territory for the definition of real spectrum-compatible accelerograms”, Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 10, No. 5, pp. 1357-1375.

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	44 di 68

(accelerogrammi di output di LSR 2D - Local Sismic Response 2D Ver. 4.5 di STACEC). Nelle tabelle che seguono sono stati riportati gli spostamenti calcolati in funzione del coefficiente di sicurezza $F_s \sim 1$ sulla base di una delle coppie di parametri ϕ' e c' ottenute con back analysis (cfr. Tab. 12, 13 e 14).

<i>Phi</i>	<i>c'</i>	<i>Fs</i>	<i>Ac</i>	<i>Spostamento SLV5</i>
$^{\circ}$	t/m^2	-	a_g/g	cm
7	2,5	0,9871	0,01	42,18

Tab. 12 – Tabella riassuntiva delle verifiche effettuate per la frana di Monchio – Parcheggi

<i>Phi</i>	<i>c'</i>	<i>Fs</i>	<i>Ac</i>	<i>Spostamento SLV5</i>
$^{\circ}$	t/m^2	-	a_g/g	cm
5	2	1,0254	0,01	41,44

Tab. 13 – Tabella riassuntiva delle verifiche effettuate per la frana di Monchio – Ciambellino

<i>Phi</i>	<i>c'</i>	<i>Fs</i>	<i>Ac</i>	<i>Spostamento SLV5</i>
$^{\circ}$	t/m^2	-	a_g/g	cm
15	4,5	1,0617	0,02	76,46

Tab. 14 – Tabella riassuntiva delle verifiche effettuate per la frana di Monchio – Palestra

Di seguito si riportano in modo sintetico i risultati delle verifiche eseguite.

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	45 di 68

7.2.1 Frana di Monchio - Parcheggio

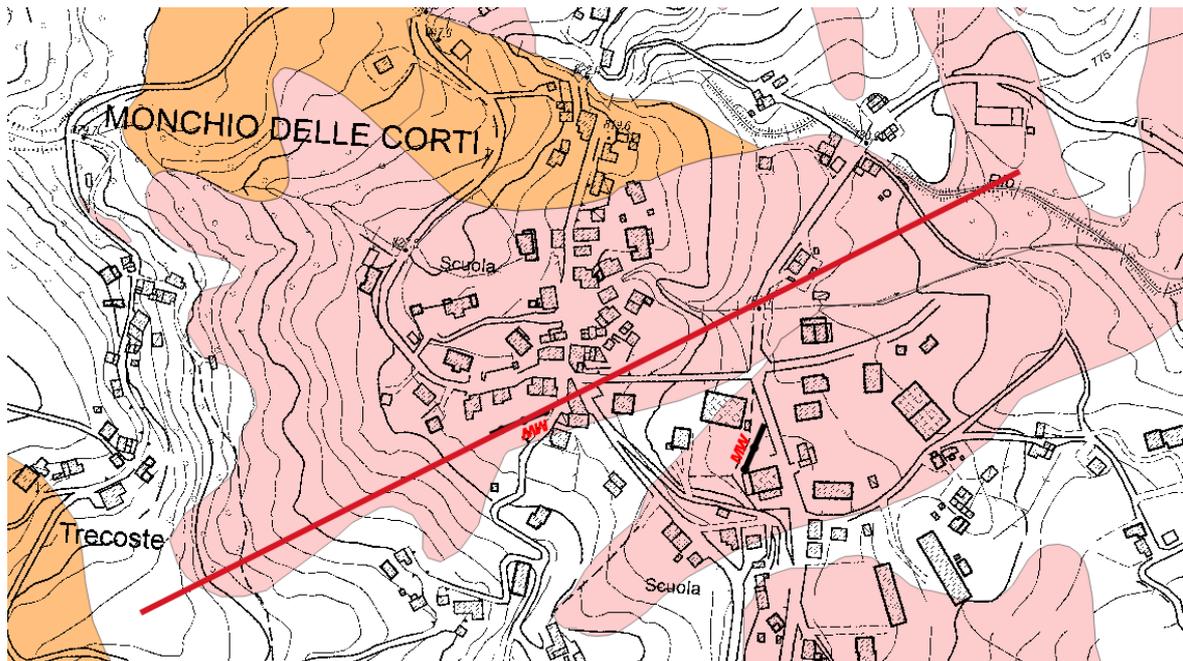


Fig. 31 – Ubicazione della sezione analizzata a Monchio - Parcheggio

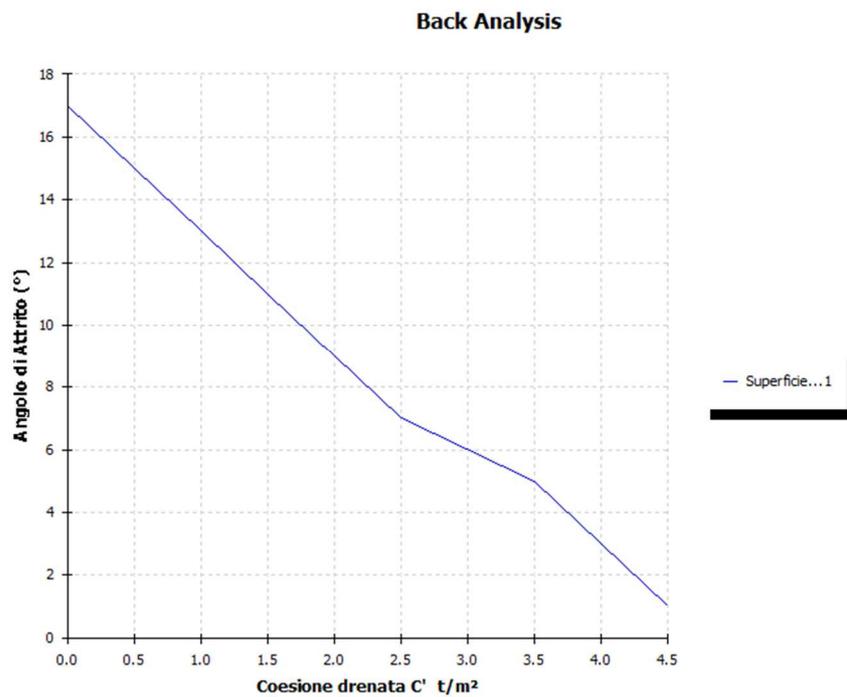


Fig. 32 – Back Analysis: grafico angolo di attrito – coesione drenata Monchio - Parcheggio

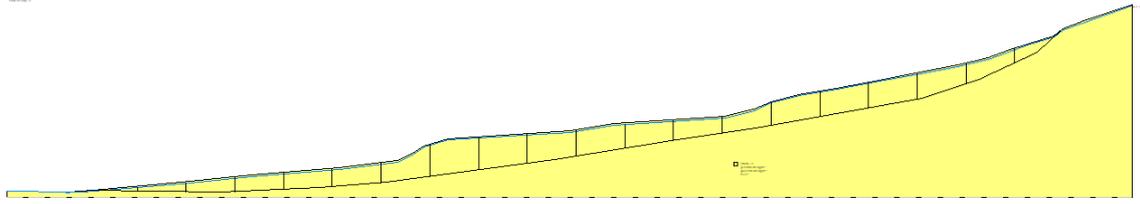


Fig. 33 – Sezione analizzata con suddivisione in conci del corpo della frana Monchio - Parcheggio
Sisma SLV5

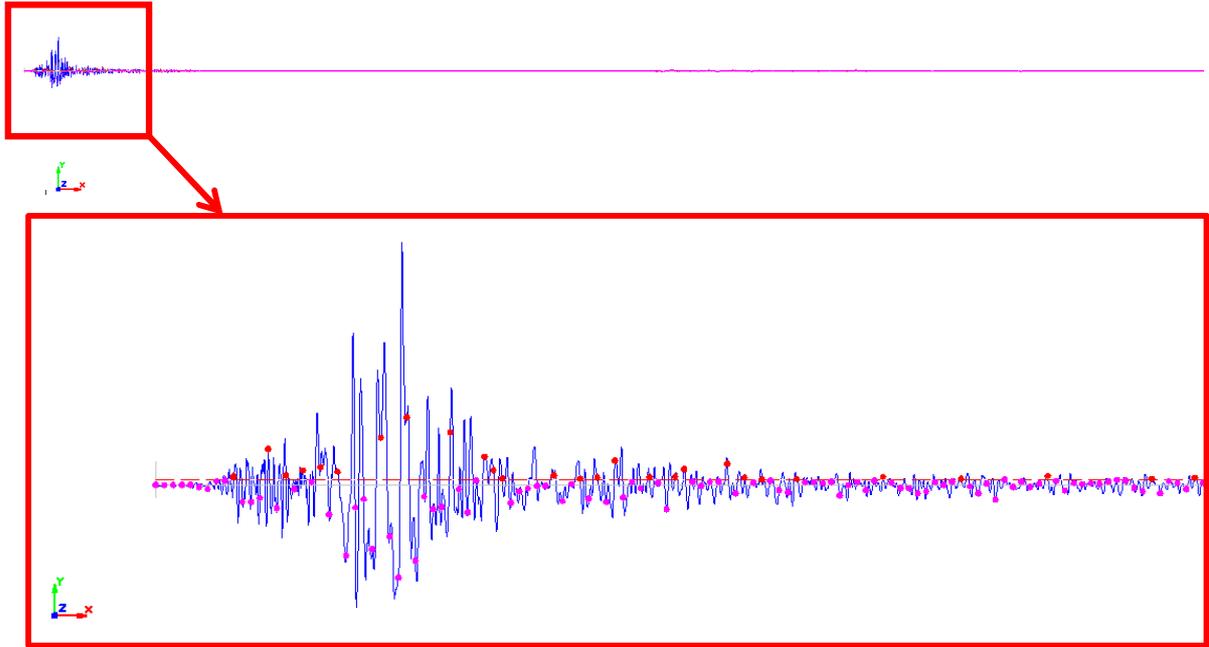


Fig. 34 – Analisi dinamica: accelerogramma (in rosso i punti con accelerazione superiore all'accelerazione critica che determinano spostamento)

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	47 di 68

7.2.2 Frana di Monchio - Ciambellino

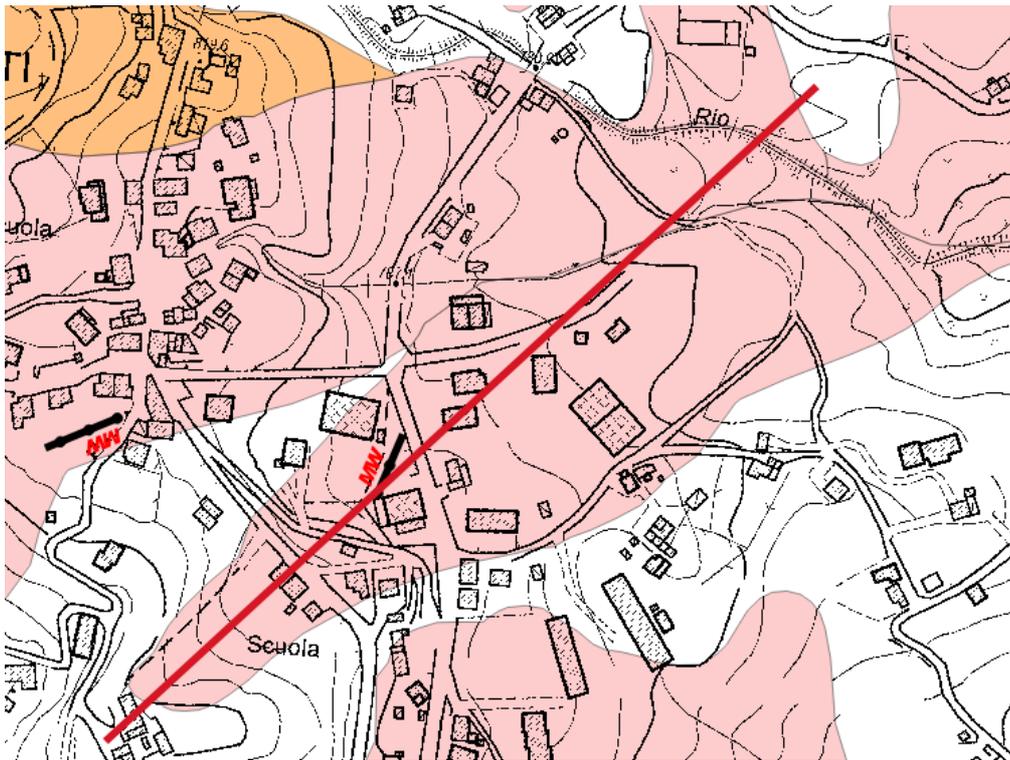


Fig. 35 – Ubicazione della sezione analizzata a Monchio - Ciambellino

Back Analysis

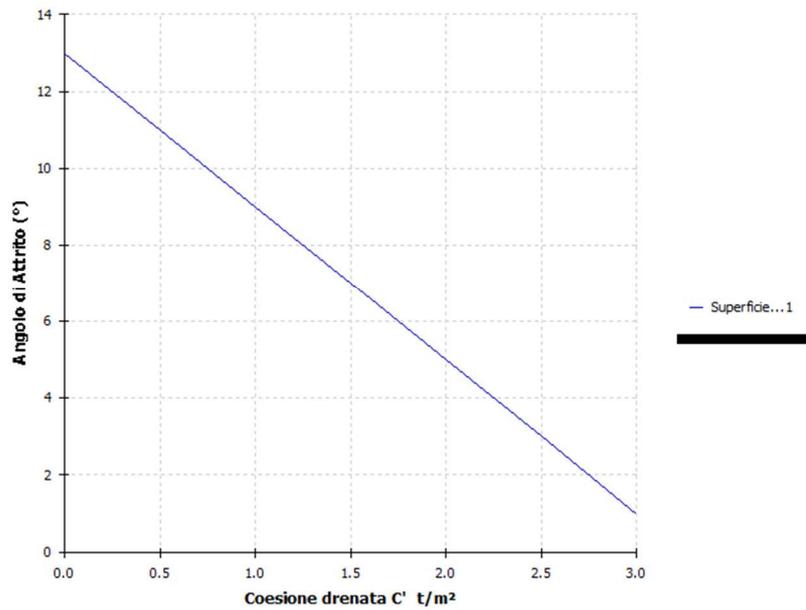


Fig. 36 – Back Analysis: grafico angolo di attrito – coesione drenata Monchio - Ciambellino

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	48 di 68

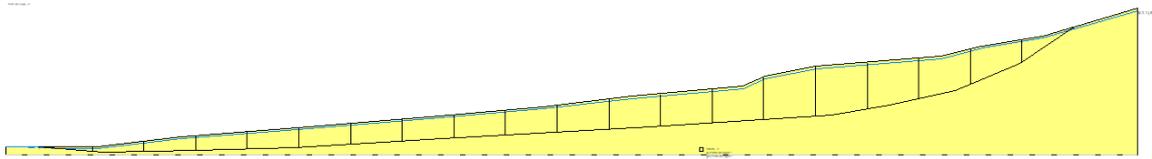


Fig. 37 – Sezione analizzata con suddivisione in conchi del corpo della frana Monchio - Ciambellino

Sisma SLV5

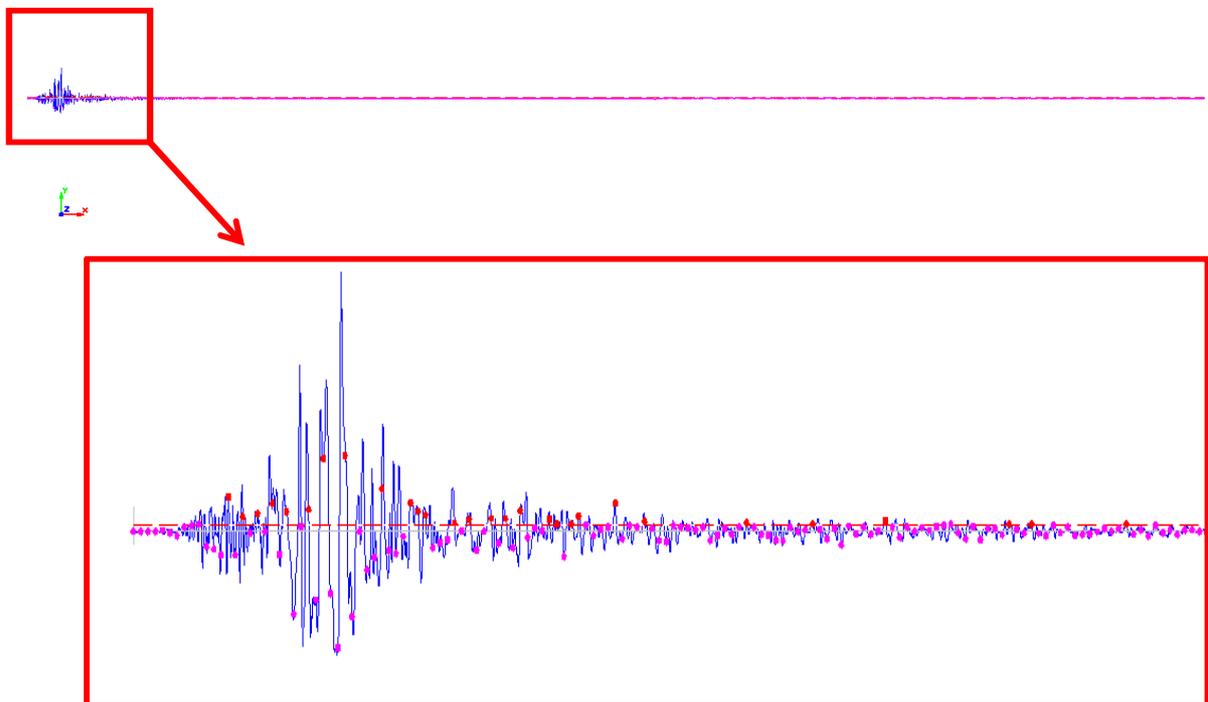


Fig. 38 – Analisi dinamica: accelerogramma (in rosso i punti con accelerazione superiore all'accelerazione critica che determinano spostamento)

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	49 di 68

7.2.3 Frana di Monchio - Palestra

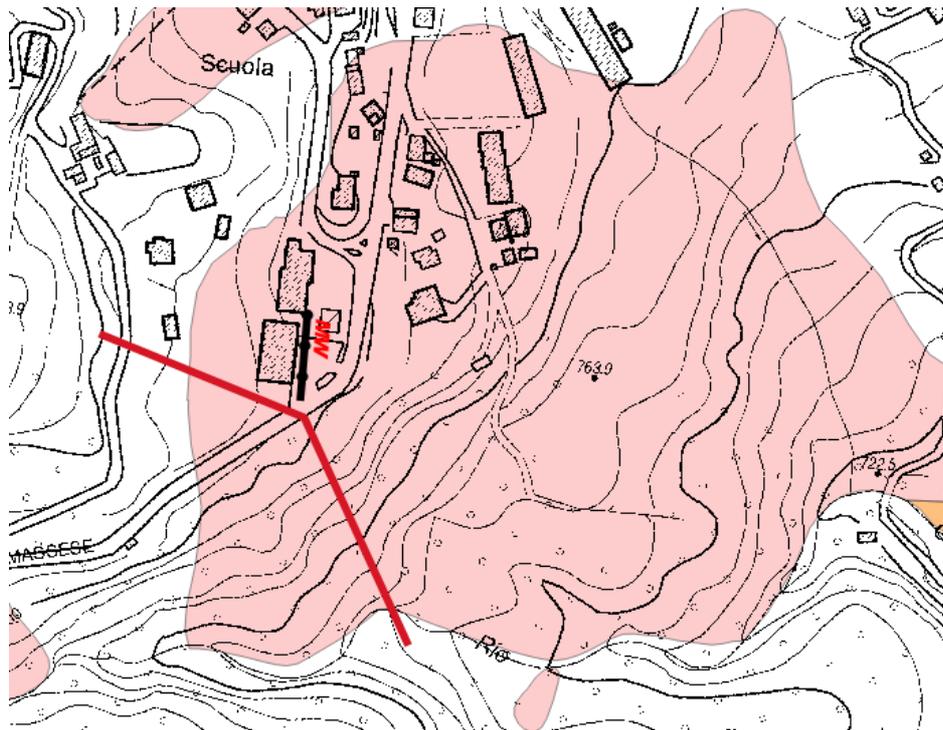


Fig. 39 – Ubicazione della sezione analizzata a Monchio - Palestra

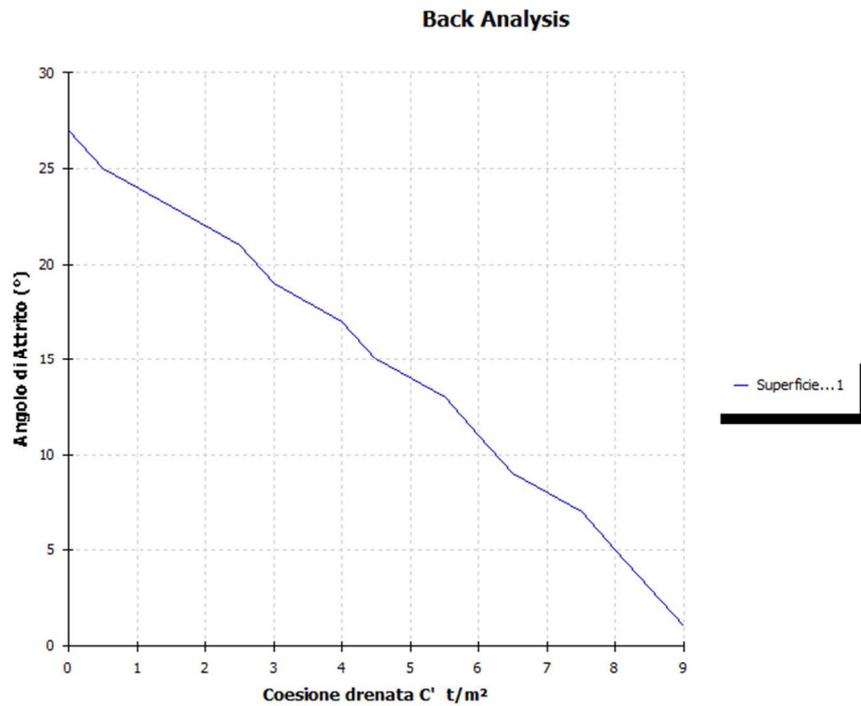


Fig. 40 – Back Analysis: grafico angolo di attrito – coesione drenata Monchio - Palestra

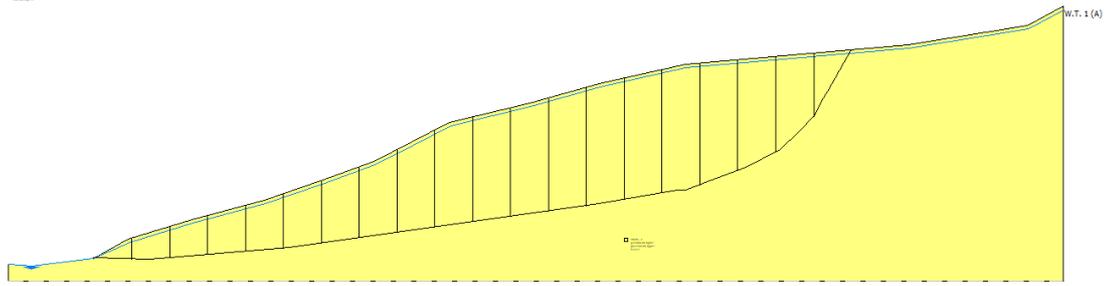


Fig. 41 – Sezione analizzata con suddivisione in conci del corpo della frana Monchio - Palestra

Sisma SLV1

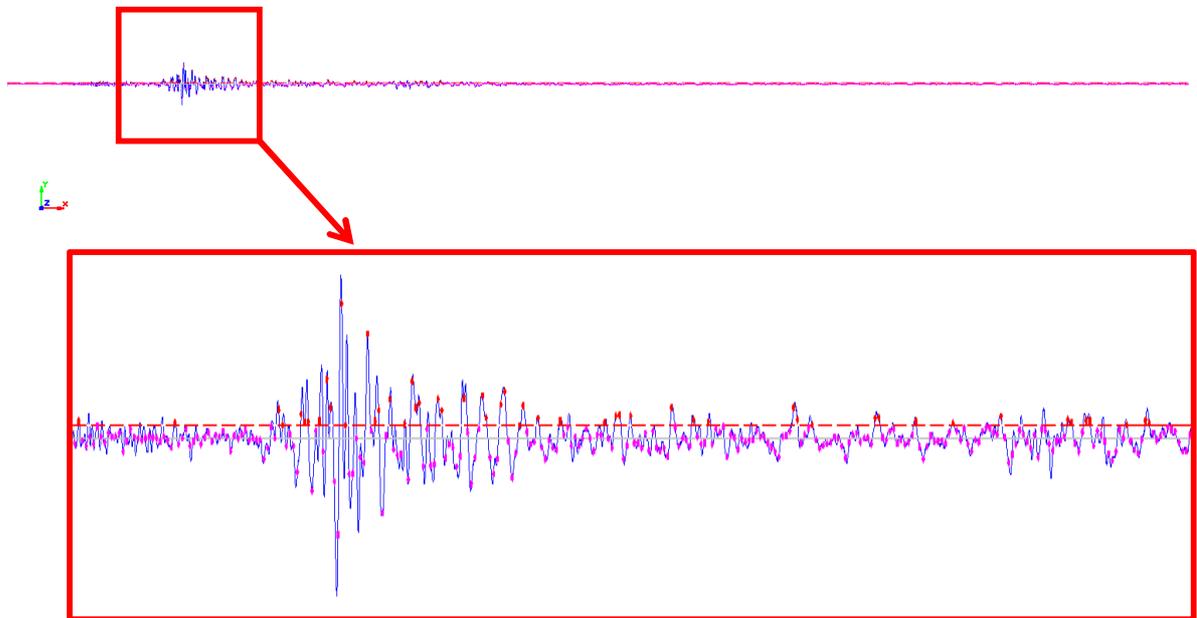


Fig. 42 – Analisi dinamica: accelerogramma (in rosso i punti con accelerazione superiore all'accelerazione critica che determinano spostamento)

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	51 di 68

8. ELABORATI CARTOGRAFICI

8.1 Carta delle indagini

Nell'aggiornamento della Carta delle indagini sono state riportate le ubicazioni delle prove di nuova esecuzione, unitamente ai dati pregressi, relativi a indagini geognostiche e/o geofisiche a corredo di pratiche edilizie depositate presso l'Ufficio Tecnico Comunale.

Esse sono state distinte in base alla tipologia (Fig. 43).

	Sondaggio a carotaggio continuo
	Sondaggio a carotaggio continuo che intercetta il substrato
	Sondaggio da cui sono stati prelevati campioni
	Sondaggio con inclinometro
	Trincea o pozzetto esplorativo
	Prova penetrometrica statica con punta meccanica (CPT)
	Prova penetrometrica dinamica super pesante (DS)
	Prova penetrometrica dinamica pesante (DP)
	Prova penetrometrica dinamica media (DN)
	Prova penetrometrica dinamica leggera (DL)
	Stazione microtremore a stazione singola (HVSR)
	Stratigrafia zona MS (teorica)
	MASW
	Profilo sismico a rifrazione

Fig. 43 – Legenda della Carta delle indagini

Nelle carte sono indicate anche alcune indagini esterne ai perimetri delle aree oggetto di microzonazione sismica di Livello 2 e 3, ove sono state indirizzate le analisi, ma ugualmente utili a definire le caratteristiche litostratigrafiche e/o geofisiche dei terreni.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	52 di 68

8.2 Carta geologico-tecnica per microzonazione sismica

Nella Carta geologico-tecnica sono state riportate le informazioni di base (geologia, geomorfologia, caratteristiche litotecniche, geotecniche e idrogeologiche) derivate da elaborati esistenti e da indagini geognostiche pregresse.

Anche tale cartografia costituisce un aggiornamento di quella già redatta per gli studi di microzonazione di 2° livello; la motivazione dell'aggiornamento deriva dal fatto che alcune categorie descrittive del substrato geologico sono variate con i più recenti standard.

Dovendo rappresentare l'intero territorio comunale alla scala 1:10.000 sono state allestite due tavole, relative rispettivamente ai settori Nord e Sud.

Pertanto la legenda della carta geologico-tecnica è diventata la seguente (Fig. 44):

 Studio di geologia <i>dott. Stefano Castagnetti</i>	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	53 di 68

Terreni di copertura

- GM** Ghiaie limose, miscela di ghiaia, sabbia e limo
- GP** Ghiaie pulite con granulometria poco assortita, miscela di ghiaia e sabbia
- OL** Limi organici, argille limose organiche di bassa plasticità
- CL** Argille inorganiche di media-bassa plasticità, argille ghiaiose o sabbiose, argille limose, argille magre

Substrato geologico

- LPS** Lapideo stratificato
- ALS** Alternanza di litotipi stratificato
- STALS** Alternanza di litotipi, stratificato fratturato
- AL** Alternanza di litotipi
- COS** Coesivo sovraconsolidato stratificato
- CO** Coesivo sovraconsolidato

Elementi tettonico strutturali

- Faglia inversa non attiva (certa)
- Faglia inversa non attiva (incerta)
- Faglia con cinematismo non definito (certa)
- Faglia con cinematismo non definito (incerta)

Elementi geologici e idrogeologici

- Profondità (m) substrato geologico raggiunto da pozzo o sondaggio
- Giacitura strati
- Traccia di sezione geologica rappresentativa del modello del sottosuolo

Ambienti genetico-deposizionali dei terreni di copertura

- es** Argini / barre / canali
- tf** Terrazzo fluviale
- ca** Conoide alluvionale
- ec** Eluvi/colluvi
- pa** Palustre
- fd** Falda detritica
- mr** Morena

- Confine comunale
- Aree oggetto di microzonazione sismica di livello 2 e3

Instabilità di versante

- Crollo o ribaltamento - attiva
- Scorrimento - attiva
- Colata - attiva
- Complessa - attiva
- Non defenito - attiva
- Scorrimento - quiescente
- Colata - quiescente
- Complessa - quiescente
- Non definito - quiescente

Forme di superficie e sepolte

- Conoide alluvionale
- Falda detritica
- Cresta
- Picco isolato

Fig. 44 – Legenda della Carta geologico tecnica

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	54 di 68

8.3 Carta delle frequenze naturali dei terreni

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

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

L'aggiornamento deriva dal fatto che sono state aggiunte n° 14 nuove misure di rumore sismico, reperite presso l'archivio dell'Ufficio Tecnico comunale; inoltre sono cambiati gli standard rappresentativi di tale cartografia.

In questa carta sono stati riportati tutti i punti di misura, 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, di 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:

- $F_0 \leq 0,6$ Hz
- $0,6 \text{ Hz} < F_0 \leq 1$ Hz
- $1 \text{ Hz} < F_0 \leq 2$ Hz
- $2 \text{ Hz} < F_0 \leq 8$ Hz
- $F_0 > 8$ Hz

Inoltre, sono state utilizzate simbologie diverse a seconda che la prova sia caratterizzata, in corrispondenza della frequenza principale, da un contrasto d'impedenza più o meno alto.

In Fig. 45 si riporta uno stralcio della legenda di tale elaborato cartografico.

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	55 di 68

frequenza picco significativo (Hz)	ampiezza picco			spessore atteso (m)
	$1,5 < \text{HVSr} < 2$	$2 < \text{HVSr} < 3$	$\text{HVSr} \geq 3$	
$F_0 \leq 0,6$				> 200
$0,6 < F_0 \leq 1$				200 - 100
$1 < F_0 \leq 2$				100 - 30
$2 < F_0 \leq 8$				30 - 10
$F_0 > 8$				< 10
Assenza di picchi significativi				

A lato del simbolo sono riportate la frequenza relative al primo picco significativo (in rosso) e al secondo picco (in blu) se presente

Fig. 45 – Legenda della Carta delle frequenze

8.4 Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica

La Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS), rappresenta il documento fondamentale del primo livello di approfondimento. Nel presente studio viene proposta una revisione di tale cartografia alla luce dell'aggiornamento normativo e delle variazioni che hanno subito gli standard di rappresentazione.

In tale elaborato l'intero territorio comunale viene distinto a seconda dell'appartenenza a una delle seguenti categorie:

- 1) **zone stabili.** Si tratta di zone con affioramento di un substrato rigido;
- 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. In queste zone sono richiesti approfondimenti di secondo livello;
- 3) **zone suscettibili di 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 (queste ultime non presenti sul territorio monchiese) e densificazione. In queste zone sono richiesti approfondimenti di terzo livello.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	56 di 68

Le zone stabili sono state individuate dove affiora il substrato lapideo e risultano particolarmente estese in corrispondenza del settore meridionale del territorio comunale.

La categoria dominante è quella delle zone stabili suscettibili di amplificazioni locali, all'interno della quale sono state operate ulteriori distinzioni. Infatti, sulla base delle caratteristiche litostratigrafiche, sono stati identificate 9 microzone omogenee ognuna con un proprio profilo stratigrafico tipo (cfr. Fig. 46)⁵:

- Zona 1 - Successione stratigrafica costituita da substrato non rigido ($V_s < 800$ m/s) di tipo ALS, ricoperto da una coltre di depositi eluvio-colluviali di spessore medio inferiore a 3,00 m;
- Zona 2 - Successione stratigrafica costituita da substrato non rigido ($V_s < 800$ m/s) di tipo SFALS o AL o CO o COS, ricoperto da una coltre di depositi eluvio-colluviali di spessore medio inferiore a 3,00 m;
- Zona 3 - Successione stratigrafica costituita da substrato geologico non rigido ($V_s < 800$ m/s), ricoperto da depositi di versante, a granulometria prevalentemente argillosa e spessore medio pari a circa 7,50 m;
- Zona 4 - Successione stratigrafica costituita da substrato non rigido ($V_s < 800$ m/s), ricoperto da una coltre di depositi morenici di spessore medio pari a circa 10,00;
- Zona 5 - Successione stratigrafica costituita da substrato non rigido ($V_s < 800$ m/s), ricoperto da una coltre di depositi morenici di spessore medio pari a circa 15,00 m;
- Zona 6 - Successione stratigrafica costituita da un substrato non rigido ($V_s < 800$ m/s), ricoperto da una coltre di depositi a granulometria prevalentemente fine, di spessore non definibile per carenza di dati litostratigrafici;
- Zona 7 - Successione stratigrafica costituita da un substrato non rigido ($V_s < 800$ m/s), ricoperto da una coltre di depositi a granulometria prevalentemente grossolana, di spessore non definibile per carenza di dati litostratigrafici;

⁵ Nel precedente studio le microzone stabili suscettibili di amplificazioni locali erano solamente 5

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	57 di 68

- Zona 8 - Successione stratigrafica costituita da un substrato rigido ($V_s > 800$ m/s), ricoperto da una coltre di depositi a granulometria prevalentemente fine, di spessore non definibile per carenza di dati litostratigrafici;
- Zona 9 - Successione stratigrafica costituita da un substrato rigido ($V_s > 800$ m/s), ricoperto da una coltre di depositi a granulometria prevalentemente grossolana, di spessore non definibile per carenza di dati litostratigrafici.

Le Fig. 46 mostra le colonne stratigrafiche sintetiche che caratterizzano le MOPS (delle zone stabili suscettibili di amplificazioni locali).

 Studio di geologia <i>dott. Stefano Castagnetti</i>	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	58 di 68

STUDIO DI MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO

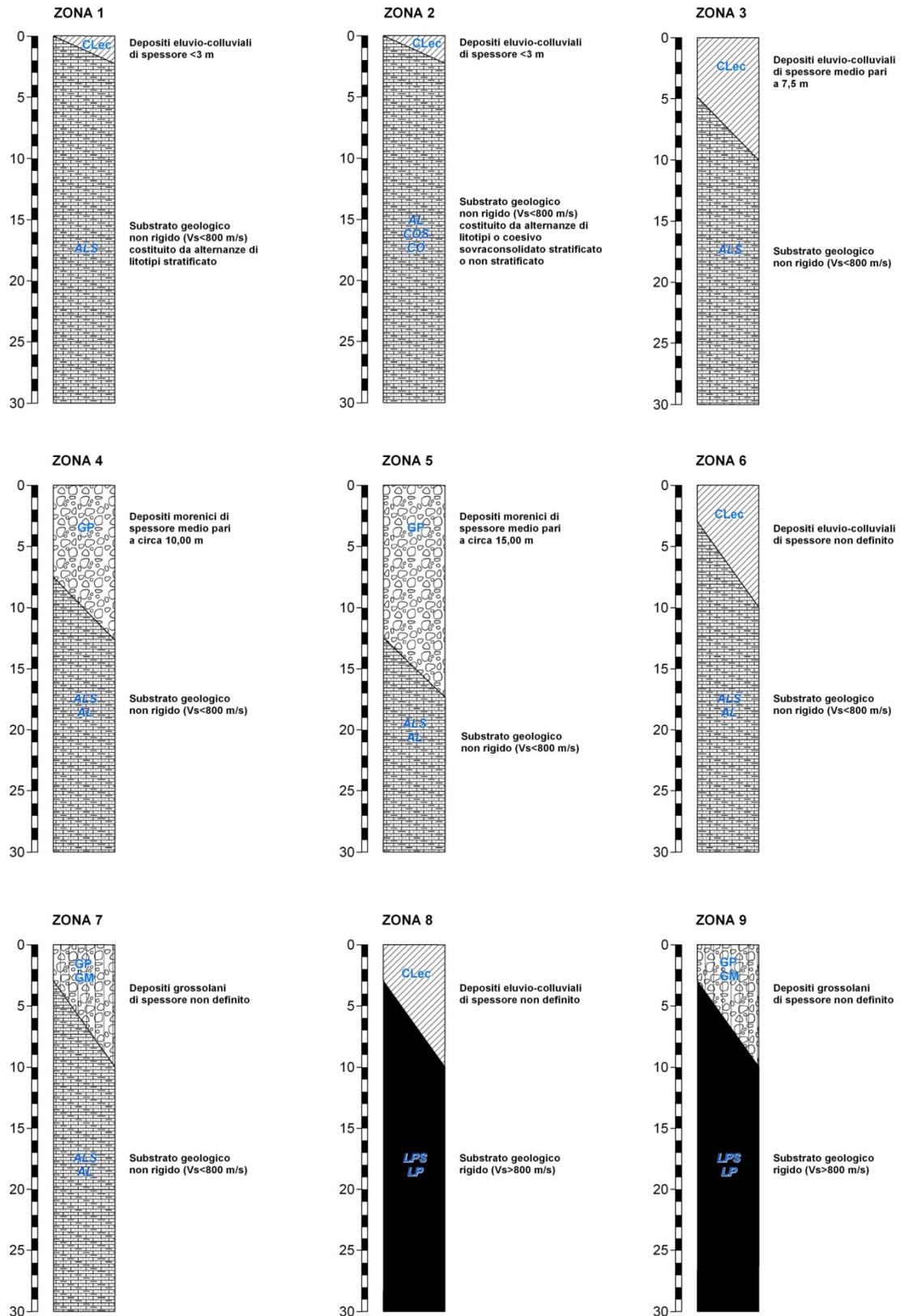


Fig. 46 - Colonne stratigrafiche sintetiche relative alle zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	59 di 68

In estesi settori del territorio comunale sono state cartografate zone di attenzione per instabilità, riconducibili a fenomeni di instabilità di versante attivi e quiescenti come di seguito descritte (cfr. Fig. 47):

- ZAFR - Zona di Attenzione per instabilità di versante - Zona 10. Corpo di frana di spessore <7,5 m, costituito da materiali prevalentemente argilloso-limosi, impostato su un substrato di alternanze di litotipi stratificati di tipo non rigido ($V_s < 800$ m/s);
- ZAFR - Zona di Attenzione per instabilità di versante - Zona 11. Corpo di frana di spessore compreso tra 7,5 e 12,5 m, costituito da materiali prevalentemente argilloso-limosi, impostato su un substrato di alternanze di litotipi stratificati di tipo non rigido ($V_s < 800$ m/s);
- ZAFR - Zona di Attenzione per instabilità di versante - Zona 12. Corpo di frana di spessore non definibile per carenza di dati litostratimetrici, impostato su un substrato di tipo non rigido ($V_s < 800$ m/s);
- ZAFR - Zona di Attenzione per instabilità di versante - Zona 13. Corpo di frana di spessore non definibile per carenza di dati litostratimetrici, impostato su un substrato di tipo rigido ($v_s > 800$ m/s).

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	60 di 68

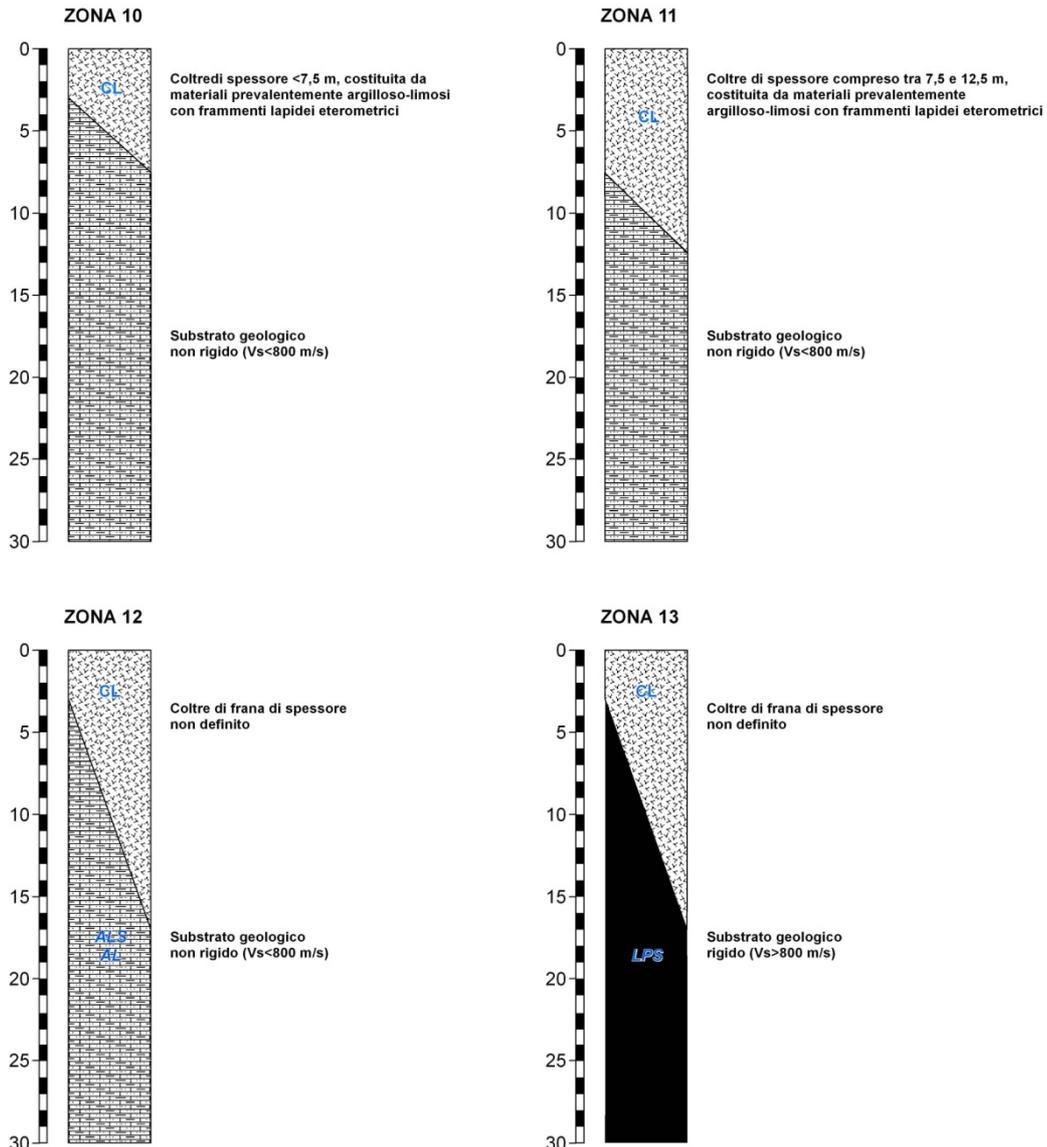


Fig. 47 - Colonne stratigrafiche sintetiche relative alle zone di attenzione per instabilità di versante

Infine nella carta delle MOPS sono state riportate le forme di superficie e sepolte (conoide alluvionale, falda detritica, cresta e picco isolato) e le tracce per gli approfondimenti delle amplificazioni topografiche.

8.5 Carta delle velocità delle onde di taglio S

In ottemperanza ai riferimenti tecnici citati nelle premesse, per tutte le aree oggetto di studio è stata redatta la Carta delle velocità delle onde di taglio S (V_s).

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	61 di 68

Tale cartografia costituisce un aggiornamento, anche alla luce delle nuove indagini, di quella già redatta per gli studi di microzonazione di 2° livello. In tali elaborati sono ubicati tutti i punti di misura, distinguendoli a seconda della tipologia di prova effettuata (HVSR, MASW) e indicando il corrispondente valore di VsH (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*);

o di Vs30 (sempre in m/s), dove:

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum \frac{h_i}{V_{s_i}}}$$

h_i = spessore (in metri) dello strato *i*-esimo (fino alla profondità di 30 m);

V_{s_i} = velocità (in m/s) dello strato *i*-esimo (fino alla profondità di 30 m).

In Fig. 48 si riporta uno stralcio della legenda di tale elaborato cartografico:

	Stazione microtremore a stazione singola (HVSR)	
	MASW	
8	H	Profondità (m) da p.c. del contrasto di velocità più significativo
250	VSH	Velocità Vs (m/s) delle onde di taglio S dei terreni di copertura sovrastanti al substrato rigido (Vs >= 800 m/s) o non rigido (Vs < 800 m/s)
450	VS30	Velocità Vs (m/s) delle onde di taglio S nei primi 30 m di terreno

Fig. 48 – Legenda della Carta delle velocità delle onde di taglio S

8.6 Carte di microzonazione sismica

Le Carte di microzonazione sismica di Livello 3 in scala 1:5.000 fanno parte degli elaborati grafici conclusivi del presente studio.

L'amplificazione è stata quantificata in termini di:

- $F_{PGA} = PGA/PGA_0$, 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;
- $FA = SA/SA_0$, 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 $0,5s \leq T \leq 1,5s$;
- $FH = SI/SI_0$, dove SI_0 è l'integrale dello spettro di risposta in velocità (Intensità di Housner) al suolo di riferimento e SI è 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 $0,5s \leq T \leq 1,5s$.

Per le zone di suscettibilità per instabilità di Monchio Capoluogo, sottoposte ad analisi di terzo livello, i fattori di amplificazione sono stati viceversa determinati attraverso l'analisi di risposta sismica locale descritta nel Cap. 6. Inoltre per queste zone è indicato anche lo spostamento massimo atteso (FRT) stimato attraverso l'analisi di stabilità del versante (Cap. 7).

Per le aree sottoposte ad analisi di secondo livello i valori dei fattori di amplificazione (FA) sono stati ricavati dalle tabelle allegate alla DGR n. 630 del 29 aprile 2019 della Regione Emilia-Romagna.

La scelta dell'abaco per la stima dei fattori di amplificazione è stata effettuata sulla base delle caratteristiche sismo stratigrafiche del sottosuolo.

In Fig. 49 sono state rappresentate le Zone oggetto di studio, distinte sulla base delle tabelle utilizzate per l'attribuzione dei fattori di amplificazione.

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	63 di 68

STUDIO DI MICROZONAZIONE SISMICA DI TERZO LIVELLO

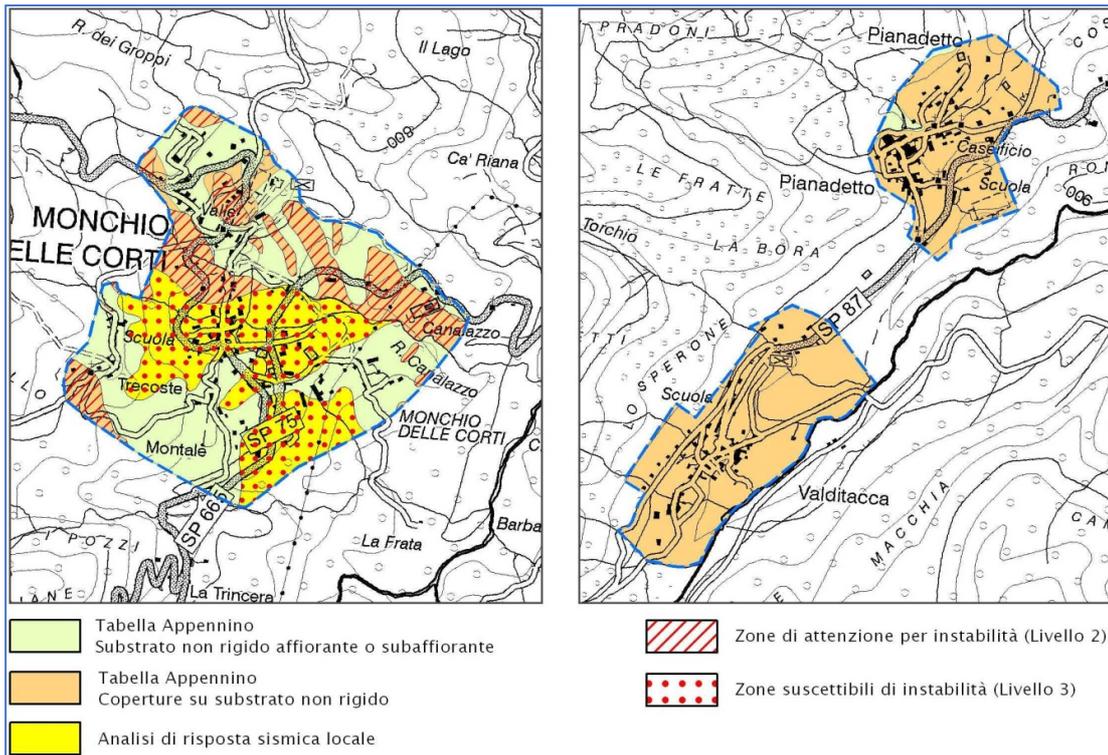


Fig. 49 - Suddivisione delle zone in base alle tabelle allegate alla DGR n. 630/2019 utilizzate per la determinazione dei fattori di amplificazione

Per quanto riguarda le Zone 1 e 2 sono state impiegate le tabelle “Appennino” degli indirizzi regionali riferite alla presenza di substrato marino non rigido con $V_s \ll 800$ m/s affiorante o subaffiorante (Tab. 15).

V_{s30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
PGA					1,9	1,8	1,6	1,4	1,2	1,1

Fattore di Amplificazione **PGA**

V_{s30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
SA1					1,9	1,7	1,6	1,4	1,2	1,1
SA2					1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,3
SA3					1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	1,2

Fattori di Amplificazione **SA1** ($0,1s \leq T \leq 0,5s$), **SA2** ($0,4s \leq T \leq 0,8s$), **SA3** ($0,7s \leq T \leq 1,1s$)

V_{s30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
SI1					1,9	1,7	1,6	1,4	1,3	1,2
SI2					1,5	1,5	1,4	1,4	1,3	1,3

Fattori di Amplificazione **SI1** ($0,1s \leq T \leq 0,5s$), **SI2** ($0,5s \leq T \leq 1,0s$)

Tab. 15 – Tabella da utilizzare per la stima di F.A., in termini di PGA, SA e SI, nel caso di substrato marino non rigido con $V_s \ll 800$ m/s affiorante o subaffiorante (da Allegato 2 degli indirizzi regionali)

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	64 di 68

Per le restanti Zone stabili suscettibili di amplificazioni e per le zone di attenzione per instabilità, sono state impiegate le tabelle degli indirizzi regionali denominate “Appennino”, riferite alla presenza di substrato non rigido ($V_s \ll 800$ m/s”) con sovrastanti depositi di copertura con spessore maggiore di 2,5 metri (Tab. 16).

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

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	2,2	1,8	1,5	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	
10	2,5	2,3	1,9	1,7	1,5	1,4	1,3	1,3	1,2	
15	2,5	2,5	2,2	1,9	1,7	1,5	1,4	1,3	1,2	
20	2,4	2,4	2,3	2,1	1,8	1,6	1,5	1,3	1,3	
25	2,4	2,4	2,3	2,2	2,0	1,7	1,6	1,4	1,3	
30		2,3	2,3	2,2	2,0	1,8	1,6	1,5	1,3	
35		2,2	2,2	2,2	2,1	1,9	1,7	1,5	1,4	1,2
40		2,1	2,1	2,1	2,1	1,9	1,7	1,5	1,4	1,2
50		2,0	2,0	2,0	2,0	1,9	1,7	1,5	1,4	1,2

Fattore di Amplificazione SA1 (0,1s ≤ T ≤ 0,5s)

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

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	2,1	1,7	1,5	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	
10	2,6	2,3	1,9	1,6	1,5	1,4	1,3	1,3	1,3	
15	2,7	2,6	2,3	1,9	1,6	1,5	1,4	1,3	1,3	
20	2,6	2,6	2,4	2,1	1,8	1,6	1,5	1,4	1,3	
25	2,6	2,6	2,5	2,3	2,0	1,7	1,6	1,4	1,3	
30		2,4	2,4	2,3	2,1	1,8	1,6	1,5	1,3	
35		2,4	2,4	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 SII (0,1s ≤ T ≤ 0,5s)

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

Fattore di Amplificazione SII2 (0,5s ≤ T ≤ 1,0s)

Tab. 16 – Tabella da utilizzare per la stima di F.A., in termini di PGA, SA e SI, nel caso di substrato marino non rigido con $V_s \ll 800$ m/s, con sovrastanti depositi di copertura maggiori di 2,5 metri (da Allegato 2 degli indirizzi regionali)

La Tab. 17 riporta i Fattori di Amplificazione determinati secondo la DGR 29 aprile 2019, n. 630 e la Risposta Sismica Locale

MOPS	ZONA	TABELLA F.A.	VS (m/s)	NOTE	FATTORI DI AMPLIFICAZIONE							
					PGA	SA 0,1-0,5S	SA 0,4-0,8S	SA 0,7-1,1S	SA 0,5-1,5S	SI 0,1-0,5 S	SI 0,5-1,0 S	SI 0,5-1,5 S
STAB	2001	Appennino - Substrato affiorante con Vs <<800 m/s	Vs30 = 500	Pianadetto - valditacca	1,4	1,4	1,4	1,3	-	1,4	1,4	-
	2001	Appennino - Substrato con Vs <<800 m/s	Vs30 = 450	Monchio	1,6	1,6	1,5	1,3	-	1,6	1,4	-
	2002	Appennino - Substrato con Vs <<800 m/s	Vs30 = 450		1,6	1,6	1,5	1,3	-	1,6	1,4	-
	2003	Appennino - Substrato con Vs <<800 m/s	Vs10 = 300		1,8	1,7	1,4	1,3	-	1,6	1,4	-
	2004	Appennino - Substrato con Vs <<800 m/s	Vs10 = 350		1,6	1,5	1,4	1,3	-	1,5	1,3	-
	2005	Appennino - Substrato con Vs <<800 m/s	Vs15 = 350		1,8	1,7	1,4	1,3	-	1,6	1,4	-
INSTAB	2010	Appennino - Substrato con Vs <<800 m/s	Vs5 = 250		1,6	1,5	1,4	1,3	-	1,5	1,4	-
	2011	Appennino - Substrato con Vs <<800 m/s	Vs10 = 250		2,0	1,9	1,5	1,4	-	1,9	1,4	-
		RSL	Monchio parcheggio		1,89	1,40	1,07	1,03	1,04	1,35	1,09	1,08
		RSL	Monchio Ciambellino		1,75	1,39	1,08	1,04	1,04	1,34	1,10	1,08
		RSL	Monchio palestra		1,87	1,69	1,27	1,11	1,14	1,68	1,25	1,20

Tab. 17 – Fattori di Amplificazione determinati nel 3° livello

Lo scuotimento atteso al sito in valore assoluto (accelerazione in cm/s^2) è stato espresso attraverso il parametro H, dato dal prodotto dell'Acceleration Spectrum Intensity (ASI), integrale dello spettro di riferimento in accelerazione calcolato per determinati intervallo di periodi, diviso per ΔT e moltiplicato per il fattore di amplificazione in accelerazione (FA) calcolato per lo stesso intervallo di periodi:

$$H = \frac{ASI}{\Delta T} \times FA$$

I valori di ASI sono stati determinati attraverso gli spettri di risposta a pericolosità uniforme in pseudo-accelerazione con T_r pari a 475 anni, riferiti al baricentro di ogni MOPS.

	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	66 di 68

I periodi considerati per la determinazione dello scuotimento atteso sono i seguenti:

- $0,1s \leq T \leq 0,5s \rightarrow H_{sm}$
- $0,4s \leq T \leq 0,8s \rightarrow H_{0,4-0,8s}$
- $0,7s \leq T \leq 1,1s \rightarrow H_{0,7-1,1s}$
- $0,5s \leq T \leq 1,5s \rightarrow H_{0,5-1,5s}$

 Studio di geologia <i>dott. Stefano Castagnetti</i>	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	67 di 68

9. ELENCO ELABORATI

- Relazione illustrativa
- Carta delle indagini in scala 1:5.000
- Carta geologico-tecnica in scala 1:10.000 (Settore Nord e Settore Sud)
- Carta delle frequenze naturali dei terreni in scala 1:5.000
- Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica in scala 1:10.000 (Settore Nord e Settore Sud)
- Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs) in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - FA_{PGA} in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - FA_{SA 0,1 - 0,5 s} in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - FA_{SA 0,4 - 0,8 s} in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - FA_{SA 0,7 - 1,1 s} in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - FA_{SA 0,5 - 1,5 s} in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - FA_{SI 0,1 - 0,5 s} in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - FA_{SI 0,5 - 1,0 s} in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - FA_{SI 0,5 - 1,5 s} in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - H_{SM} in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - H_{0,4 - 0,8 s} in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - H_{0,7 - 1,1 s} in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - H_{0,5 - 1,5 s} in scala 1:5.000

Allegato n° 1 – Indagini integrative

 Studio di geologia dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Gennaio 2020	0	68 di 68