

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

MICROZONAZIONE SISMICA

Relazione illustrativa

Livello 3

Regione Emilia-Romagna

Comune di Toano



Regione	Soggetto realizzatore	Data
Emilia-Romagna	 Dott. Geol. Stefano Castagnetti Collaboratori: Dott. Geol. Marco Baldi  EN GEO S.r.l. ENGINEERING GEOLOGY www.engeo.it	Luglio 2022

INDICE

1.	INTRODUZIONE	1
2.	DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO	3
2.1	INQUADRAMENTO	3
2.2	STORIA SISMICA.....	7
2.3	CLASSIFICAZIONE SISMICA.....	9
3.	ASSETTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO	12
3.1	GEOLOGIA	12
3.2	GEOMORFOLOGIA.....	24
4.	DATI GEOTECNICI E GEOFISICI	28
4.1	ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DEI DATI	28
5.	MODELLO DEL SOTTOSUOLO.....	29
6.	METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI	30
7.	ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE.....	32
7.1	Modello geofisico del sottosuolo	33
7.1.1	Litologia	33
7.2	Procedura di analisi RSL.....	40
7.3	Analisi dei risultati	45
8.	STABILITÀ DI VERSANTE	54
8.1	Metodo di verifica.....	54
8.2	Ipotesi verificate.....	57
9.	ELABORATI CARTOGRAFICI	62
9.1	Carta delle indagini	62
9.2	Carta geologico-tecnica per microzonazione sismica.....	63
9.3	Carta delle frequenze naturali dei terreni.....	66
9.4	Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica.....	67
9.5	Carta delle velocità delle onde di taglio S.....	73
9.6	Carte di microzonazione sismica	74
10.	ELENCO ELABORATI.....	83

Allegato n° 1 – Indagini integrative

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 Toano (Provincia di Reggio Emilia), effettuato a seguito di incarico professionale di cui alla Determinazione Dirigenziale n° 97 del 26/04/2021 (CUP: F72J20002260006 – CIG: Z9F316BF37) e finanziato con contributi derivanti dall'OCDPC n. 675 del 12 maggio 2020 "Disciplina delle risorse non utilizzate o oggetto di revoca di cui alle ordinanze 3907/2010, 4007/2012, 53/2013, 171/2014, 293/2015, 344/2016 e 532/2018 di attuazione dell'articolo 11 del decreto-legge 28 aprile 2009, n. 39, convertito, con modificazioni, dalla legge 24 giugno 2009, n. 77" e assegnati al Comune di Toano con Determinazione Dirigenziale n° 21384 del 27/11/2020.

Il Comune di Toano è dotato di uno studio di Microzonazione Sismica di Livello 2 realizzato nel giugno 2020 dallo scrivente professionista.

Tale studio venne finanziato con i contributi di cui alla OCDPC 344/2016 e alla D.G.R. 2188/2016 e al D.D. 20804/2017. Lo studio è stato validato dalla riunione della Commissione Tecnica per il monitoraggio degli studi di microzonazione sismica del 17/12/2020 e conseguentemente certificato dalla Regione Emilia-Romagna.

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:

- D.G.R. n° 476 del 12.04.2021 aggiornamento Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, L.R. n. 24/2017);
- D.G.R. n° 564 del 26.04.2021 "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)";
- "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

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	1 di 83

16.12.2013 “Approvazione dei criteri per gli studi di microzonazione sismica ed assegnazione dei contributi di cui all'Ordinanza del Capo Dipartimento della Protezione Civile n. 52/2013 a favore degli Enti Locali” (Allegato D della DGR);

- “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 (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.

L'approfondimento di Livello 3 è stato svolto su un'area interessata da un esteso corpo di frana, in parte quiescente ed in parte attivo, situata nella frazione di Cavola, individuata di concerto con l'Ufficio Tecnico Comunale di Toano.

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 4.2.

Per l'inserimento dei dati alfanumerici dei siti, delle indagini e dei parametri è stato utilizzato l'apposito software: “MS - SoftMS”, versione 4.2.

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	2 di 83

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

2.1 INQUADRAMENTO

Il Comune di Toano appartiene alla Regione Emilia-Romagna e ricade nella fascia di alta montagna della Provincia di Reggio Emilia (Fig. 1).



Fig. 1 - Ubicazione del Comune di Toano

Gli studi sulla pericolosità sismica, promossi dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), hanno portato alla definizione di una nuova zonazione sismogenetica del territorio italiano, denominata "ZS9", che prevede una suddivisione in 36 zone (Fig. 2), i cui limiti sono stati tracciati sulla base di informazioni tettoniche, geologico – strutturali e/o di differenti caratteristiche della sismicità (distribuzione spaziale, frequenza degli eventi, massima magnitudo rilasciata, ecc.).

Essa risulta estremamente importante per gli studi pianificazione territoriale ed, in particolare, nelle valutazioni di pericolosità sismica.

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	3 di 83

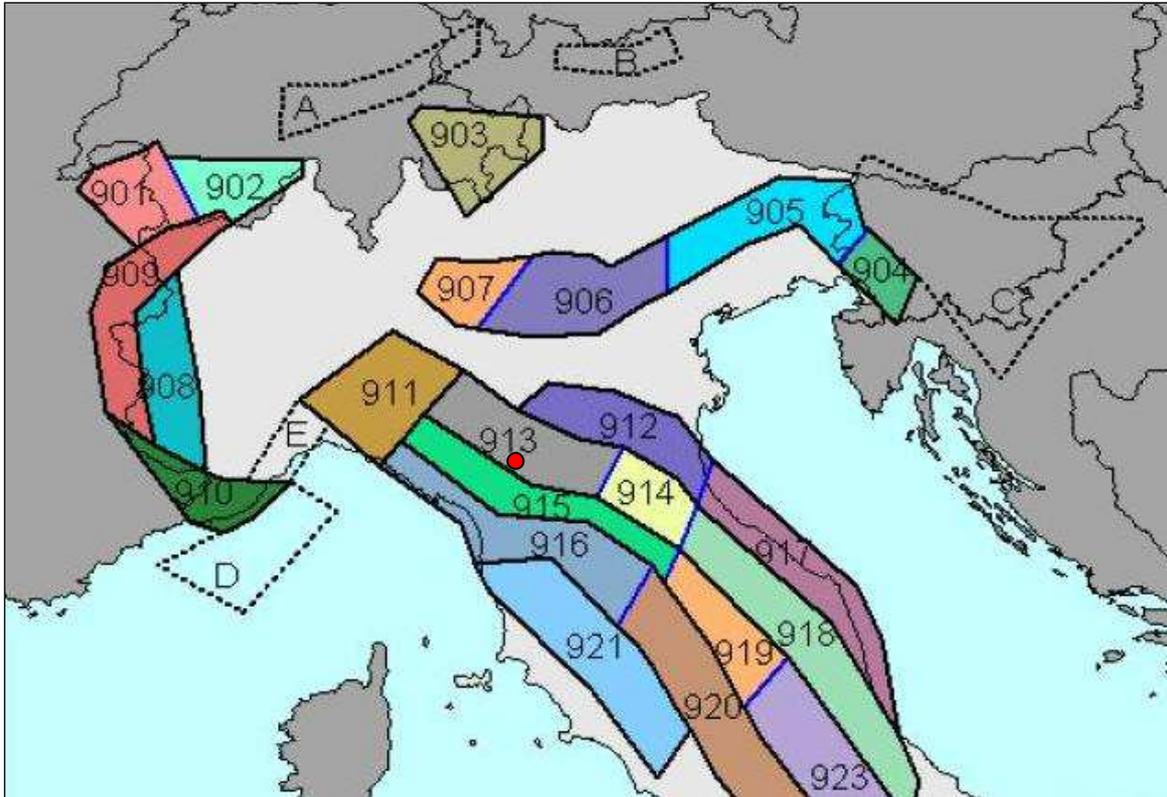


Fig. 2 – Zonazione sismogenetica ZS9 (Tratta da: “Redazione della Mappa di Pericolosità Sismica – Rapporto conclusivo – bozza aprile 2004” - INGV). Il punto rosso segna approssimativamente il Comune di Toano.

Il territorio comunale di Toano ricade nei pressi del limite meridionale della zona sismogenetica “913”, che è caratterizzata da movimenti prevalentemente compressivi in direzione NW e da meccanismi trascorrenti nelle zone di svincolo, che interrompono la continuità longitudinale delle strutture attive. Il maggior numero di terremoti che si verificano in questa zona, presenta il proprio ipocentro a profondità comprese tra 12 e 20 km e i valori di magnitudo massima previsti, sulla base dei meccanismi focali, sono pari a $M_{wmax} = 6,14$.

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).

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	4 di 83

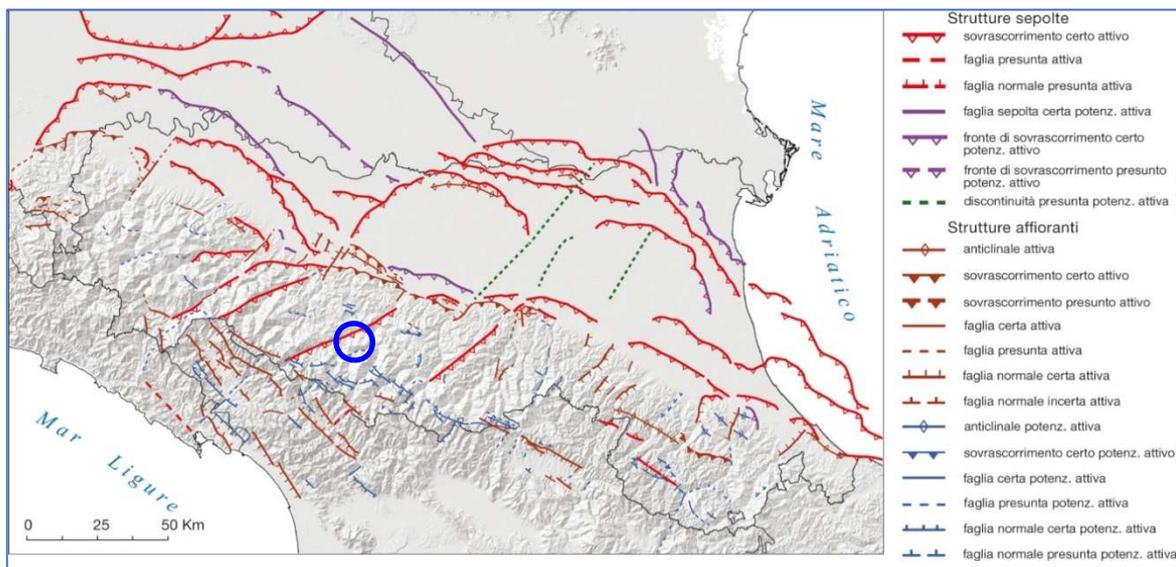


Fig. 3 - Mappa di sintesi delle strutture tettoniche attive e potenzialmente attive riconosciute in Emilia-Romagna (da: "Note illustrative della Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna ed aree limitrofe" - Servizio Geologico Sismico e dei Suoli - Regione Emilia-Romagna, 2017)

Le sorgenti sismogenetiche e le faglie potenzialmente attive e capaci, interessanti il territorio comunale di Toano, sono state ricavate dal *Database of Individual Seismogenic Sources* (DISS) dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), Version 3.3.0 <https://doi.org/10.13127/diss3.3.0>, 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 Fig. 4, le sorgenti sismogenetiche prossime all'area in studio sono:

- **ITCS026 – Lunigiana** (sorgente composta) con una magnitudo massima attesa $M_w = 7,0$ con la relativa sorgente individuale **ITIS-085 Pontremoli**
- **ITCS046 – Langhirano-Sassuolo** (sorgente composta) con magnitudo massima attesa $M_w = 6,8$ e con la relativa sorgente individuale **ITIS-085 Pontremoli**

¹ Gruppo di lavoro DISS (2021). Database delle singole sorgenti sismogenetiche (DISS), versione 3.3.0: una raccolta di potenziali sorgenti per terremoti superiori a M 5.5 in Italia e nelle aree circostanti. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/diss3.3.0>.

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	5 di 83

STUDIO DI MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO 3

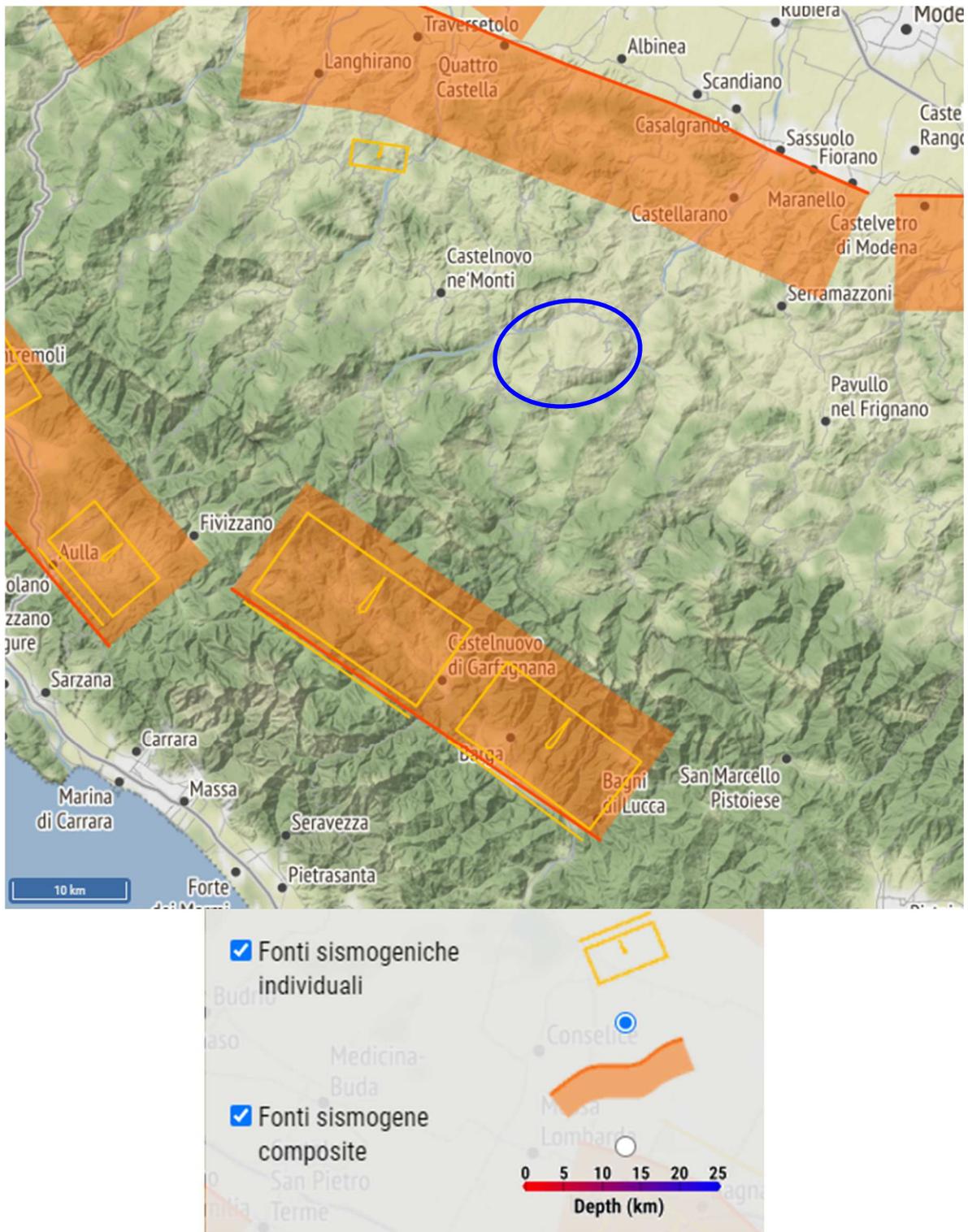


Fig. 4 - Ubicazione delle sorgenti sismogenetiche da DISS 3.3.0. Il cerchio blu individua approssimativamente il territorio del Comune di Toano

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	6 di 83

2.2 STORIA SISMICA

La storia sismica del Comune di Toano è stata desunta dal Database Macrosismico Italiano, versione DBMI15 v4.0, che contiene informazioni relative a 123.981 osservazioni macrosismiche dall'anno 1000 al 2020 relative a 3229 terremoti.

DBMI15 v2.0 Fornisce un set omogeneo di intensità macrosismiche provenienti da diverse fonti relativo ai terremoti con intensità massima ≥ 5 e d'interesse per l'Italia nella finestra temporale 1000-2017.

Secondo quanto riportato in DBMI15 v4.0, la storia sismica di Corniglio è riassunta graficamente nel diagramma riportato in Fig. 5, mentre in Tab. 1 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).

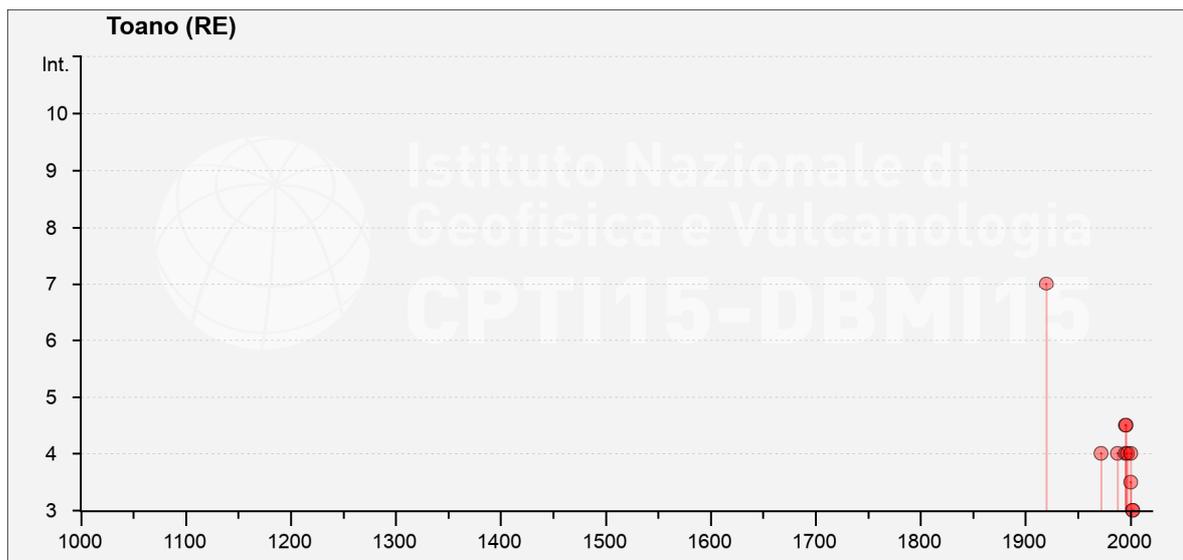


Fig. 5 – Eventi sismici di maggior intensità registrati nel Comune di Toano. Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Antonucci A. (2022). Database Macrosismico Italiano (DBMI15), versione 4.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/DBMI/DBMI15.4>

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	7 di 83

STUDIO DI MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO 3

Effetti	In occasione del terremoto del									
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
7	1920	09	07	05	55	4	Garfagnana	750	10	6.53
4-5	1995	12	31	21	29	4	Appennino reggiano	96	4-5	4.51
4-5	1996	10	15	09	55	5	Pianura emiliana	135	7	5.38
4	1972	10	25	21	56	1	Appennino settentrionale	198	5	4.87
4	1988	02	08	11	24	4	Garfagnana	75	6	4.34
4	1995	10	10	06	54	2	Lunigiana	341	7	4.82
4	1997	12	24	17	53	1	Garfagnana	98	5	4.33
4	2000	10	03	01	12	3	Frignano	62	5	4.22
3-4	2000	06	18	07	42	0	Pianura emiliana	304	5-6	4.40
3	2002	06	08	20	13	0	Frignano	115	4	4.23
3	2002	06	18	22	23	3	Frignano	186	4	4.30
2-3	1987	05	02	20	43	5	Reggiano	802	6	4.71
2	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	1989	10	03	09	41	3	Appennino parmense	91	4	4.04

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 Toano tra il 1000 ed il 2020. Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Antonucci A. (2022). Database Macrosismico Italiano (DBMI15), versione 4.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/DBMI/DBMI15.4> - parzialmente modificato)

Dall'analisi di Fig. 6 e Tab. 1 si evidenzia che il massimo evento sismico censito e osservato a Toano si è verificato il 07 Settembre 1920 con un'intensità al sito del VII-VIII grado della scala MCS.

Dai documenti ufficiali e dalle notizie di cronaca si evince che in Comune di Toano il terremoto danneggiò varie abitazioni, ma non furono registrate vittime.

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	8 di 83

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 Toano è stato classificato sismico in ZONA 2. In precedenza, sotto il profilo della normativa sismica, il Comune di Toano risultava classificato in seconda categoria.

Con la DGR n° 1164/2018 "*Aggiornamento della classificazione sismica di prima applicazione dei comuni dell'Emilia-Romagna*", il Comune di Toano è stato confermato sismico in ZONA 2 (Fig. 6).

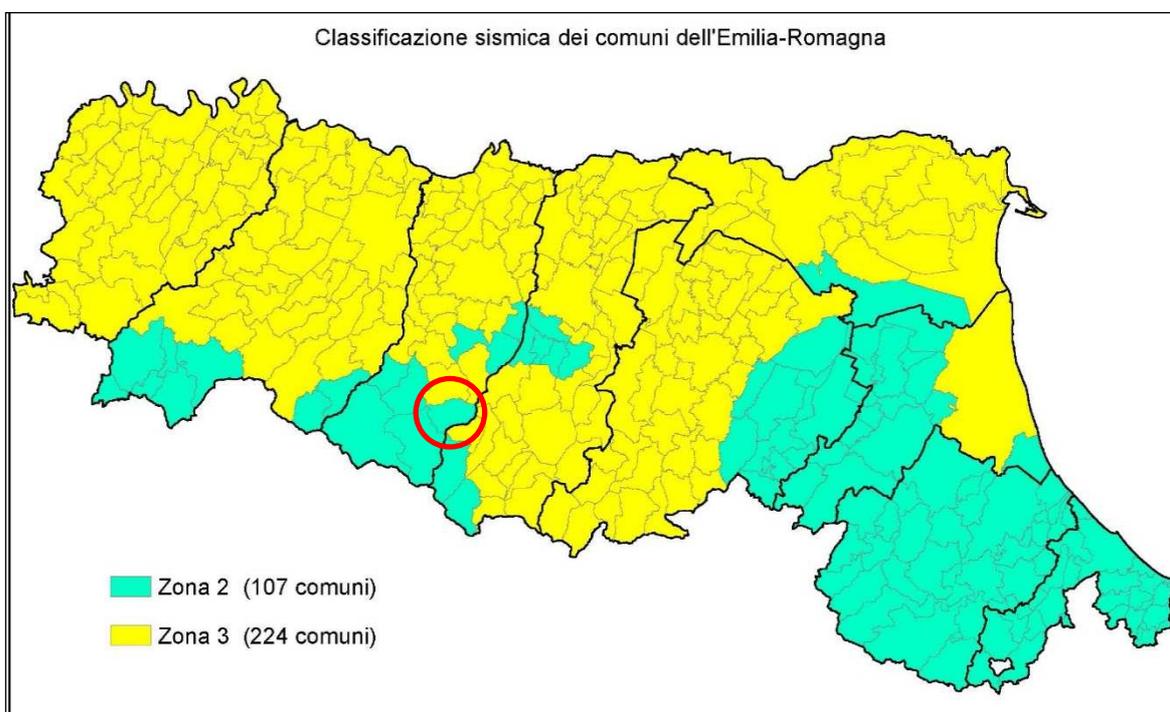


Fig. 6 - Classificazione sismica dell'Emilia-Romagna di cui alla DGR 1164 del 23.07.2018. Regione Emilia-Romagna. Il cerchio rosso individua il Comune di Toano

Sulla base della *Mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale* elaborata dall'INGV (aprile 2004), il territorio di Toano si colloca in un areale in cui si possono verificare terremoti caratterizzati da un'accelerazione massima del suolo compresa tra $0,150 \div 0,175 a_g$ (Figg. 7 e 8).

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	9 di 83

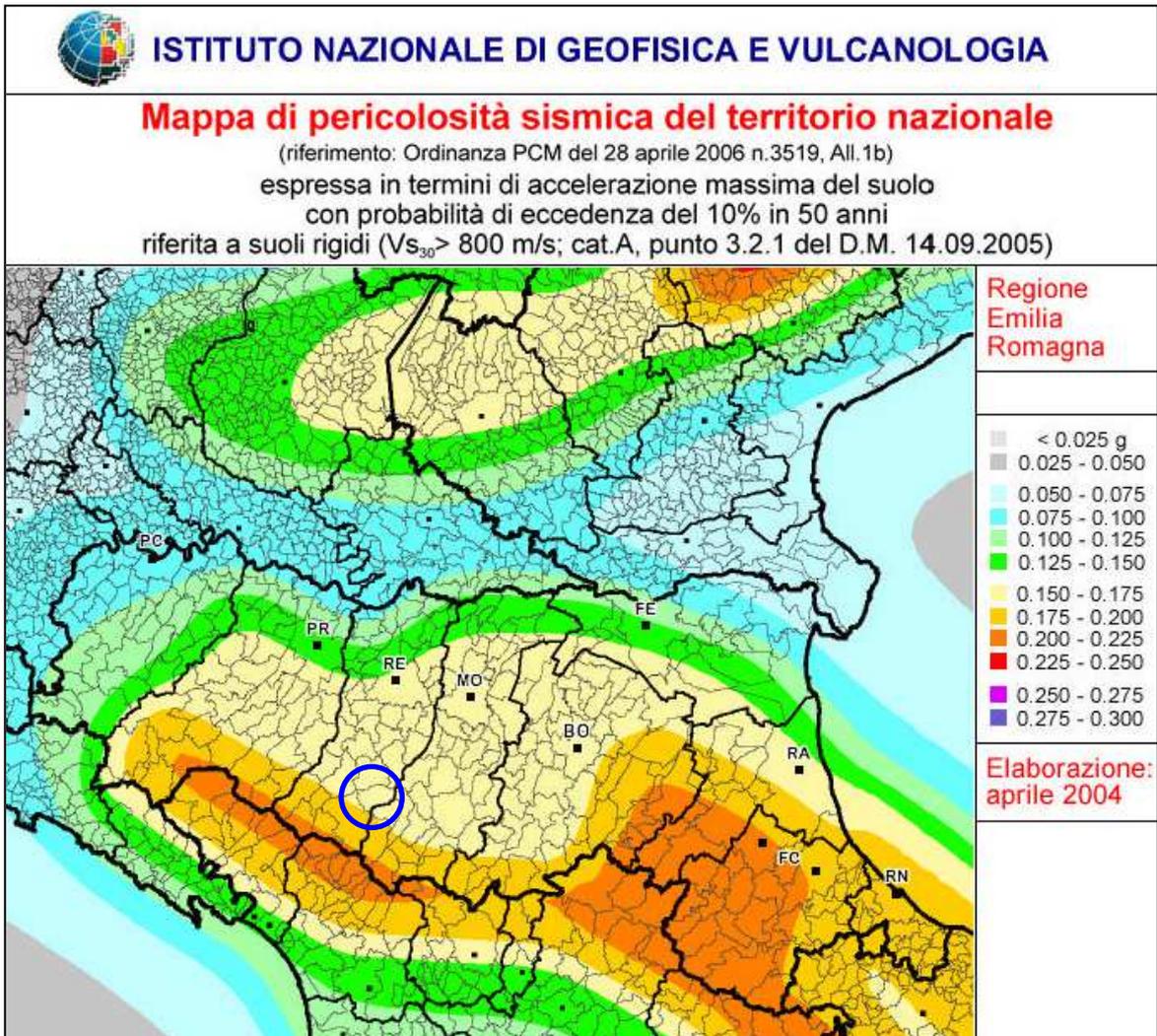


Fig. 7 - Estratto della Mapa di pericolosità sismica del territorio nazionale. Il cerchio di colore blu individua il Comune di Toano

STUDIO DI MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO 3

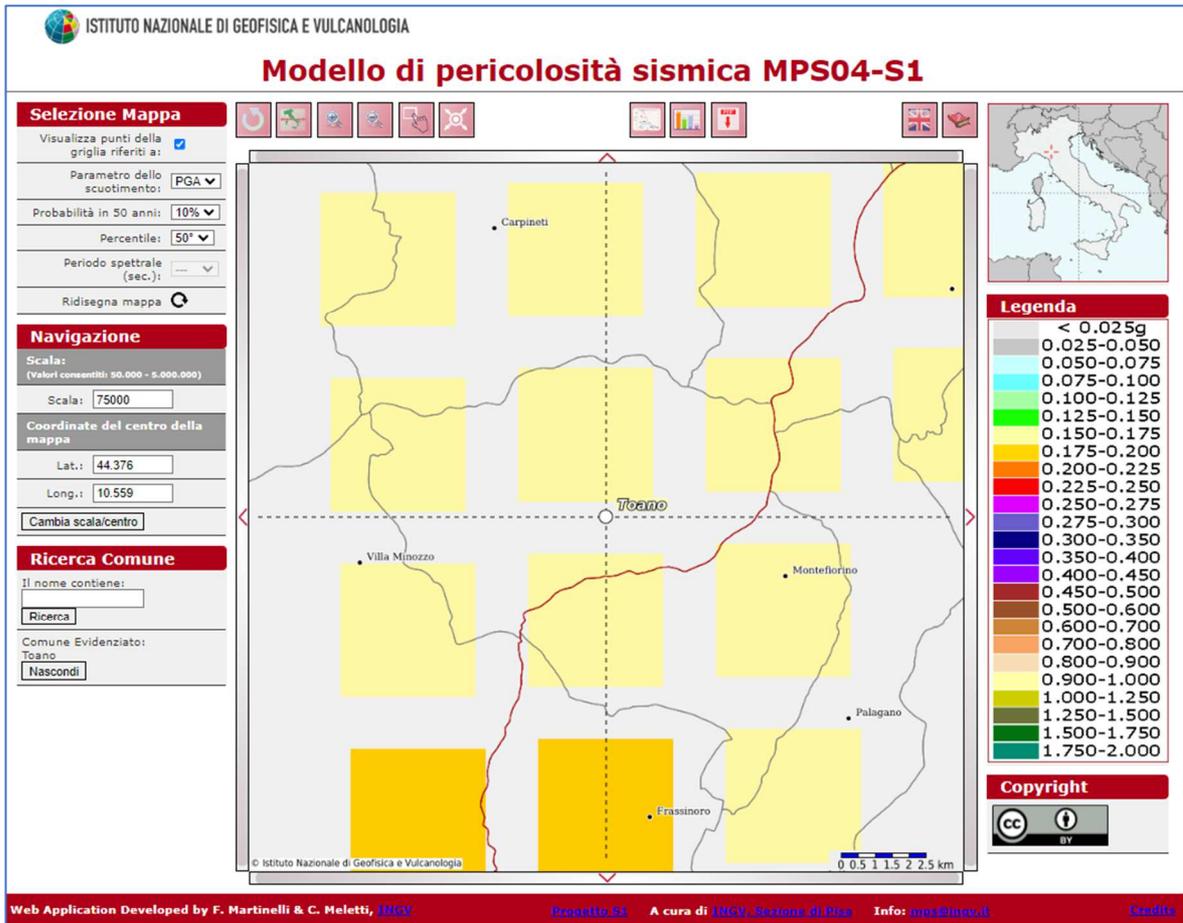


Fig. 8 - Stralcio della Mappa di pericolosità sismica del Comune di Toano espressa in termini di a(g) per un Tempo di ritorno di 475 anni

 <p>Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti</p>	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	11 di 83

3. ASSETTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO

3.1 GEOLOGIA

L'assetto geologico-strutturale della catena montuosa nord-appenninica si può sinteticamente interpretare come un complesso impilamento di unità tettoniche che si generarono in seguito alla collisione della microplacca continentale, costituita dal blocco sardo-corso e dal Tirreno settentrionale, contro il margine della microplacca adriatica (Adria). Quest'ultimo, in seguito a questa collisione andò in subduzione verso ovest e le sue coperture sedimentarie furono "sradicate" dalla sottostante litosfera adriatica, generando una catena orogenica a falde di ricoprimento est-vergenti.

L'edificio strutturale a falde appenninico è molto simile, in questo senso (Principi e Treves, 1984), ai classici "prismi di accrezione" che in tutto il mondo si sono generati nelle aree di convergenza e di collisione di placche dove, per i molteplici scollamenti e "piallamenti" della copertura sedimentaria della crosta oceanica o continentale del margine di placca in subduzione si venne a formare, per successivi incrementi, una catena montuosa di tipo *fault and thrust belt*.

La storia appenninica è complicata dal fatto che una parte delle successioni rocciose che parteciparono all'orogenesi appenninica erano già state precedentemente coinvolte nell'orogenesi alpina che aveva portato nel Cretacico superiore - Eocene medio alla chiusura per subduzione dell'Oceano Ligure-Piemontese (Tetide), allo sradicamento delle successioni sedimentarie di origine marina che ne ricoprivano i fondali e alla loro traslazione, come falde di ricoprimento, verso la placca Europea. La successiva apertura nel mediterraneo occidentale, del bacino ligure-provenzale, cambiò l'assetto geodinamico dell'area e portò ad una progressiva rotazione antioraria del blocco continentale sardo-corso, spingendo una parte delle unità liguri-piemontesi verso NE.

Dall'Eocene superiore in avanti, questi terreni furono ripresi nella orogenesi appenninica e spinti ulteriormente verso nord-est attraverso estesi sovrascorrimenti, generando le Unità Liguri che oggi conosciamo, e andando ad accavallarsi su unità, più recenti ed esterne, che in origine costituivano la copertura sedimentaria del margine continentale occidentale della placca adriatica (Fig. 9).

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	12 di 83

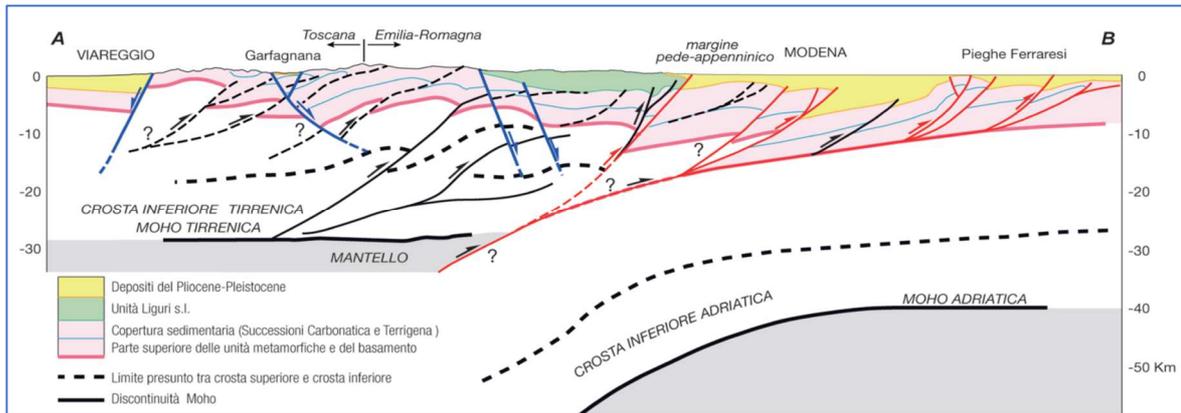


Fig. 9 – Ricostruzione geologica dell'edificio strutturale appenninico tra il Tirreno e l'Adriatico. Da notare (in verde) la posizione sommitale delle Unità Liguri (da Note illustrative della Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna ed aree limitrofe (2017)

Le Unità Liguri sono unità tettoniche peculiari perché alla base delle successioni sedimentarie che le compongono, sono spesso contenute rocce ofiolitiche (serpentiniti) che testimoniano la loro sedimentazione su un originario substrato di tipo oceanico, scomparso a causa della subduzione. Inoltre, tutte le unità di tipo ligure sono composte nella loro porzione sommitale da spesse successioni di torbiditi calcareo-marnose (*flysch*) di età Cretacico superiore - Paleocene.

L'insieme Liguride è stato suddiviso in un dominio interno e in uno esterno e in diverse unità tettoniche indipendenti in base alle loro caratteristiche litologiche, di età e di posizione strutturale reciproca. Nell'area di interesse del presente studio affiorano solamente le due formazioni appartenenti all'Unità di Monghidoro: la Formazione di M. Venere (Cretacico sup.) e la Formazione di Monghidoro (Paleocene).

Nelle sue prime fasi, l'evoluzione orogenica della catena appenninica ebbe inizio su un fondale marino irregolare ed articolato (con depressioni locali), a causa del coinvolgimento nell'orogenesi alpina, e sul quale, durante la nuova orogenesi, continuò la sedimentazione (in discordanza) sulle Unità Liguri in gran parte già corrugate. Man mano che il fronte di sovrascorrimento avanzava, sulle unità in via di traslazione si deposero dei terreni che per la loro posizione sono stati definiti Successione Epiligure.

Come si può osservare schematicamente in Fig. 9, nell'edificio strutturale appenninico, in posizione geometrica più elevata si trovano le unità alloctone più antiche, appartenenti al Dominio Ligure, mentre sotto di esse andarono, via via, a sottoscorrere (come in un "nastro trasportatore parzialmente inceppato") unità tettoniche scollate e dislocate in tempi progressivamente più recenti dalla copertura sedimentaria del margine continentale adriatico, che stava andando in subduzione. La catena appenninica venne,



quindi, “costruita dal basso” attraverso successivi scatti incrementali legati ai sottoscorrimenti delle unità tettoniche che, via via, si andarono individuando, mentre le unità liguri al loro tetto, posto sul fondale marino, continuavano a ricevere la deposizione della successione epiligure, che subì solo variazioni batimetriche man mano che il sottostante prisma di accrezione cresceva.

Sul margine in subduzione, si individuarono per prime le unità tettoniche appartenenti al cosiddetto Dominio Toscano: una successione, carbonatica e poi pelagica ed emipelagica potente complessivamente alcune migliaia di metri e con età compresa tra il Trias superiore e l'Oligocene. La parte sommitale, di età oligo-miocenica della serie toscana, denominata “Macigno”, è una successione di torbiditi silicoclastiche di mare profondo, spesso più di 1500 m, che viene interpretata come il riempimento clastico della prima grande avanfossa appenninica.

Nella terminologia della Tettonica delle Placche, l'avanfossa è una depressione morfologica stretta e allungata che si forma nelle zone di subduzione, all'esterno della *fault and thrust belt* ed è causata in parte dal carico litostatico della nuova catena in formazione e, prevalentemente, dall'inflessione della litosfera che viene trascinata in sottoscorrimento. Poiché l'avanfossa della catena appenninica si venne a trovare molto vicina alla catena alpina, che nell'Oligocene superiore era in forte sollevamento ed intensamente sottoposta a processi erosivi, sul margine costiero meridionale delle Alpi si accumularono immense quantità di detriti, che poi vennero riversati nell'avanfossa appenninica attraverso estesi processi di risedimentazione gravitativa generando la successione torbiditica del Macigno.

Successivamente, dal margine continentale adriatico si individuò un'altra grande unità tettonica (Unità Cervarola), formata da una complessa ed articolata successione torbiditica d'avanfossa di difficile ricostruzione, perché oggi scomposta in una serie di sub-unità costituite da spesse successioni torbiditiche di facies, composizione ed età sommitali differenti e di cui, spesso, non affiora la base pre-torbiditica. Inoltre, la geometria d'insieme dei corpi torbiditici del Cervarola e la presenza al loro interno di numerosissime sismo-torbiditi porta a pensare all'esistenza una forte attività tettonica sin-depositazionale.

Per questa ragione le sotto-unità più esterne del Cervarola sono ancora oggetto di dibattito scientifico tra gli esperti che le attribuiscono, a seconda delle scuole di pensiero, ad un dominio indipendente o al cosiddetto Dominio Umbro-Marchigiano-Romagnolo (un dominio ancora più esterno e che, però, è conosciuto bene solo a SE della trasversale del

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	14 di 83

torrente Sillaro, tra Bologna e Forlì). Altri autori parlano di Unità Padano-Adriatiche per definire le unità tettoniche più esterne a quelle del Cervarola.

Indipendentemente dall'attribuzione, queste unità tettoniche sono le più basse nell'edificio strutturale appenninico e, proprio per questo, non appaiono quasi mai in superficie e sono conosciute soltanto dallo studio delle linee sismiche profonde e dai dati dei pozzi per la ricerca di idrocarburi.

La complessità dell'edificio strutturale della catena appenninica è schematizzata in Fig. 10.

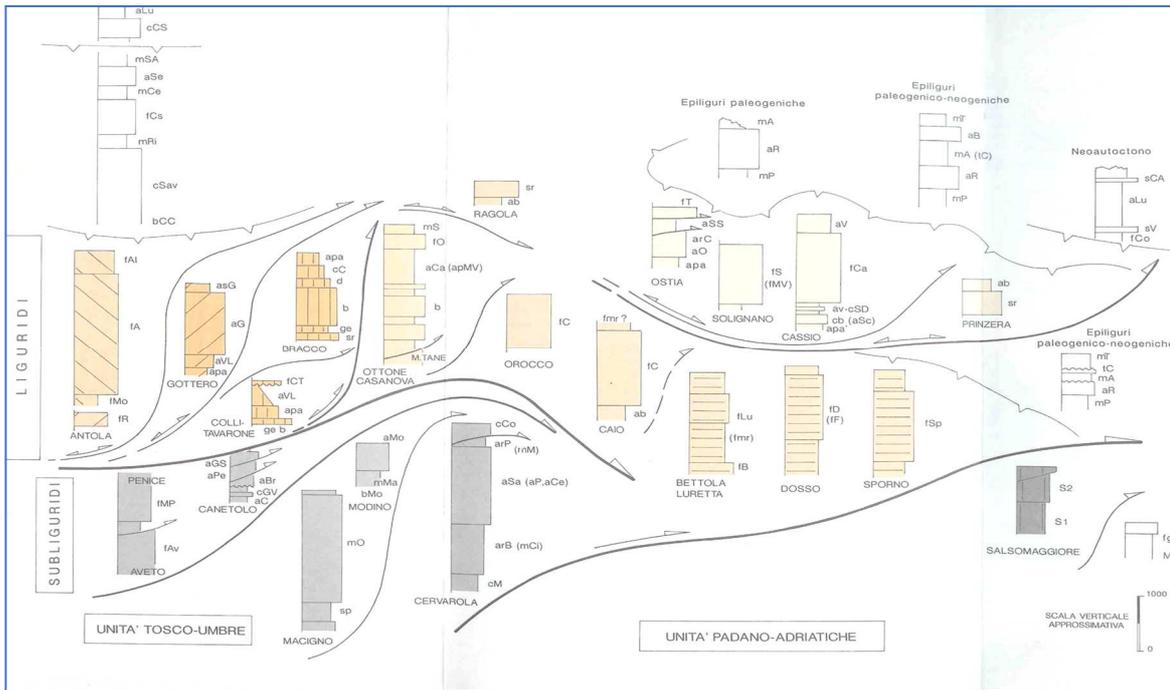


Fig. 10 – Schema dell'impilamento strutturale della porzione di Appennino in esame (da Guide geologiche regionali: Appennino Ligure-Emiliano (Vol. 6)

Occorre precisare che tra le unità liguri e quelle toscane in realtà si trova interposto un sottile livello di terreni prevalentemente argillitici e calcarei, ma contenenti anche limitate successioni torbiditiche, che è stato attribuito ad un dominio di transizione definito Sub-Ligure a causa della sua attuale posizione tettonica.

La complessità dell'edificio strutturale appenninico è il risultato di una lunghissima storia tettonica, nella quale quanto più precoce è stata la strutturazione, tanto più rapida è stata la perdita di significato paleogeografico e di identità deposizionale.

Le fasi di questa storia possono essere raggruppate in tre cicli orogenici (Elter, 1973): il primo comprende le Fasi Liguri che hanno interessato esclusivamente l'insieme Interno, prima che si verificasse la sua traslazione sull'avampese toscano, e si conclude

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	15 di 83

Fig. 11 – Schema geologico semplificato dell'area appenninica compresa tra la val Secchia e la val Panaro, con ubicazione del Comune di Toano (riquadro giallo). Estratto dalla Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e zone limitrofe (2017)

La successione affiorante nella finestra tettonica di Gova presenta facies particolari. Si tratta di una sequenza di strati arenacei medi e spessi, tra loro fittamente amalgamati, potente complessivamente almeno 400-450 m. Le datazioni cronologiche più recenti di questa successione torbiditica eseguiti con l'analisi dei nanno-fossili calcarei hanno mostrato un'età attribuibile al Burdigaliano Sup. - Langhiano Inf. facendo esprimere ad alcuni autori la possibilità che si tratti di un'unità appartenente al Dominio Umbro-Marchigiano-Romagnolo.

Nella carta sismotettonica (Fig. 11) si può notare come l'area del Comune di Toano sia compresa tra due principali lineamenti tettonici. Quello più meridionale è una faglia, parzialmente attiva, che corre lungo il corso del torrente Dolo tra Quara e Rubbiano. Questa faglia costituisce il limite settentrionale della finestra tettonica di Gova e mette a contatto la successione torbiditica burdigaliano-langhiana dell'Unità Cervarola con il Flysch di Monte Venere dell'unità di Monghidoro. Lungo questa faglia viene mostrato in carta la presenza di un allineamento di salse e venute di gas metano.

Il secondo lineamento tettonico, quello più settentrionale, viene interpretato come un fronte di sovrascorrimento sepolto presunto, che metterebbe a contatto l'unità delle Evaporiti triassiche della Val Secchia con la sottostante unità torbiditica miocenica del Cervarola, affiorante nella finestra tettonica di Cerreto d'Alpi. A Nord di Collagna e Busana l'unità evaporitica dei Gessi della Val Secchia viene, a sua volta, ricoperta dalla successione "epi-subligure" di M. Modino (zona di M. Ventasso). La stessa successione ricopre tettonicamente, direttamente, le torbiditi mioceniche emergenti in Val Dolo nelle finestre tettoniche di Gazzano e Gova.

In Fig. 12 viene mostrato il tracciato di una sezione geologica che partendo dall'area di Frassinoro attraversa l'intero comune di Toano dove affiorano prevalentemente i terreni liguridi appartenenti all'unità Monghidoro. Nei pressi di Cavola la sezione prosegue verso Nord intersecando i terreni della successione epiligure presenti nella "placca" di Felina-Carpineti.

La sezione ci fa capire l'inquadramento geologico dell'area di Toano in un contesto regionale a respiro più ampio. Il profilo geologico qui presentato è stato costruito mettendo insieme parti di due sezioni geologiche presenti rispettivamente nei Fogli 218 e 235 della

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	17 di 83

Arenacea umbro-romagnola. Ognuna di queste successioni torbiditiche d'avanfossa mostra uno spessore complessivo che va dai 1500 ai 3000 m.

La parte centrale della sezione di Fig. 13 mostra le strutture plicative che hanno deformato la Formazione di M. Venere (MOV). Essa si presenta prevalentemente a giacitura diritta ma, sul suo lato interno, è presente un piccolo elemento strutturale a polarità inversa, che si raccorda con quello, mostrante giacitura rovesciata, disegnato nella limitrofa Sezione B del F° 235. Questa scaglia inversa ricopre, in sovrascorrimento, le Argille a Palombini (APA) dell'Unità Ofiolitica della Val Baganza, che sono sovrascorse sulle Marne di Marmoreto (MMA) dell'unità Modino. Quest'ultime, a loro volta, ricoprono le arenarie mioceniche presenti nella finestra tettonica di Gova.

Dall'altro lato della placca di flysch di M. Venere è mostrato un locale accavallamento per faglia inversa sulla successione epiligure. Tale faglia inversa è cartografata nella sezione A del F° 218, ma nella stessa sezione si vede che, a partire dal F. Secchia in avanti, la successione epiligure ricopre in discordanza la Formazione di M. Venere. Probabilmente la faglia inversa qui descritta è legata ad una locale ripresa del movimento lungo il grande sovrascorrimento sepolto descritto in Fig. 12 nella Carta strutturale della Regione Emilia-Romagna, alla base delle evaporiti triassiche della Val Secchia.

La grande placca di flysch ligure presente nell'area di Toano è costituita prevalentemente dalla Formazione di M. Venere, una successione torbiditica campaniano-maastrichtiana, spessa alcune centinaia di metri, con facies arenaceo-pelitica a strati medi e sottili ma che contiene numerose megatorbiditi pluri-metriche arenaceo-marnose. In letteratura geologica si è descritta la similitudine di questa formazione con il Flysch di Solignano presente in Val Taro, nell'Appennino parmense.

Nella area del Castello di Toano si può notare come il MOV faccia transizione, verso l'alto, ad una successione torbiditica silicoclastica (ma sono presenti calcareniti) a strati spessi e molto spessi di età terziaria (Paleocene inferiore). Essa è stata denominata Formazione di Monghidoro (MOH).

Lo stato deformativo, in aggiunta all'assetto lito-stratigrafico delle compagini rocciose, costituiscono i fattori geologici fondamentali che influiscono sulla risposta sismica dei terreni, in termini di amplificazione e velocità di propagazione delle onde S.

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	19 di 83

Pertanto, alla base degli studi di microzonazione sismica non deve mai mancare un'attenta ed approfondita analisi degli aspetti geologico-morfologici generali e di dettaglio delle aree in esame.

Il territorio in esame costituisce uno spaccato significativo ed esplicativo della struttura a falde costituente la catena appenninica: in esso, infatti, possiamo individuare prevalentemente le unità liguri alloctone sovrascorse (Flysch Cretacico superiore di M. Venere e la sovrastante Formazione di Monghidoro, che arriva ad avere un'età paleocenica inferiore) e i terreni della Successione Epiligure.

Di seguito sono descritte le formazioni affioranti nel territorio comunale di Toano, seguendo la distinzione operata nelle Carte Geologiche dell'Appennino Emiliano – Romagnolo, alla scala 1:10.000, realizzate dalla Regione Emilia-Romagna nell'ambito del Progetto CARG (Fig. 13).

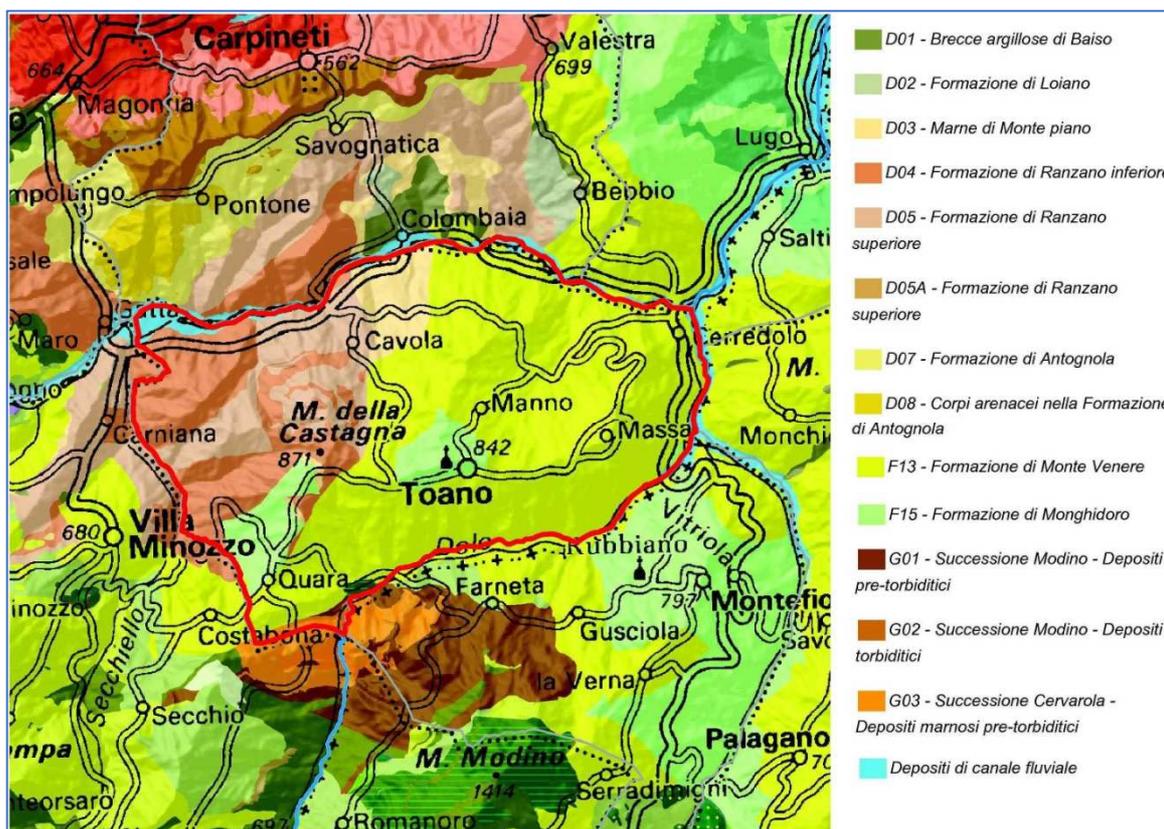


Fig. 13 - Inquadramento geologico schematico del Comune di Toano (Progetto CARG della Regione Emilia – Romagna, Servizio Geologico e Sismico dei Suoli)

L'analisi delle unità trattate è di tipo schematico e limitata alle principali caratteristiche petrografiche e giaciture, al fine di definire le proprietà geomeccaniche di resistenza caratteristiche di tali rocce.

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	20 di 83

Le unità tettonico-sedimentarie presenti nel territorio comunale di Toano sono state raggruppate nelle seguenti classi:

- Depositi Quaternari Continentali;
- Successione Neogenico – Quaternaria del margine appenninico – padano;
- Successione epiligure
- Unità liguri
- Unità ultratoscane (cfr. F°235 della *Carta Geologica d'Italia*)
- Unità Cervarola
- Unità umbro-marchigiano-romagnola.

Depositi Quaternari Continentali

- **a1 – Depositi di Frane attive:** Deposito gravitativo con evidenze di movimenti in atto (indipendentemente dalla entità e dalla velocità degli stessi). L'attività può essere continua o, più spesso, intermittente ad andamento stagionale o pluriennale. Vengono inclusi in questa categoria anche depositi di frane che al momento del rilevamento non presentano sicuri segni di movimento ma che denotano comunque una recente attività segnalata da indizi evidenti (lesioni a manufatti, assente o scarsa vegetazione, terreno rimobilizzato) all'occhio del tecnico rilevatore. Sono altresì incluse anche frane con velocità recepibile solo attraverso strumenti di precisione (inclinometri, estensimetri, ecc.), qualora esistenti.
- **a2 – Depositi di frana quiescente:** Deposito gravitativo senza evidenze di movimenti in atto o recenti. Generalmente si presenta con profili regolari, vegetazione con grado di sviluppo analogo a quello delle aree circostanti non in frana, assenza di terreno smosso e assenza di lesioni recenti a manufatti, quali edifici o strade. Per queste frane sussistono oggettive possibilità di riattivazione poiché le cause preparatorie e scatenanti che hanno portato all'origine e all'evoluzione del movimento gravitativo non hanno, nelle attuali condizioni morfoclimatiche, esaurito la loro potenzialità. Sono quindi frane ad attività intermittente con tempi di ritorno lunghi, generalmente superiori a vari anni. Rientrano in questa categoria anche i corpi franosi oggetto di interventi di consolidamento, se non supportati da adeguate campagne di monitoraggio o da evidenze di drastiche modifiche all'assetto dei luoghi.
- **a3 - Deposito di versante:** Accumulo di detrito su versante sulla cui attribuzione genetica permane un grado di incertezza, non escludendo che sia dovuto a fenomeni franosi, mancando spesso i caratteri di forma tipici delle frane stesse. Solo una indagine più approfondita del semplice rilevamento sul terreno potrebbe chiarire la natura dei processi che hanno generato il deposito. Generalmente l'accumulo si presenta con una tessitura costituita da clasti di dimensioni variabili immersi e sostenuti da una matrice pelitica e/o sabbiosa (che può essere alterata per ossidazione e pedogenesi), solo localmente stratificato e/o cementato. Come indicato sopra la genesi può essere gravitativa, da ruscellamento superficiale, da soliflusso.
- **a4 - Deposito eluvio-colluviale:** Coltre di materiale detritico, generalmente fine (frammenti di roccia, sabbie, limi e peliti) prodotto da alterazione "in situ" o selezionato dall'azione mista delle acque di ruscellamento e della gravità (subordinata), con a luoghi clasti a spigoli vivi o leggermente arrotondati.

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	21 di 83

- **b1 - Depositi alluvionali in evoluzione:** Deposito costituito da materiale detritico generalmente non consolidato (ghiaie, talora embriciate, sabbie e limi argillosi) di origine fluviale, attualmente soggetto a variazioni dovute alla dinamica fluviale. Può essere talora fissato da vegetazione (b1a).
- **i1 - Conoide torrentizia in evoluzione:** Depositi alluvionali, prevalentemente ghiaiosi, a forma di ventaglio aperto verso valle, in corrispondenza dello sbocco di valli e vallecicole trasversali ai corsi d'acqua principali ove la diminuzione di pendenza provoca la sedimentazione del materiale trasportato dall'acqua, soggetti ad evoluzione dovuta alla dinamica torrentizia

Successione Neogenico – Quaternaria del margine appenninico - padano

- **AES8a – Unità di Modena:** Depositi ghiaiosi e fini. Unità definita dalla presenza di un suolo a bassissimo grado di alterazione, con profilo potente meno di 100 cm, calcareo e grigio-giallastro. Corrisponde al primo ordine dei terrazzi nelle zone intravallive. Nella pianura ricopre resti archeologici di età romana del VI secolo d.C.. Potenza massima di alcuni metri (< 10 m) (*Post-VI secolo d.C.*)

Successione epiligure

- **RAN3 – Formazione di Ranzano – membro di Varano de' Melegari:** Torbiditi arenaceo-pelitiche con A/P<1, in strati da sottili a spessi, tabulari o lenticolari; litareniti risedimentate fini o finissime, grigio verdastre, particolarmente ricche di frammenti di rocce carbonatiche, passanti a pelite e pelite marnosa scura. Le peliti possono localmente costituire anche l'intero strato. Nell'area del Foglio 218 sono frequenti gli intervalli caotici, sono presenti anche livelli ricchi di frammenti di serpentinoscisti e altre metamorfiti di alta pressione e strati sottili di vulcanoareniti feldspatiche di composizione andesitica. Passaggio inferiore netto su RAN2. Potenza massima di oltre 600 m (*Rupeliano medio - sup.*)
- **RAN2 – Formazione di Ranzano – membro della Val Pessola:** Unità data da areniti, conglomerati e peliti in rapporti molto variabili e locali livelli caotici. Strati da medi a molto spessi, con geometria generalmente tabulare, talora lenticolare. Litoareniti grigio scure e verdastre, ricche di frammenti di serpentiniti con un aumento di frammenti di rocce carbonatiche verso l'alto; localmente possono prevalere i frammenti litici ofiolitici o quelli provenienti da rocce sedimentarie. Solo localmente sono presenti sottili intervalli pelitici grigi e verdastri. Localmente distinta una litofacies arenaceo-pelitica (RAN2ap). Contatto discontinuo, spesso erosivo e a luoghi discordante su MMP. Spessore fino a 1000 m circa (*Priaboniano - Rupeliano*)
- **RAN2a – Formazione di Ranzano – membro della Val Pessola – litofacies arenaceo-conglomeratica:** Conglomerati e areniti litiche, grigio scuri e verdastri, in banchi e strati torbiditici spessi e molto spessi, frequentemente amalgamati, intercalati da peliti grigio scure e verdastre e livelli caotici da slump; clasti di metamorfiti, magmatiti e rocce sedimentarie con un'importante frazione derivante da unità liguri (ofioliti, con predominanza di serpentiniti; diaspri; calcari e marne). Litofacies potente fino ad alcune centinaia di metri, costituita da più corpi grossolani lenticolari. Base erosiva, talora direttamente sul substrato ligure (*Priaboniano - Rupeliano*).
- **RAN2sl – Formazione di Ranzano – membro della Val Pessola – litofacies caotica:** Litofacies prevalentemente pelitica con alta frequenza di livelli caotici e inclusi, di lenti di arenarie calcari e marne derivanti dalle unità liguri, dalle Marne di Monte Piano e dalla Formazione di Ranzano.

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	22 di 83

- **RAN1 – Formazione di Ranzano – membro di Pizzo d'Oca:** Areniti fini chiare, a composizione feldspatico-litica con abbondanti elementi metamorfici, e peliti grigio azzurre; strati da sottili a spessi, A/P>1. Contatto netto su MMP. Potenza variabile da pochi metri a circa 20 m.
- **MMP – Marne di Monte Piano:** Argille, argille marnose e marne rosse, rosate, grigio chiaro e verdi, con rari e sottilissimi strati di feldspatoareniti risedimentate, siltiti nerastre e calcari marnosi grigio-verdi od ocra. Nell'area del Foglio 218 verso l'alto stratigrafico, le argille rosate passano gradualmente a marne siltose grigie. Localmente è stata distinta una litofacies caotica (MMPa) rappresentata da argille grigio scure inglobanti blocchi calcarei, calcarenitici e marnosi di pertinenza ligure. Localmente alla base della formazione, sono presenti calcareniti grigie e rosate in strati massivi molto spessi caratterizzati da intensa bioturbazione e da tracce di *Zoophycos*. Sono presenti slump. Stratificazione generalmente poco evidente. Sedimentazione di tipo pelagico, in ambiente confinato e profondo, con rari apporti torbiditici. Il limite inferiore è discordante sulle unità liguri deformate o netto su BAI. La potenza affiorante è non superiore a 80 m (*Luteziano sup. - Rupeliano inf.?*)

Unità Liguri

- **MOH – Formazione di Monghidoro:** Torbiditi arenaceo-pelitiche in strati spessi, raramente molto spessi, con rapporto A/P generalmente intorno a 2/1 cui si intercalano intervalli metrici di strati sottili e medi con rapporto A/P circa 1/2. Le arenarie sono gradate con base a granulometria da media a grossolana, localmente poco cementate, di colore grigio, marroni o giallastre per alterazione; passano ad argilliti più o meno siltose di colore nerastro. Nella parte bassa della formazione sono presenti rari strati sottili calcareo-marnosi o calcarei, talora cartografati (tc). Torbiditi di piana bacinale. Limite inferiore graduale su MOV. La potenza geometrica di qualche centinaio di metri (*Maastrichtiano sup. - Paleocene*)
- **MOV – Formazione di Monte Venere:** Torbiditi arenaceo-marnose con base fine grigio-chiaro, in strati da medi a molto spessi, al tetto intervalli sottili o medi di argille scure o nerastre. Intercalazioni metriche di strati arenaceo-pelitici da sottili a spessi grigio brunastri, con rapporto A/P >1, a luoghi prevalenti sugli strati calcareo-marnosi. Regolari intercalazioni di megatorbiditi calcareo-marnose in strati spessi fino a 15 m. Le areniti hanno composizione arcocosa e possono avere cementazione scarsa, specie quelle a grana più grossolana. Paleocorrenti con provenienza dai quadranti meridionali. Contatto inferiore non preservato. Nella parte alta della formazione è localmente presente la litofacies del Torrente Lucola (MOVa), costituita da torbiditi siltoso-marnose in strati sottili. Torbiditi di ambiente marino profondo. Potenza fino a 600 m (*Campaniano sup. - Maastrichtiano*)
- **APM – Arenarie del Poggio Mezzature:** Torbiditi arenaceo-pelitiche in strati medi e sottili alternate a livelli di torbiditi arenacee spesse e molto spesse di colore grigio-bluastro a grana anche grossolana. Rapporto A/P >1. Torbiditi di ambiente marino profondo. In aree limitrofe contatto inferiore per alternanze alle Argilliti dell'Uccelliera. Potenza di alcune centinaia di metri (*Santoniano sup. - Campaniano inf.*)

Unità Ultrascolane (Successione Episubligure nella Carta Sismotettonica della RER)

- **MMA – Marne di Marmoreto:** Marne, marne siltose grigie, a stratificazione mal visibile con rare intercalazioni di siltiti ed arenarie fini grigio-chiare, giallastre per

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	23 di 83

alterazione, anche di origine vulcanoclastica. Nella parte basale intercalazioni di brecce argillitico calcaree. Contatto inferiore discordante su FIU. Deposito di scarpata. Spessore massimo di circa 100 m (*Rupeliano p.p. - Chattiano p.p.*)

- **FIU – Argille di Fiumalbo:** Nella parte bassa argilliti varicolori, verdastre o rosse con intercalazioni di sottili strati calcarenitico-marnosi spesso riuniti in sequenze di spessore decimetrico e con bioturbazione a condriti e fucoidi negli intervalli marnosi. Nella parte alta argilliti marnose grigio-cenere con intercalazioni di siltiti e areniti fini in strati sottili. Locali intercalazioni di torbiditi arenacee a cemento calcareo in strati spessi (FIU2), e di torbiditi grossolane con clasti di ofioliti e diaspri (FIU1). Contatto stratigrafico discordante sulle successioni sottostanti. Spessore massimo 200-300 m (*Bartoniano - Rupeliano p.p.*)

Unità Cervarola

- **CIV – Marne di Civago:** Marne grigio-cenere, spesso siltose, a stratificazione mal distinguibile. Localmente livelli di selce nera. Intercalazioni di sottili strati arenacei discontinui anche di origine vulcanoclastica, di livelli arenitici grossolani a matrice marnosa con abbondante glauconite risedimentata. Nell'area del Foglio 234 sono comprese in questa formazione anche torbiditi siltoso pelitiche in strati sottili. Deposito di scarpata. Contatto inferiore discordante sulle unità ultratoscane sottostanti. Spessore di 50-100 m (*Aquitano*).

Elemento tettonico di Gova (unità umbro-marchigiano-romagnola (?))

- **GOV – Arenarie di Gova:** torbiditi silicoclastiche in strati spessi a grana frequentemente grossolana e scarsa percentuale di intervalli pelitico marnosi. Spessore affiorante di circa 400 m. (*Burdigaliano sup. - Langhiano inf.*)

3.2 GEOMORFOLOGIA

Dai dati contenuti nella Carta Inventario del dissesto (PAI-PTCP) e degli abitati da consolidare e trasferire (L. 445/1908) del PTCP 2010 della Provincia di Reggio Emilia, il Comune di Toano presenta un elevato INDICE DI FRANOSITÀ² pari a circa il 46%, riconducibile all'affioramento di litologie argillose-marnose, da una morfologia “giovane” in piena evoluzione e talora da interventi antropici non adeguati al contesto geomorfologico.

Infatti l'attuale assetto geomorfologico dell'ambito territoriale del Comune di Toano è il risultato dell'effetto combinato di alterne vicende climatiche di varia intensità, lente deformazioni tettoniche ed interventi antropici, che si sono imposti negli ultimi millenni ed hanno direttamente interagito sull'andamento morfologico del territorio.

² Valutazione del grado di dissesto idrogeologico rapportata all'estensione del territorio comunale

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	24 di 83

In generale si può affermare che il territorio di Toano è contraddistinto da una morfologia "giovanile" caratterizzata da versanti più o meno acclivi, con incisioni vallive spesso pronunciate, dovute prevalentemente all'azione erosiva dei corsi d'acqua.

Le forme di accumulo fluviale hanno estensione piuttosto limitata occupando le aree di fondovalle del F. Secchia, del T. Secchiello e del T. Dolo.

Molto diffuse sono le forme di erosione fluviale, specialmente sulle sponde geologicamente instabili o costituite da depositi detritici o litologie "tenere" (argilliti, marne, formazioni flyschoidi, ecc.). Spesso tali fenomeni sono la causa dell'innescio di movimenti franosi di neoformazione sui versanti o della riattivazione di vecchie frane quiescenti.

I dissesti sono presenti sull'intero territorio comunale, ma sono particolarmente diffusi nel settore settentrionale compreso tra Cavola, il Capoluogo e Cerredolo.

Di seguito viene descritta la situazione di Cavola su cui è stato sviluppato l'approfondimento di livello 3.

L'abitato di Cavola è situato all'interno del bacino definito dal Rio di Pietra Grossa e dal Rio Priolo, tributari in sinistra del Fiume Secchia e si colloca, in massima parte, sul corpo di un'estesa frana quiescente caratterizzata, nel tempo, da diffusa instabilità localizzata a causa di parziali riattivazioni lungo i fianchi e verso il piede del corpo di frana principale.

A causa del ripetersi di dissesti nel tempo l'abitato fu incluso nel 1938 nell'elenco dei centri da consolidare ai sensi della Legge 445/1908.

Sotto il profilo geometrico la frana ha una lunghezza di circa 4.495 m, una larghezza massima di 1290 m, una profondità massima di 45 m per un volume complessivo stimato di 54×10^6 mc.

Il centro abitato di Cavola sorge direttamente sul dorso del grande corpo franoso, che è lungo circa 4 chilometri. L'ampiezza del centro abitato è accresciuta progressivamente negli ultimi decenni, nonostante i numerosi eventi di riattivazione che storicamente hanno interessato questo corpo di frana e che ne hanno causato l'inclusione tra gli abitati dichiarati "da consolidare" sin dagli anni '30. L'ultima riattivazione parossistica risale agli anni 1960-64, dopodiché i numerosi interventi realizzati ne hanno rallentato la dinamica, consentendo di ampliarsi al centro abitato, che sorgeva prima di allora in minima parte sul corpo franoso (Fig. 14).

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	25 di 83

Attualmente risultano sufficientemente stabilizzati sia la porzione superiore, che il piede della paleofrana. Al contrario, sulla parte mediana della paleofrana, è presente un dissesto attivo che tende a coinvolgere gli edifici posti sul settore orientale dell'abitato di Cavola. Il fenomeno franoso è di tipo complesso con prevalenza della componente di scorrimento rotazionale su quella traslativa. Nel tempo sono state eseguite varie opere idrauliche e di consolidamento per rallentare l'evoluzione dei dissesti in atto.



Fig. 14 - Immagine aerea della frana di Cavola nella sua interezza (destra) e della coalescente frana di Oca (sinistra). Da Relazione geologica del Progetto esecutivo dei Lavori di consolidamento e messa in sicurezza dell'abitato di Cavola - Comune di Toano - OPCM 3950/210 – OCDPC 84/2013 e 279/2015 – DGR 1480/2017.

Nel corso del tempo sono stati realizzati diversi sondaggi, di cui 8 attrezzati ad inclinometri, regolarmente monitorati dall'Ufficio Territoriale dell'Agenzia Sicurezza Territoriale e Protezione Civile della Regione Emilia-Romagna (ASTPC-RER).

Il monitoraggio inclinometrico, protratto per oltre 20 anni, ha evidenziato (Bertolini and Pizziolo, 2004) che il corpo franoso principale, apparentemente inattivo, in realtà si muoveva di pochi millimetri all'anno alla profondità di 45 metri. Tale movimento, attualmente assente, non produsse, di per sé, conseguenze evidenti in superficie.

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	26 di 83

Tale movimento ebbe comunque la funzione indesiderata di mantenere i parametri di resistenza al taglio, lungo la base della frana, a valori residui, costituendo quindi un evidente fattore di rischio per tutto il centro abitato.

I dati satellitari INSAR Cosmo Sky Med, riferiti all'anno 2015, hanno confermato una sostanziale stabilità globale del corpo franoso, fatta eccezione per molteplici, e pur vasti, movimenti periferici, che causano risentimenti in diverse settori del centro abitato, soprattutto nella periferia EST e in alcuni luoghi a NW.

La litologia delle carote dei diversi sondaggi, spinti sino a 60 metri di profondità, dimostrano che il corpo franoso è alimentato prevalentemente dalla Formazione delle Arenarie di Ranzano (Oligocene), che costituiscono il bedrock del versante sinistro della valle sul cui impluvio la frana giace.

La storia "Olocenica" della frana è stata ricostruita sulla base di diversi resti vegetali che sono stati raccolti durante le perforazioni, analizzati e datati col metodo radiocarbonico (^{14}C). Il corpo di frana ha iniziato a formarsi circa 4000 anni fa e ha completato la sua formazione (come si presenta attualmente) circa 3000 anni fa.

Venendo a tempi più recenti, sono note riattivazioni della frana dal 1000 al 1600 A.D., quando, secondo le cronache storiche, la vecchia chiesa fu distrutta e poi ricostruita (è quella che esiste adesso). L'ultima grande riattivazione risale al 1960, quando una colata rapida di fango, di grandi dimensioni, scese dal coronamento storico sino all'attuale posizione dell'abitato di Cavola, distruggendo molte abitazioni presso la frazione di Morra, mai più ricostruita. In quel caso, furono osservati spostamenti del terreno di diverse centinaia di metri.

Nel 2004 la frana di Cavola fu oggetto di ricerche da parte di un gruppo di enti formato da Regione Emilia-Romagna, Province di Modena e Reggio Emilia, INGV e Dipartimento di Scienze della Terra di Cambridge (UK) per uno studio di alto dettaglio della propagazione delle onde sismiche naturali entro i corpi di frana. La ricerca è nota come "Cavola Experiment".

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	27 di 83

4. DATI GEOTECNICI E GEOFISICI

4.1 ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DEI DATI

La ricerca effettuata presso l'archivio dell'Ufficio Tecnico Comunale ha consentito di esaminare le relazioni geologiche, prodotte a corredo di varianti agli strumenti urbanistici, di progetti edilizi, di PUA e di opere pubbliche e di acquisire copia delle indagini geognostiche eseguite. Ai fini del presente studio sono state acquisite le indagini eseguite successivamente alla ricerca d'archivio a supporto dello studio di Livello 2.

Inoltre grazie alla fattiva collaborazione del Personale dell'Ufficio Territoriale di Reggio Emilia dell'ASTPC-RER è stato possibile reperire le stratigrafie di sondaggi eseguiti in varie epoche nell'abitato di Cavola.

Una volta completato il quadro dei dati disponibili, è stata pianificata e condotta una specifica campagna di indagini integrative consistita nell'esecuzione di n° 1 sondaggio a carotaggio continuo e n° 1 prova Down-Hole. 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. 2 è rappresentato il quadro d'insieme delle prove acquisite ricadenti nel territorio comunale o appositamente realizzate nelle aree interessate dal terzo livello d'approfondimento.

Prove in sito	Archivi locali	nuove prove	Totale
Sondaggi a carotaggio continuo	12	1	13
Sondaggi con inclinometro	6		6
Sondaggi a distruzione	1		1
Saggi esplorativi con escavatore	3		3
Prove penetrometriche dinamiche super-pesanti (DS)	84		84
Prove penetrometriche dinamiche pesanti (DP)	5		5
Prove penetrometriche dinamiche medie (DN)	15		15
Prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT)	3		3
MASW	25		25
Stazione microtremore a stazione singola (HVSr)	54	1	55
Profilo sismico a rifrazione	6		6
Down Hole (DH)	2	1	3
Tomografia elettrica	1		1

Tab. 2 – Prove in sito disponibili per il Comune di Toano

L'ubicazione degli elementi stratigrafici e geofisici acquisiti è riportata nella Carta delle indagini in scala 1:10.000.

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	28 di 83

5. 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 Toano, 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 Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	29 di 83

6. METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI

Come descritto in precedenza, nella prima fase di lavoro 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 1:3.000)** - In questa carta, allestita con “finestre territoriali” e suddivisa in due Tavole (Tav. A e Tav. B), 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;
- **Carta delle frequenze naturali dei terreni (scala 1:10.000)** - 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 nove zone, le zone di attenzione per instabilità di versante e i punti di misura di rumore ambientale.

In tutte le cartografie sono stati riportati i perimetri delle aree relative ai centri abitati di Toano, Cavola, Cerredolo, Corneto, Fora, Vogno e Quara-Montebiotto-Castagnola sottoposte a Microzonazione Sismica.

In una fase successiva è stato predisposto il seguente elaborato:

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	30 di 83

- **Carta delle velocità delle onde di taglio S (scala 1:10.000)** - In questa carta è stata riportata l'ubicazione delle prove MASW e down-hole e a fianco di ciascuna prova è stato riportato il rispettivo valore di V_{s30} e/o V_{sH} in m/s. Anche in questa tavola sono stati riportati i perimetri delle aree relative ai centri abitati di Toano, Cavola, Cerredolo, Corneto, Fora, Vogno e Quara-Montebiotto-Castagnola sottoposte a Microzonazione Sismica.

Infine si è proceduto con la terza ed ultima fase di lavoro, in cui è stata riproposta un'analisi semplificata nelle aree sottoposte a microzonazione sismica di Livello 2 ed un'analisi approfondita per l'areale sottoposto a microzonazione sismica di Livello 3. L'analisi approfondita è stata svolta per un'area di Cavola potenzialmente soggetta ad instabilità di versante ed ha portato alla determinazione dello spettro di risposta in superficie e dei fattori di amplificazione, che hanno permesso di realizzare le verifiche di stabilità.

Gli elaborati prodotti in questa fase sono 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 - FPGA
 - Carta di microzonazione sismica - FA 0,1 - 0,5 s
 - Carta di microzonazione sismica - FA 0,4 - 0,8 s
 - Carta di microzonazione sismica - FA 0,7 - 1,1 s
 - Carta di microzonazione sismica - FH 0,1 - 0,5 s
 - Carta di microzonazione sismica - FH 0,5 - 1,0 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

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	31 di 83

7. ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE

La risposta sismica locale è il risultato di interazioni tra le onde sismiche e le condizioni locali, cioè l'insieme delle caratteristiche morfologiche e stratigrafiche di depositi di terreno ed ammassi rocciosi e delle proprietà fisiche e meccaniche dei materiali che li costituiscono.

In altre parole, le caratteristiche del sito sono le responsabili delle modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenze, che un moto sismico relativo ad una formazione rocciosa di base (terremoto di riferimento), subisce attraversando gli strati dal bedrock fino alla superficie (Lanzo G. et al., 1999).

Alla scala della singola opera o del singolo sistema geotecnico, la risposta sismica locale consente di definire le modifiche che un segnale sismico subisce, a causa delle caratteristiche topografiche e stratigrafiche dei depositi di terreno e degli ammassi rocciosi e dalle proprietà fisiche e meccaniche dei materiali che li costituiscono, rispetto a quello di un sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale.

I passi da seguire nello studio del problema della risposta sismica locale sono:

1. Definizione del modello geofisico del sottosuolo;
2. Stima dell'accelerazione di base;
3. Esecuzione dell'analisi e restituzione grafica in termini di:
 - a. Serie temporali
 - b. Spettri di risposta elastica in superficie

Nel presente studio la procedura di analisi di RSL è stata con metodo bidimensionale sulla sezione della frana di Cavola, estraendo i risultati per n° 3 verticali:

- Verticale "SDH" in corrispondenza del sondaggio denominato Sdh, nel cui foro è stata eseguita anche una prova sismica Down-hole;
- Verticale "Monte" posta lungo la sezione, 1586 m a monte della prima;
- Verticale "Valle" posta lungo la sezione, 889 m a valle della prima.

Il sito di Cavola è interessato da un movimento franoso classificato in parte quiescente ed in parte attivo e per il quale si dispongono informazioni sufficientemente affidabili in termini di stratigrafia e Vs (Fig. 15).

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	32 di 83

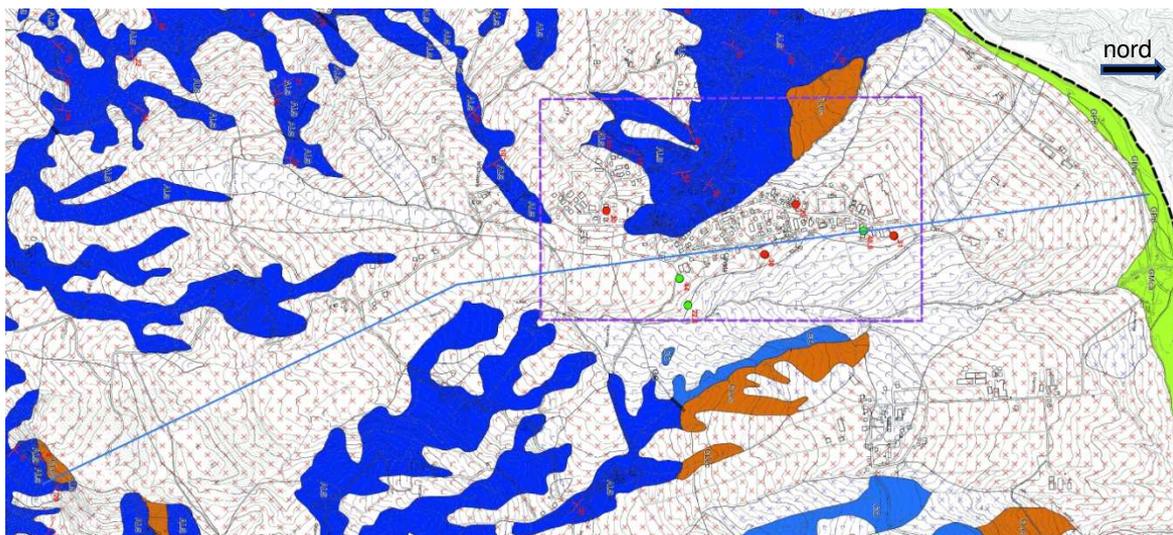


Fig. 15 – Ubicazione sito oggetto di analisi di risposta sismica locale (stralcio Carta Geologico-Tecnica). La linea blu indica la traccia della sezione lungo la quale è stata sviluppata l'analisi.

Di seguito verrà illustrato il modello adottato, successivamente verrà descritta la procedura di analisi di RSL e infine i risultati dell'analisi.

7.1 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);
- densità dei litotipi indagati;
- curve di variazione dello smorzamento (D) e della rigidità (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, oppure un passaggio tra due materiali caratterizzato da elevato contrasto di impedenza sismica.

7.1.1 Litologia

Per la determinazione delle caratteristiche litologiche sono stati utilizzati i dati rilevati dal sondaggio a carotaggio continuo Sdh, spinto fino alla profondità di -30,00 m da p.c. Mediante tale sondaggio ed altre informazioni litostratigrafiche, messe a disposizione

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	33 di 83

dall'Ufficio Territoriale di Reggio Emilia dell'Agenzia Sicurezza Territoriale e Protezione Civile della Regione Emilia-Romagna, è stata redatta la sezione interpretativa della frana di Cavola, utilizzata sia per la analisi di risposta sismica locale bidimensionale, che per le verifiche di stabilità necessarie per analizzare gli spostamenti in condizioni sismiche.

7.1.2 Determinazione della V_s e del *bedrock* sismico

Per quanto riguarda la velocità delle onde S fino alla massima profondità indagata e l'individuazione del *bedrock* sismico, si è fatto riferimento alle misure effettuate con la prova Down-hole, lungo la verticale del sondaggio SDH1-S1 e con la misura HVSR eseguita nei pressi del foro di sondaggio.

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

In realtà oggi si tende ad individuare il *bedrock* sismico, soprattutto in pianura, in corrispondenza di un elevato contrasto di impedenza sismica, cioè laddove il rapporto tra le velocità dello strato superficiale e quello più profondo supera il valore di 2-2.5, anche se il valore di V_s non supera gli 800 m/s.

Sulla base dei risultati ottenuti, è stato assunto come *bedrock* lo strato posto a -40,60 m da p.c., cui è stata assegnata una V_s di 780 m/s.

Nella seguente Fig. 16 è rappresentato il modello geofisico del sottosuolo in funzione della profondità.

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	34 di 83

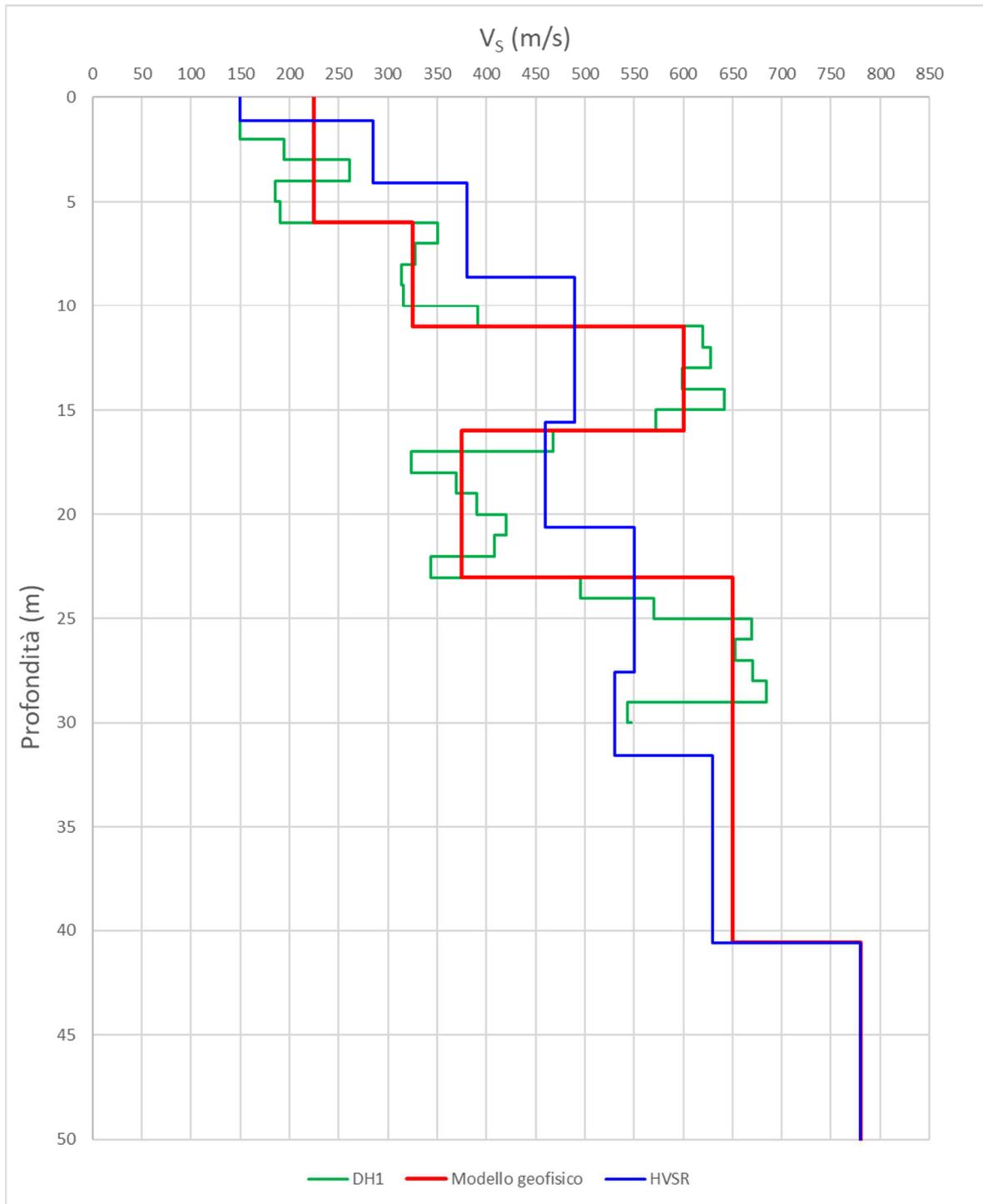


Fig. 16 – Modello geofisico del sottosuolo basato sui risultati della prova Down-hole e della misura HVSr a stazione singola

7.1.3 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 γ , sono state utilizzate curve presenti in letteratura, scelte sulla base della litologia costituente il corpo di frana ma anche sulle velocità misurate nel corso della prova Down-hole.

In particolare, sono state utilizzate curve determinate Vucetic & Dobry (1993)³, Sand Seed & Idriss (1970)⁴ e Rollins (1998)⁵. In Tab. 3 sono descritti i parametri delle curve:

Tipo di curva	Litologia	α	β	η	λ
Vucetic & Dobry, PI = 30	Limoso-argillosa	5.12	0.81	30.24	3.06
Sand Seed & Idriss	Sabbiosa	14.12	0.93	27.50	3.14
Rollins	Ghiaiosa	17.02	0.85	19.75	2.28

Tab. 3 – Riepilogo parametri fondamentali dalla curva di letteratura

Nella seguente Fig. 17 sono rappresentate graficamente le curve di decadimento G/G₀ (colori brillanti) e D (colori tenui) utilizzate.

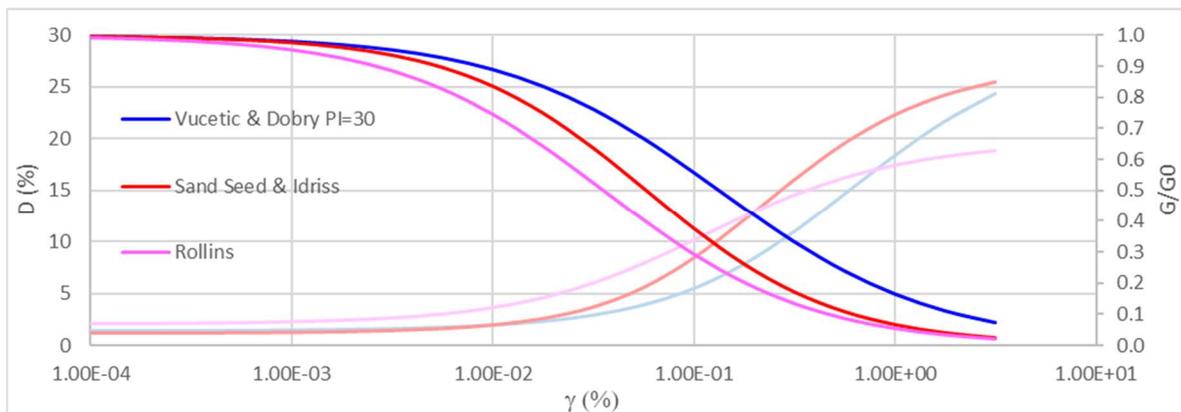


Fig. 17 – Grafico delle curve di interpolazione G/G₀ e D per tutti i terreni

³ M. Vucetic; R. Dobry – 1991 – Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response - Journal of Geotechnical Engineering, [Vol. 117, Issue 1](#).

⁴ H. B. Seed; I. M. Idriss – 1970 – Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses – University of California Berkeley Structural Engineers and Mechanics.

⁵ 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.

7.1.4 Descrizione del modello

Sulla base della sezione litostratimetrica, è stato costruito il modello bidimensionale da inserire nel programma LSR2D.

I parametri delle due verticali di analisi, il cui posizionamento è visibile nelle figure seguenti, sono riportati nelle in Tab. 4 (verticale “SDH”), Tab. 5 (verticale “Monte”) e Tab. 6 (verticale “Valle”).

I colori riportati nella sezione di Fig. 19 trovano riscontro nelle Tabb. 4, 5 e 6.

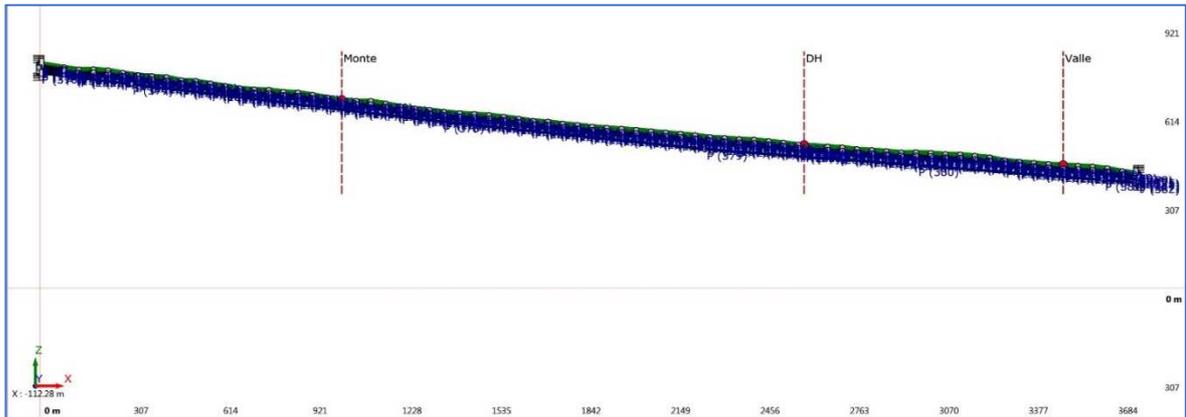


Fig. 18 – Stratigrafia del modello

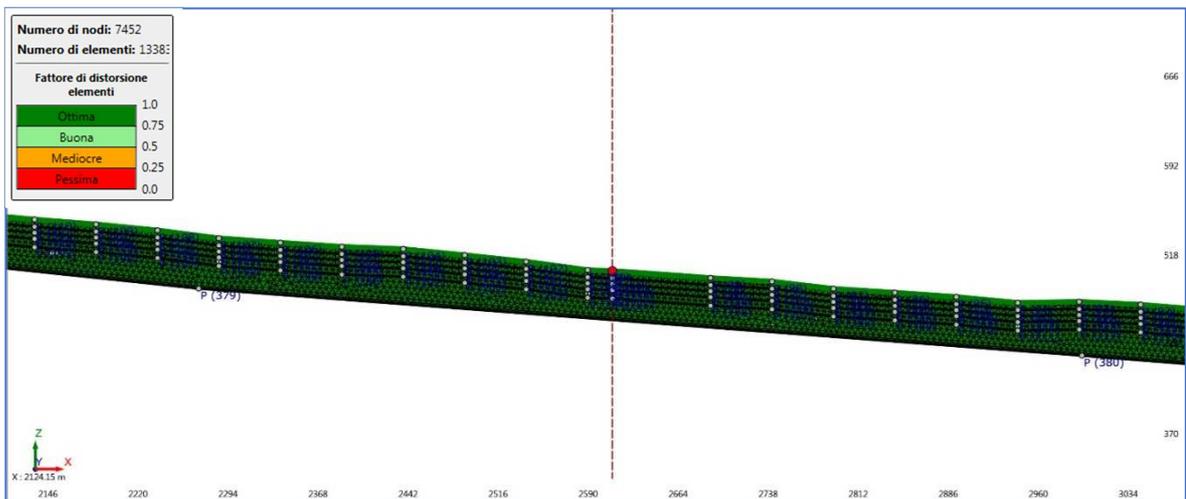


Fig. 19 – Discretizzazione di un tratto del modello mediante maglia triangolare

STUDIO DI MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO 3

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	g (kN/m ³)	V _s (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Tetto frana	0.00	-6.00	6.00	18.50	225.00	Vucetic & Dobry, PI = 30
Frana 1	-6.00	-11.00	5.00	19.00	325.00	Sand Seed & Idriss
Frana 2	-11.00	-16.00	5.00	20.00	600.00	Rollins
Superficie di scollamento	-16.00	-23.00	7.00	19.00	375.00	Sand Seed & Idriss
Frana 3	-23.00	-40.6	17.60	20.00	650.00	Rollins
Bedrock	-40.6	-	-	22.00	780.00	-

Tab. 4 – Modello sismostratigrafico e caratteristiche meccaniche degli strati della verticale “SDH”

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	g (kN/m ³)	V _s (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Tetto frana	0.00	-6.00	6.00	18.50	225.00	Vucetic & Dobry, PI = 30
Frana 1	-6.00	-11.00	5.00	19.00	325.00	Sand Seed & Idriss
Frana 2	-11.00	-16.00	5.00	20.00	600.00	Rollins
Superficie di scollamento	-16.00	-23.00	7.00	19.00	375.00	Sand Seed & Idriss
Substrato alterato	-23.00	-34.00	11.00	20.00	650.00	Rollins
Bedrock	-34.00	-	-	22.00	780.00	-

Tab. 5 – Modello sismostratigrafico e caratteristiche meccaniche degli strati della verticale “Monte”

Litologia	Profondità (m da p.c.)		Spessore (m)	g (kN/m ³)	V _s (m/s)	Curva di decadimento
	da	a				
Tetto frana	0.00	-6.00	6.00	18.50	225.00	Vucetic & Dobry, PI = 30
Frana 1	-6.00	-11.00	5.00	19.00	325.00	Sand Seed & Idriss
Frana 2	-11.00	-16.00	5.00	20.00	600.00	Rollins
Superficie di scollamento	-16.00	-23.00	7.00	19.00	375.00	Sand Seed & Idriss
Frana 3	-23.00	-40.00	17.00	20.00	650.00	Rollins
Bedrock	-40.00	-	-	22.00	780.00	-

Tab. 6 – Modello sismostratigrafico e caratteristiche meccaniche degli strati della verticale “Valle”

Il modello FEM viene ottenuto mediante una discretizzazione con elementi finiti piani a tre nodi del dominio (maglia triangolare – cfr. Fig. 19). Il passo della mesh adottato è stato 5,0 m.

7.1.5 Azioni sismiche in ingresso

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"⁶.

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 servizio fornisce 7 accelerogrammi per ciascun nodo del reticolo di riferimento della pericolosità sismica locale dell'Allegato A delle NTC 2008. Per il sito indagato sono stati utilizzati i sismi riferiti al nodo più vicino: il 17163.

Gli accelerogrammi sono stati estratti per tempi di ritorno di 475 anni.

Tutti i sismi sono stati scalati in accelerazione per ottenere un valore massimo di input compatibile con quello previsto per la localizzazione del sito.

M _w	Distanza epicentrale	Fattore di scala	File
6.2	29.9	2.09 %	ESM EU.HRZ..HNE.D.19790524.172317.C.ACC.ASC
5.74	12.57	1.38 %	NGA RSN146_COYOTELK_G01320.AT2
5.99	54.21	2.59 %	NGA RSN703_WHITTIER.A_A-VAS000.AT2
6.93	83.53	1.53 %	NGA RSN804_LOMAP_SSF205.AT2
6.69	38.07	1.15 %	NGA RSN1091_NORTHR_VAS090.AT2
6.6	31	0.65 %	KiKnet SMNH100010061330.EW2
5.9	14.4	2.73 %	ESM IT.SLO..HGE.D.20161026.191806.C.ACC.ASC

Tab. 7 – Sismi con tempo di ritorno di 475 anni

⁶ R.E.R. (eucentre.it)

7.2 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 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.

7.2.1 Metodo lineare equivalente

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

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

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

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	40 di 83

Tale modello lineare equivalente, studia il comportamento tra tensione e deformazione del terreno basandosi sul modello di Kelvin-Voigt, illustrato in Fig. 20. 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

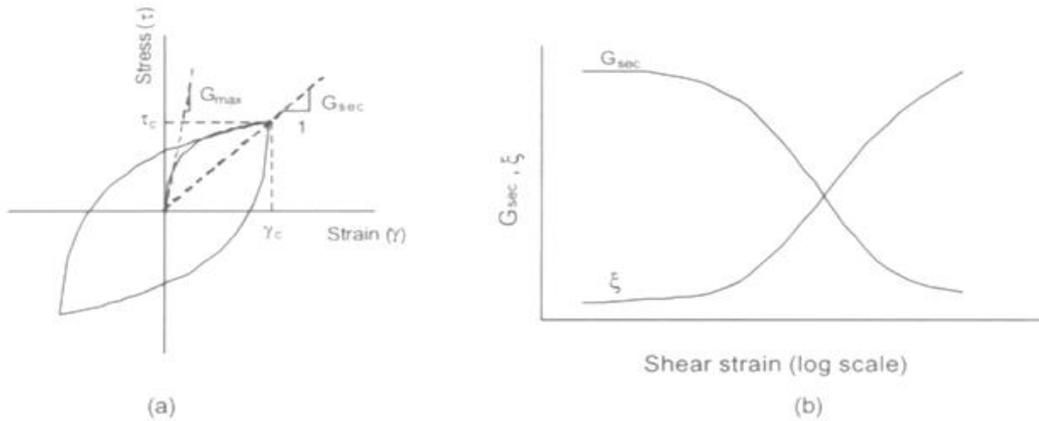


Fig. 20 – Modello lineare equivalente: (a) curve tensioni - deformazioni; (b) variazione del modulo

Il comportamento non lineare del terreno, durante un ciclo di carico, viene approssimato per come mostrato in Fig. 20. 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:

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	41 di 83

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

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. 20b).

7.2.2 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. 21) 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:

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	42 di 83

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

β = parametro del metodo di integrazione posto pari a 0.25

γ = parametro del metodo di integrazione posto pari a 0.50

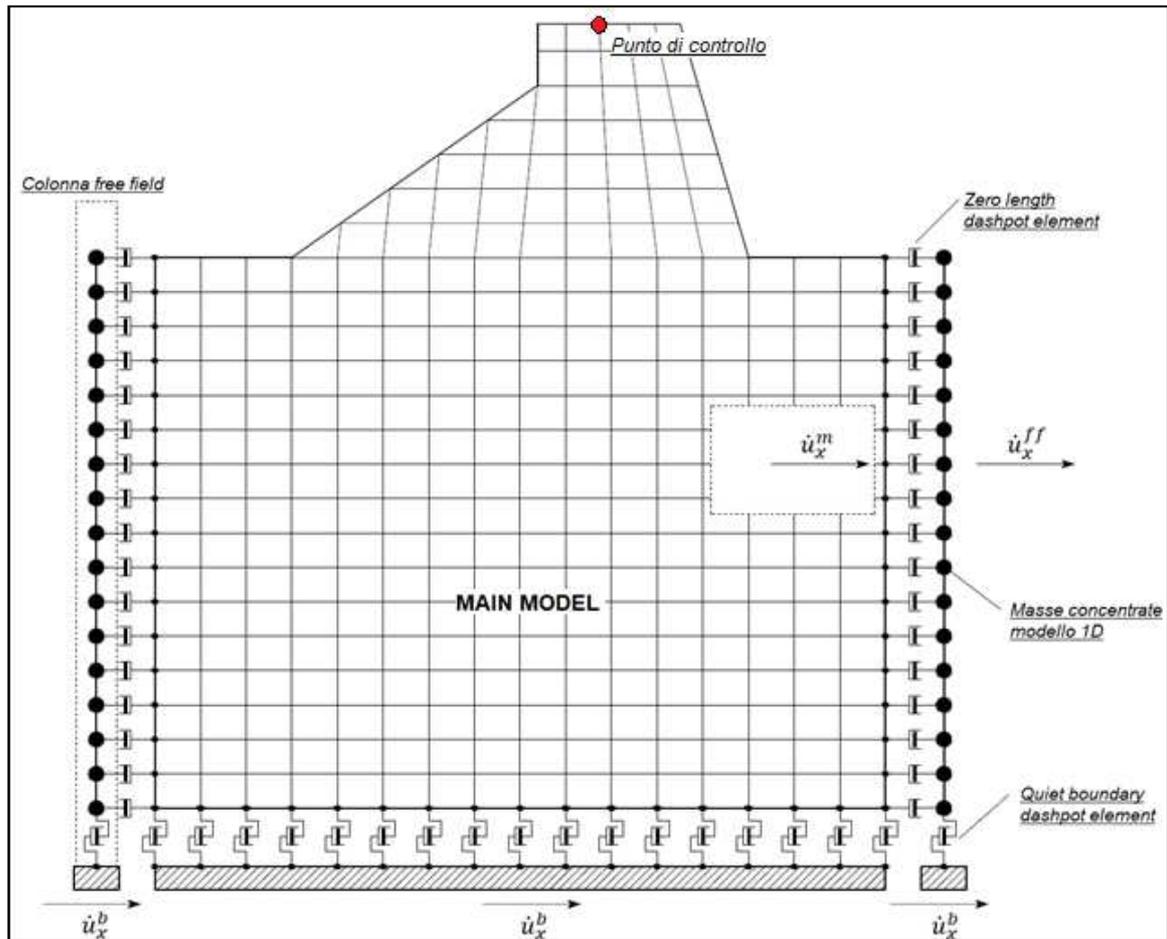


Fig. 21 – Discretizzazione FEM del terreno

7.2.2.1 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 Rayleigh

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

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	43 di 83

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

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

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;

7.2.3 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);
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 ($\gamma_{i-1} \sim \gamma_i$).

7.2.4 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.

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	44 di 83

7.3 Analisi dei risultati

I risultati della analisi condotte con il codice di calcolo LSR 2D (Local Sismic Response 2D) Ver. 5.0 di STACEC, elaborati nel dominio del tempo e delle frequenze, hanno consentito di definire per il sito in esame:

- Gli accelerogrammi di output;
- La curva di variazione dell'accelerazione con la profondità;
- 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;
- 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;
- I fattori di amplificazione di sito in termini di rapporto tra intensità dello spettro di risposta in accelerazione (FA) 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 (FH) 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.

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.

In Fig. 22 è riportato, a titolo di esempio, il grafico con gli spettri in output (in tonalità di grigio, e gli spettri medi in input, in verde, e in output, in rosso, per la verticale "SDH".

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	45 di 83

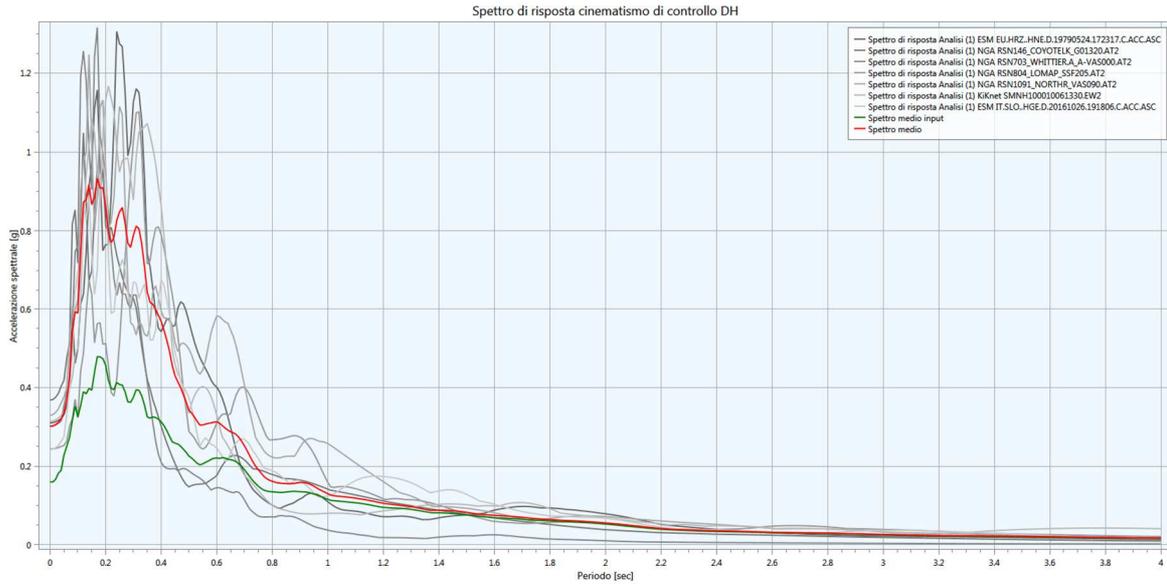


Fig. 22 – Confronto tra gli spettri in accelerazione spettro medio in accelerazione in input e lo spettro medio in accelerazione in output per la verticale “SDH”

Nelle tabelle dei fattori di amplificazione, oltre a quelli ottenuti con la procedura di RSL, sono riportati, per confronto, anche i fattori di amplificazione ottenuti applicando gli abachi proposti dalla Regione Emilia Romagna (abaco Appennino) e le differenze percentuali tra i valori.

In Fig. 23 è riportato il grafico rappresentante i valori dei fattori di amplificazione calcolati da RSL2D per le tre verticali.

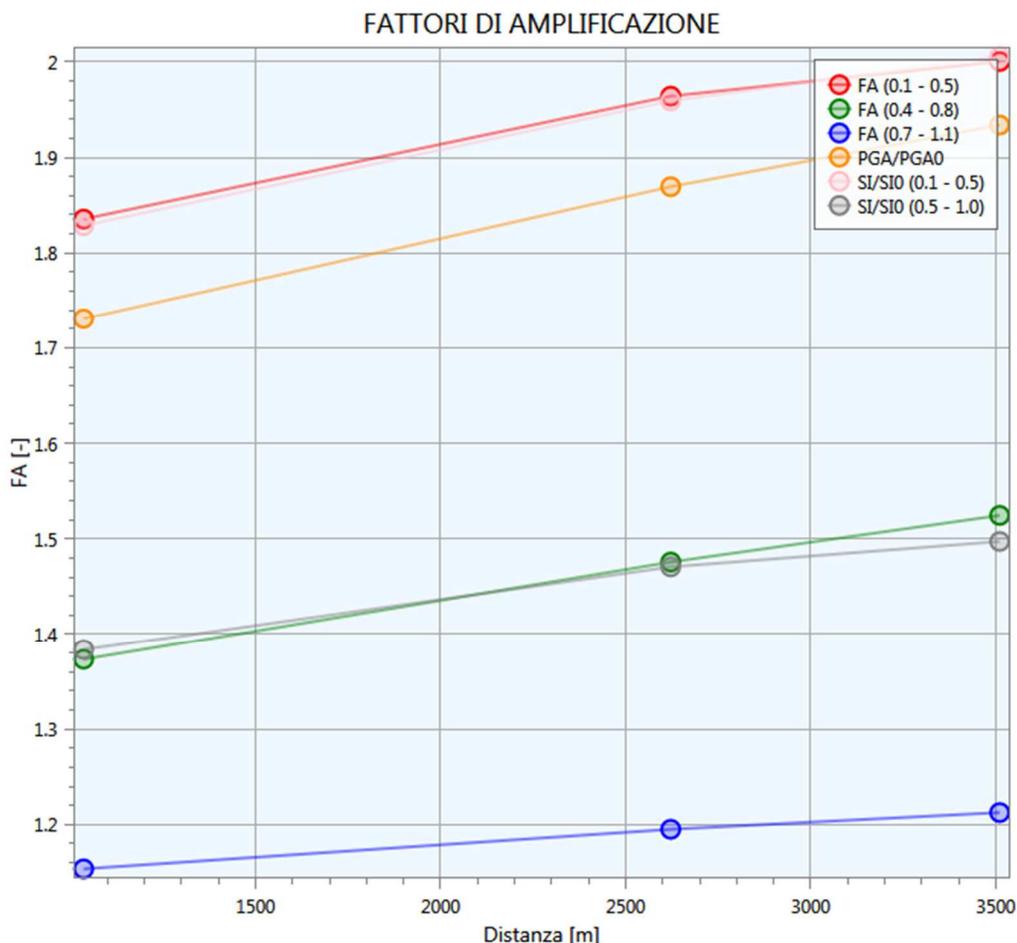


Fig. 23 – Esempio output fattori di amplificazione in termini di accelerazione e velocità per le tre verticali

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

- Gli accelerogrammi di output scalati sulla base del sito di indagine;
- Il grafico della variazione dell'accelerazione con la profondità;
- Il grafico dello spettro elastico in accelerazione da RSL confrontato con quello semplificato derivato dalle NTC per la categoria di sottosuolo corrispondente;
- La tabella con i fattori di amplificazione calcolati, confrontati con quelli da normativa.

7.3.1 Verticale "SDH"

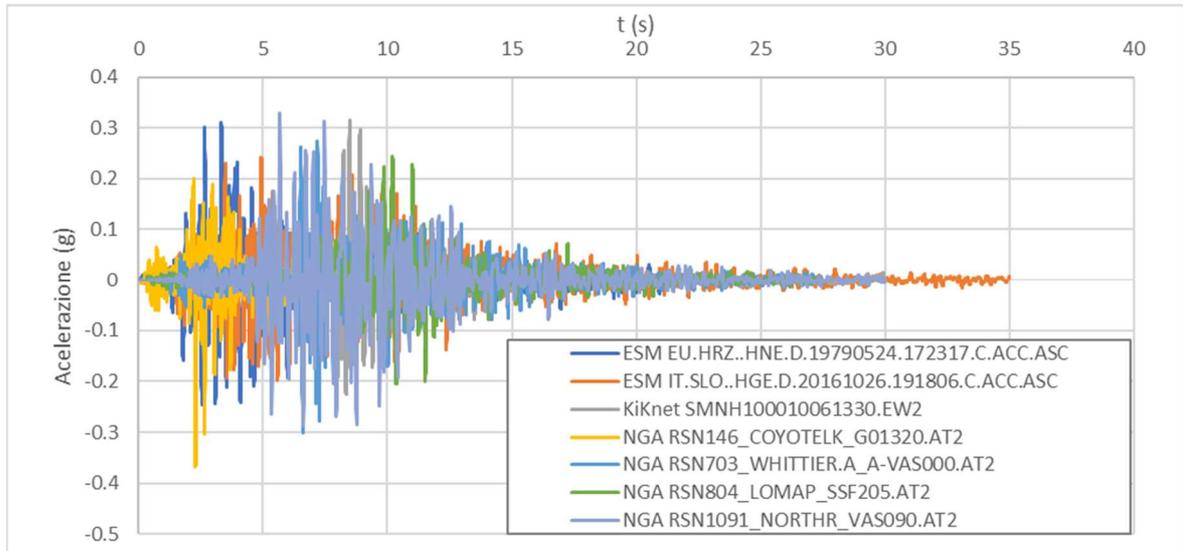


Fig. 24 – Accelerogrammi di output per la verticale "SDH"

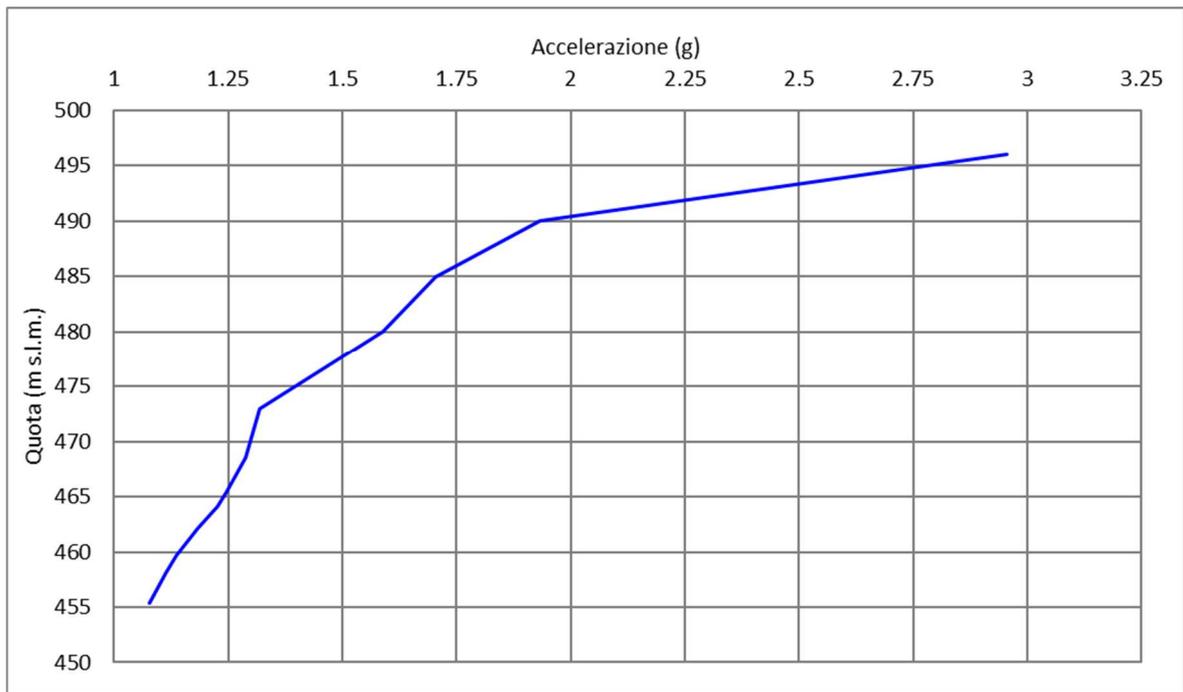


Fig. 25 – Curva di variazione dell'accelerazione con la profondità per la verticale "SDH"

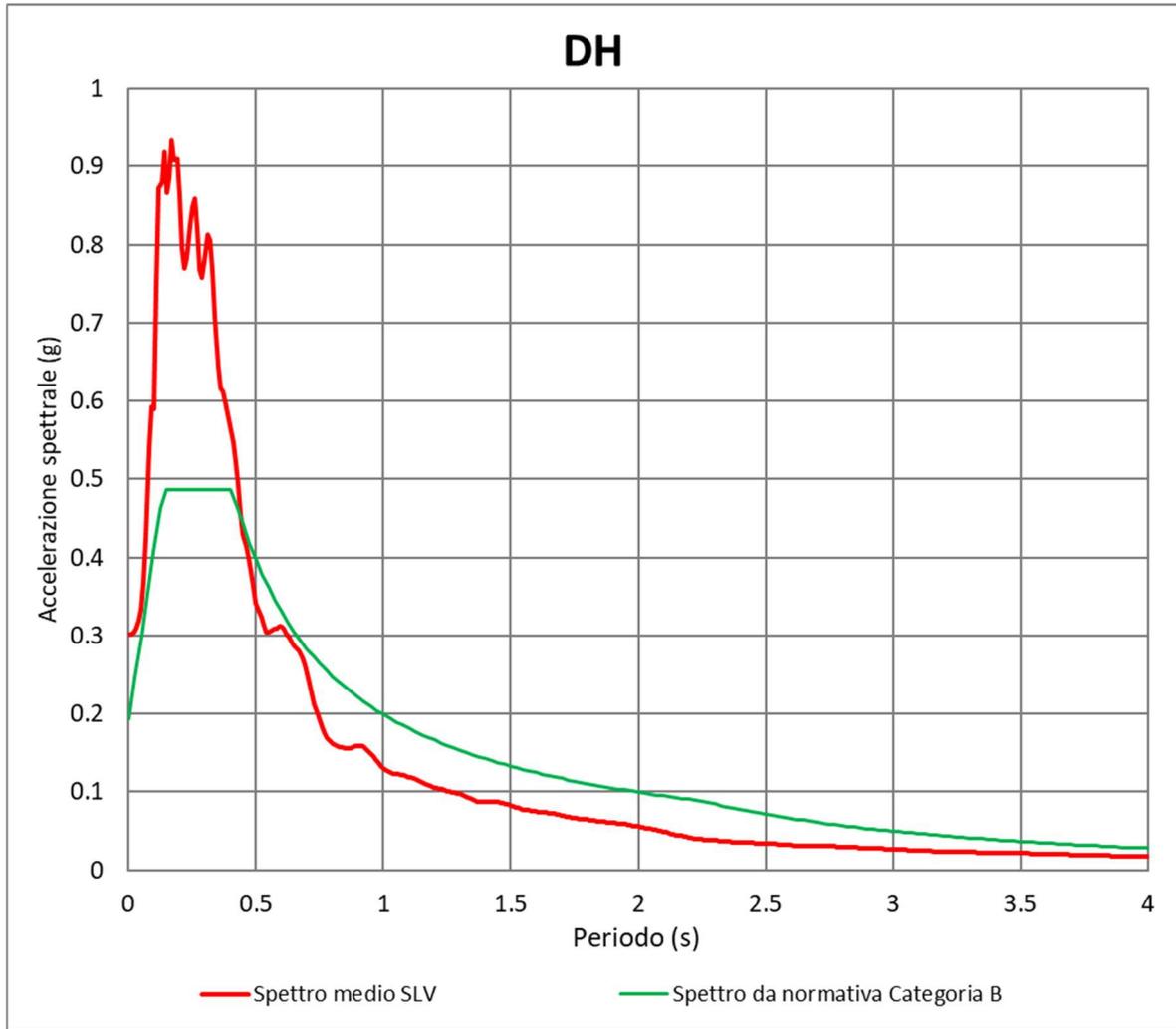


Fig. 26 – Confronto tra lo spettro medio in output in accelerazione per la verticale “SDH” e lo spettro di riferimento da normativa per la categoria di sottosuolo B

Fattore di amplificazione	Valore calcolato da RSL	Valore da abachi RER	Differenza (%)
$F_{A_{PGA}}$	1.84	2.00	-8.22%
$F_{A_{SA1\ 0.1-0.5}}$	1.37	2.20	-37.58%
$F_{A_{SA2\ 0.4-0.8}}$	1.15	1.50	-23.09%
$F_{A_{SA3\ 0.7-1.1}}$	1.73	1.90	-8.90%
$F_{H_{SI1\ 0.1-0.5}}$	1.83	2.20	-16.88%
$F_{H_{SI2\ 0.5-1.0}}$	1.38	1.80	-23.13%

Tab. 8 – Fattori di amplificazione calcolati per la verticale “SDH”

7.3.2 Verticale "Monte"

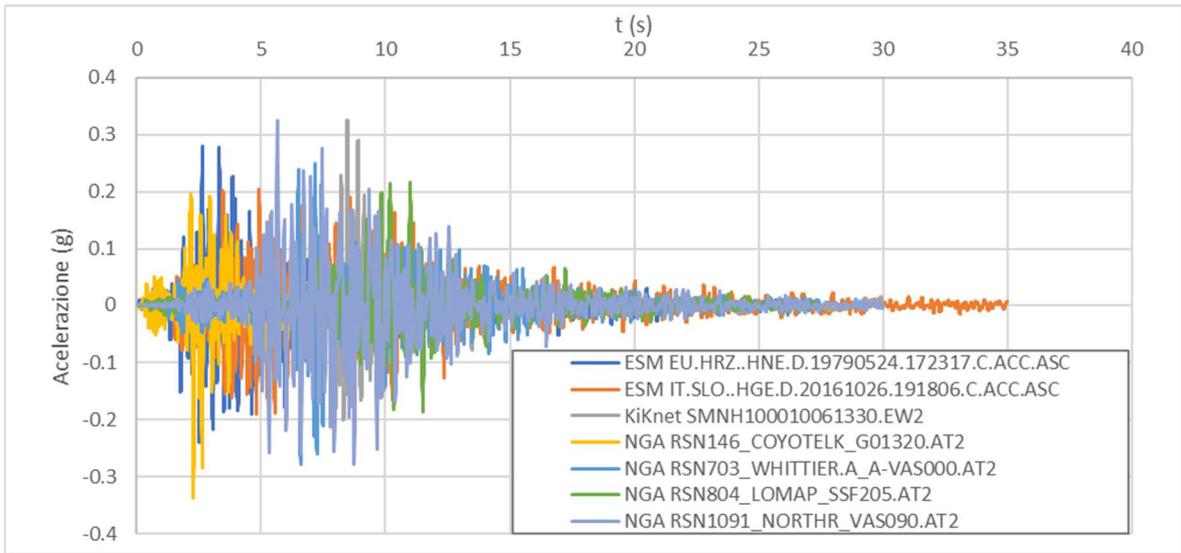


Fig. 27 – Accelerogrammi di output per la verticale "Monte"

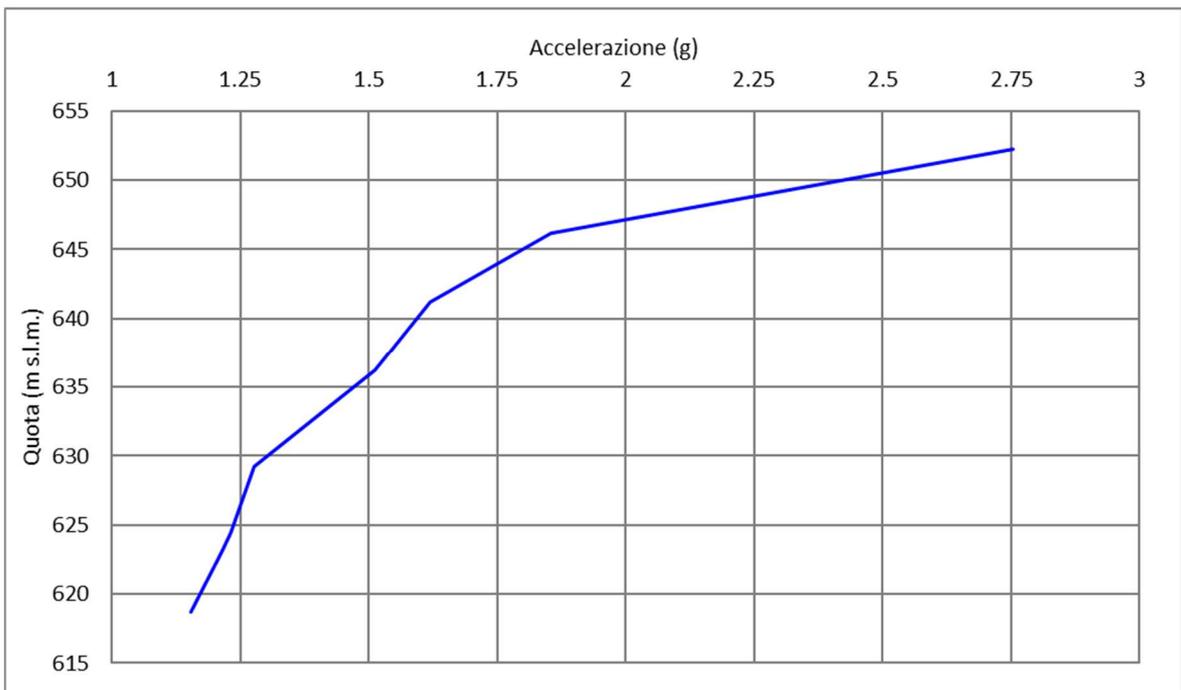


Fig. 28 – Curva di variazione dell'accelerazione con la profondità per la verticale "Monte"

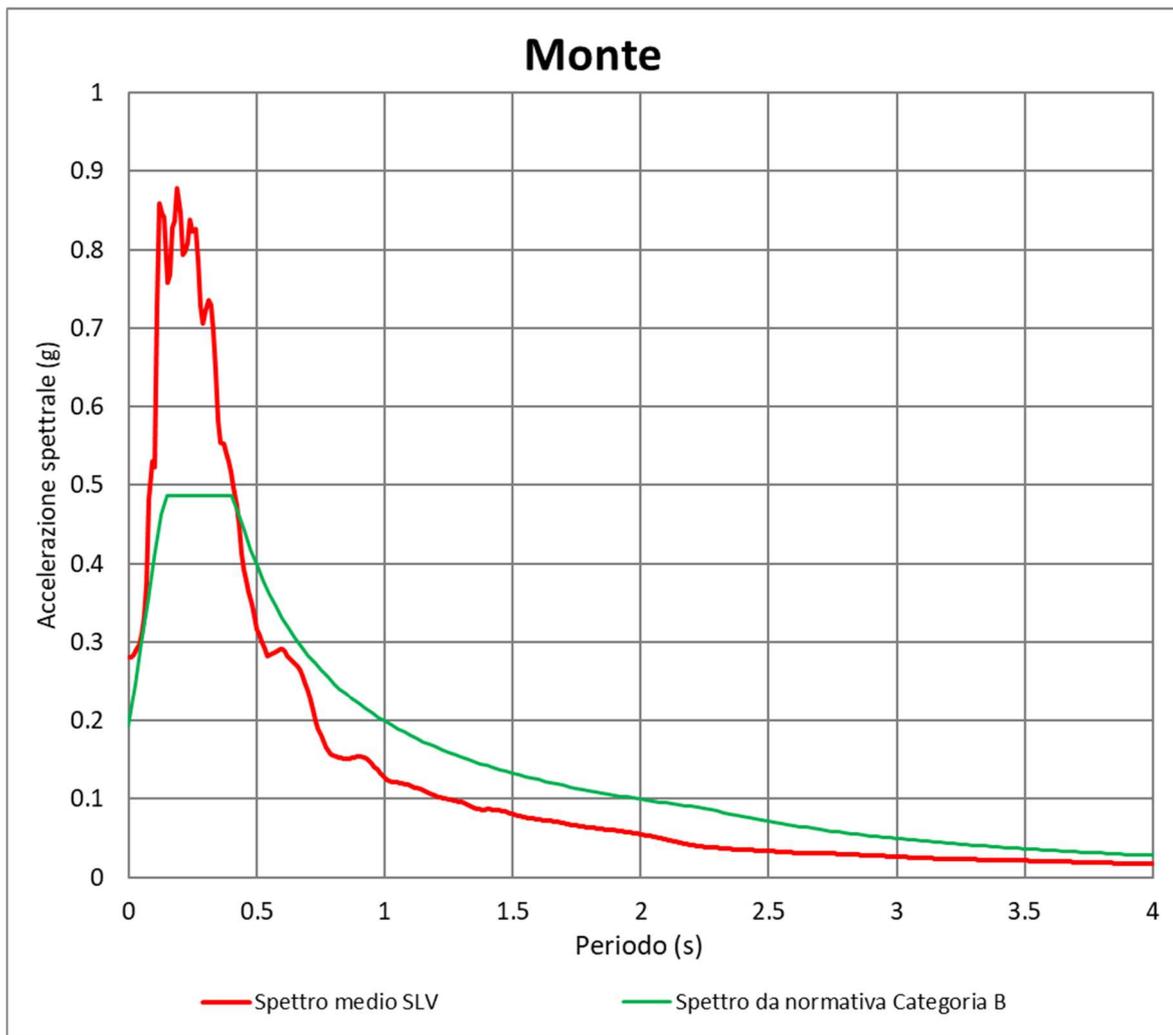


Fig. 29 – Confronto tra lo spettro medio in output in accelerazione per la verticale “Monte” e lo spettro di riferimento da normativa per la categoria di sottosuolo B

Fattore di amplificazione	Valore calcolato da RSL	Valore da abachi RER	Differenza (%)
FA_{PGA}	1.96	2.00	-1.79%
FA_{SA1 0.1-0.5}	1.48	2.20	-32.92%
FA_{SA2 0.4-0.8}	1.20	1.50	-20.33%
FA_{SA3 0.7-1.1}	1.87	1.90	-1.61%
FH_{SI1 0.1-0.5}	1.96	2.20	-10.95%
FH_{SI2 0.5-1.0}	1.47	1.80	-18.29%

Tab. 9 – Fattori di amplificazione calcolati per la verticale “Monte”

7.3.2 Verticale “Valle”

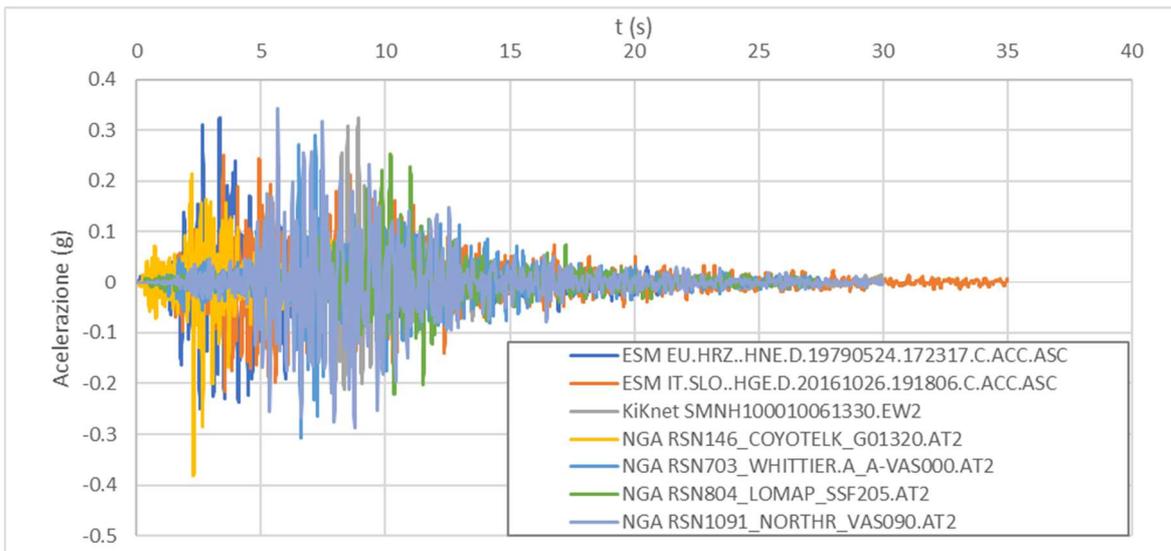


Fig. 30 – Accelerogrammi di output per la verticale “Valle”

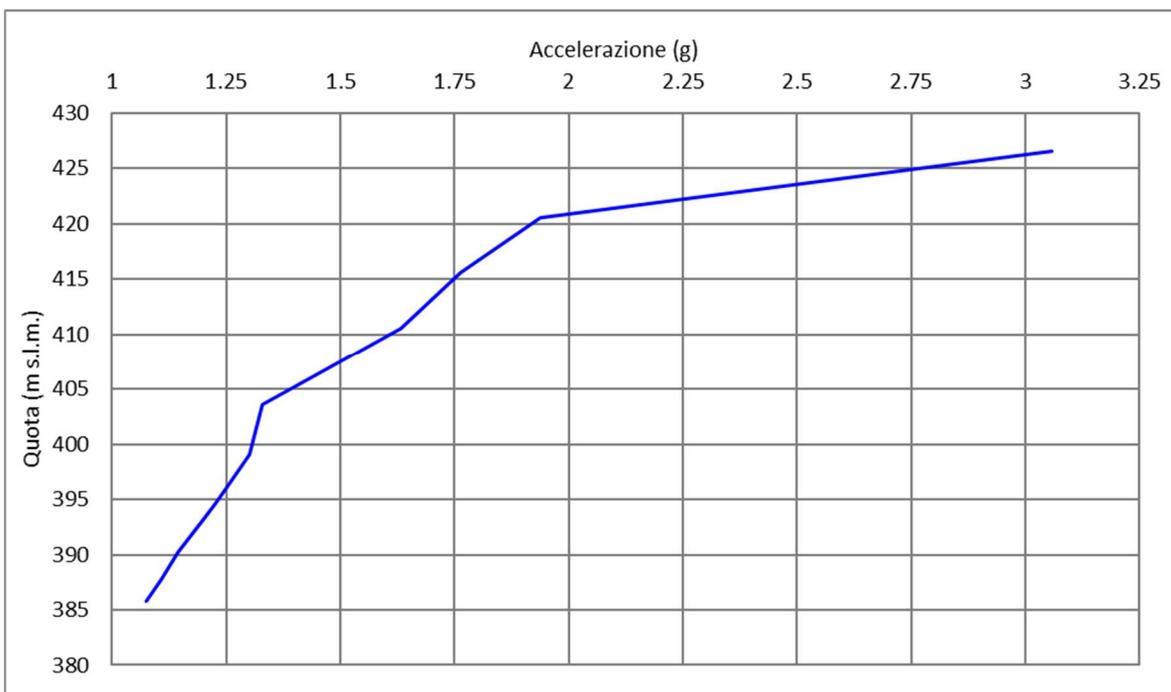


Fig. 31 – Curva di variazione dell'accelerazione con la profondità per la verticale “Valle”

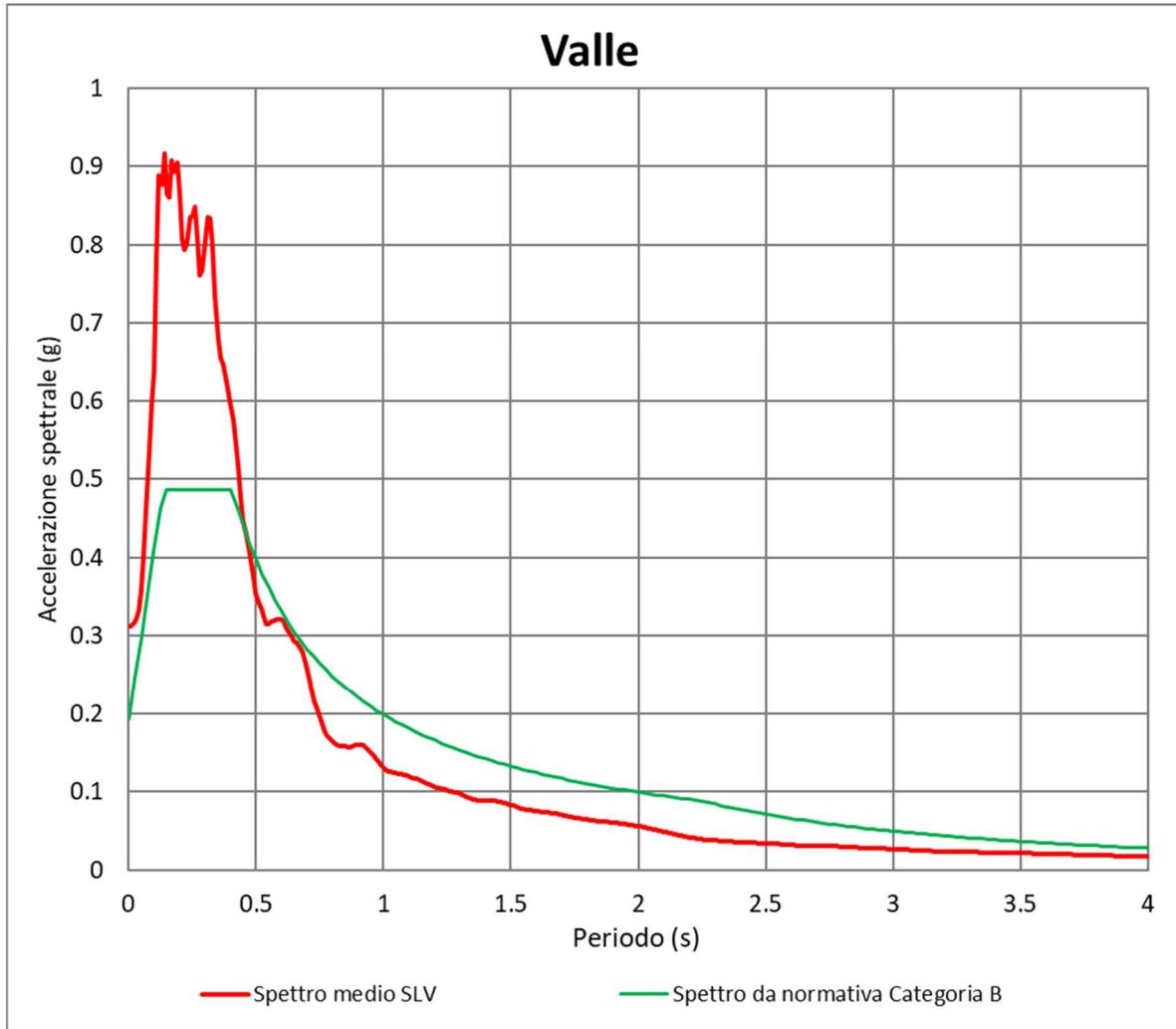


Fig. 32 – Confronto tra lo spettro medio in output in accelerazione per la verticale “Valle” e lo spettro di riferimento da normativa per la categoria di sottosuolo B

Fattore di amplificazione	Valore calcolato da RSL	Valore da abachi RER	Differenza (%)
FA_{PGA}	2.00	2.00	0.02%
FA_{SA1 0.1-0.5}	1.52	2.20	-30.70%
FA_{SA2 0.4-0.8}	1.21	1.50	-19.16%
FA_{SA3 0.7-1.1}	1.93	1.90	1.79%
FH_{SI1 0.1-0.5}	2.01	2.20	-8.84%
FH_{SI2 0.5-1.0}	1.50	1.80	-16.81%

Tab. 10 – Fattori di amplificazione calcolati per la verticale “Valle”

8. STABILITÀ DI VERSANTE

Sull'areale di Cavola, oltre all'analisi di riposta sismica locale illustrata nel capitolo precedente, è stata eseguita l'analisi di stabilità di versante come di seguito descritto.

8.1 Metodo di verifica

La valutazione dei fattori di sicurezza alla stabilità è stata condotta mediante il programma di calcolo SLOPE 2022 della GEOSTRU. In particolare, in questa sede si è fatto riferimento al metodo di Janbu, che prevede l'utilizzo di superfici di scivolamento di forma qualsiasi.

Il metodo di Janbu 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_i 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. 33

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	54 di 83

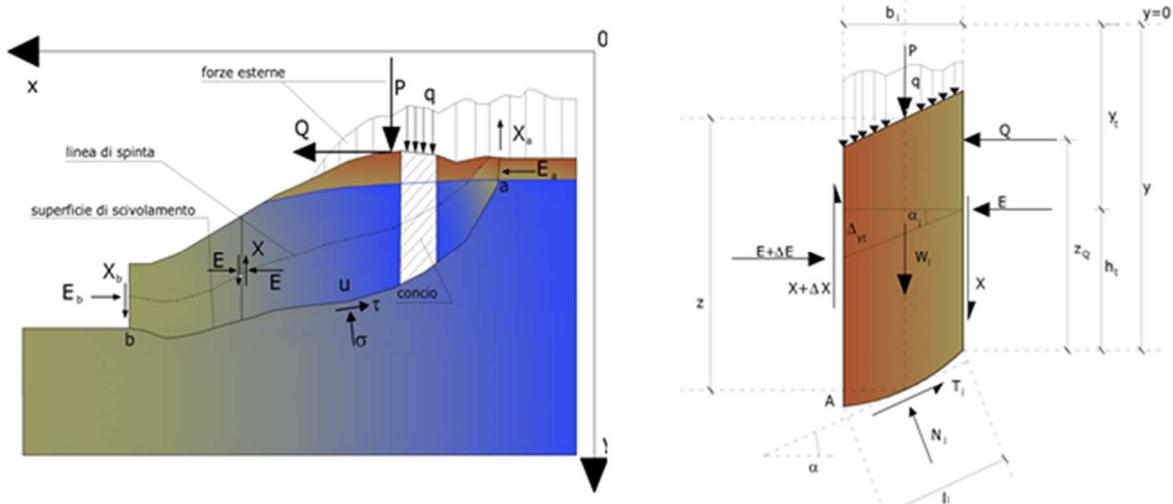


Fig. 33 – Azioni sul concio i-esimo secondo le ipotesi di Janbu e rappresentazione d'insieme dell'ammasso

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. 34). Tale correzione è molto attendibile per pendii poco inclinati.

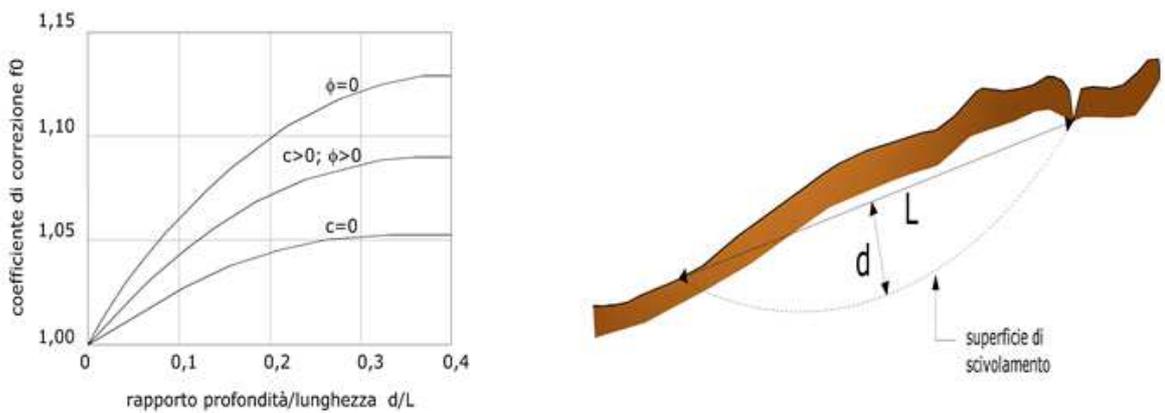


Fig. 34 – Correzione del fattore di sicurezza in funzione della forma della frana e dei parametri geotecnici

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_v) variano con le caratteristiche

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. 35).

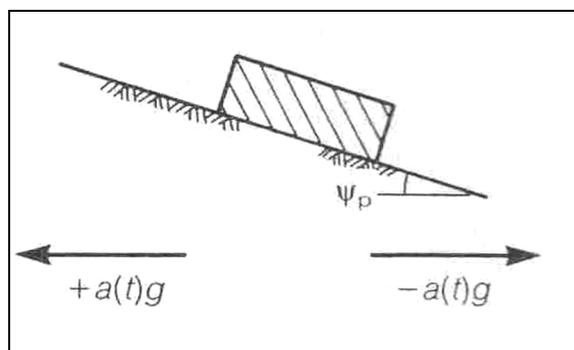


Fig. 35 – Schematizzazione del metodo di *Newmark*

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. 36).

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	56 di 83

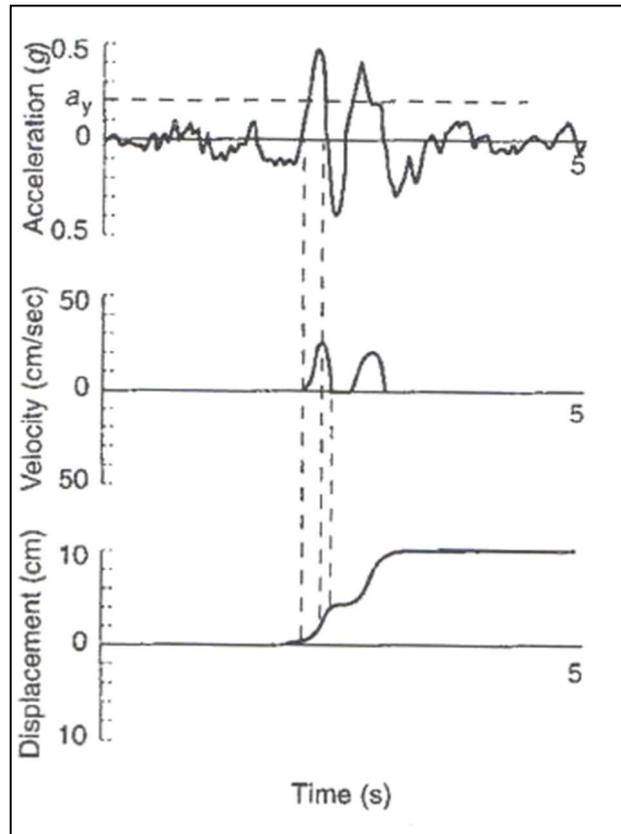


Fig. 36 – Esempificazione della metodologia di *Newmark*, con doppia integrazione dell’accelerogramma

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.

8.2 Ipotesi verificate

Le verifiche sono state effettuate per la zona di attenzione per instabilità di versante identificata a Cavola di Toano nella Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica.

Lo spessore del corpo di frana e la posizione della superficie di scorrimento sono quelle descritte nel paragrafo 7.1.4.

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	57 di 83

STUDIO DI MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO 3

La coltre franosa, indagata attraverso il sondaggio a carotaggio continuo appositamente eseguito (Fig. 37), presenta uno spessore di oltre 40,00 metri, come accertato attraverso sondaggi pregressi, ed è costituita da elementi lapidei arenacei dispersi in una matrice argilloso-limosa. All'interno dell'ammasso sono stati rinvenuti resti vegetali arborei e arbustivi a varie quote e anche nella parte terminale del foro.

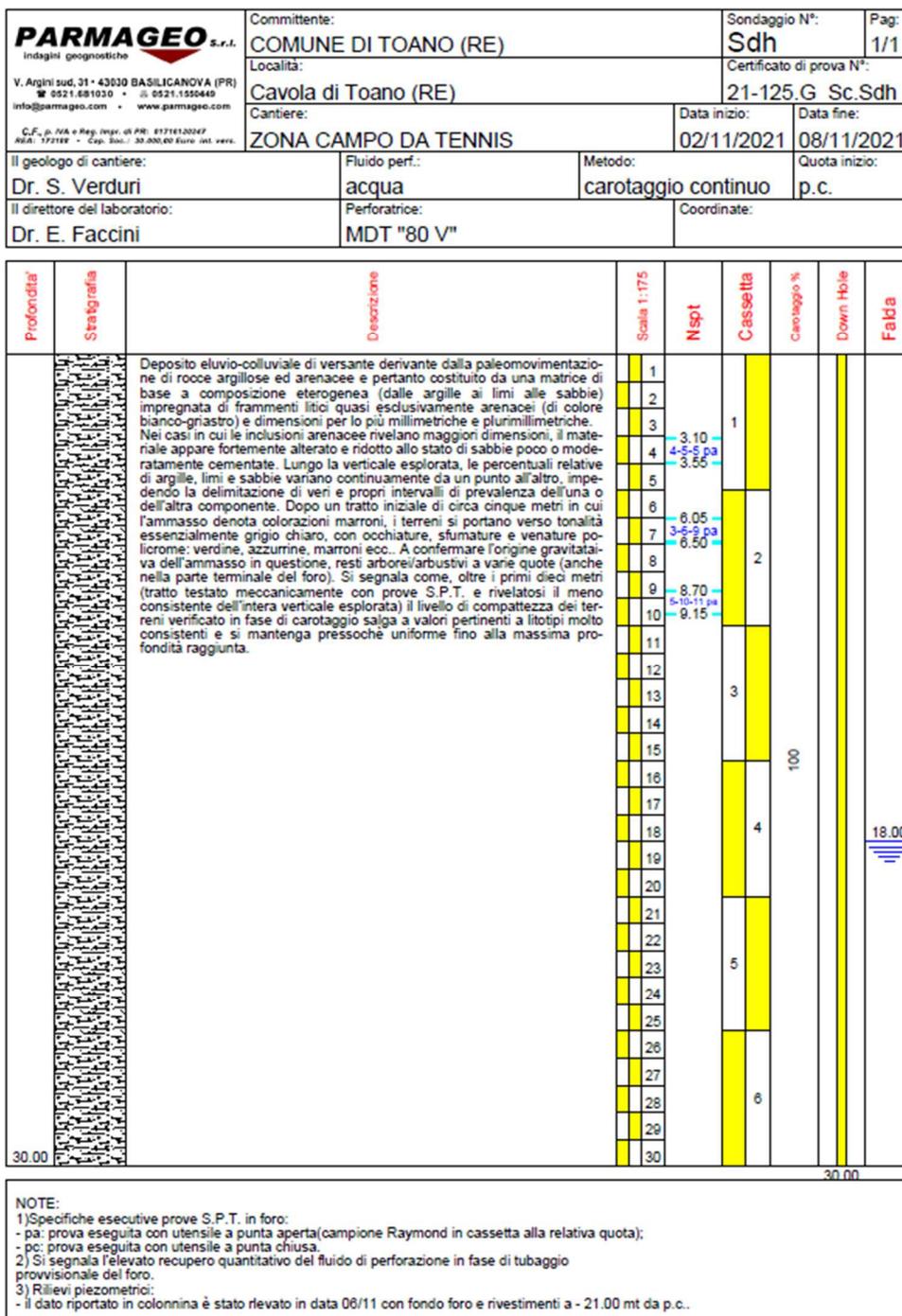


Fig. 37 – Stratigrafia del sondaggio a carotaggio continuo eseguito sul corpo di frana

Le dimensioni e la complessità dell'ammasso franoso non hanno consentito, anche in relazione ai fondi disponibili, di effettuare le indagini che l'Allegato A3 punto C) della DGR 476/2021 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. 38).

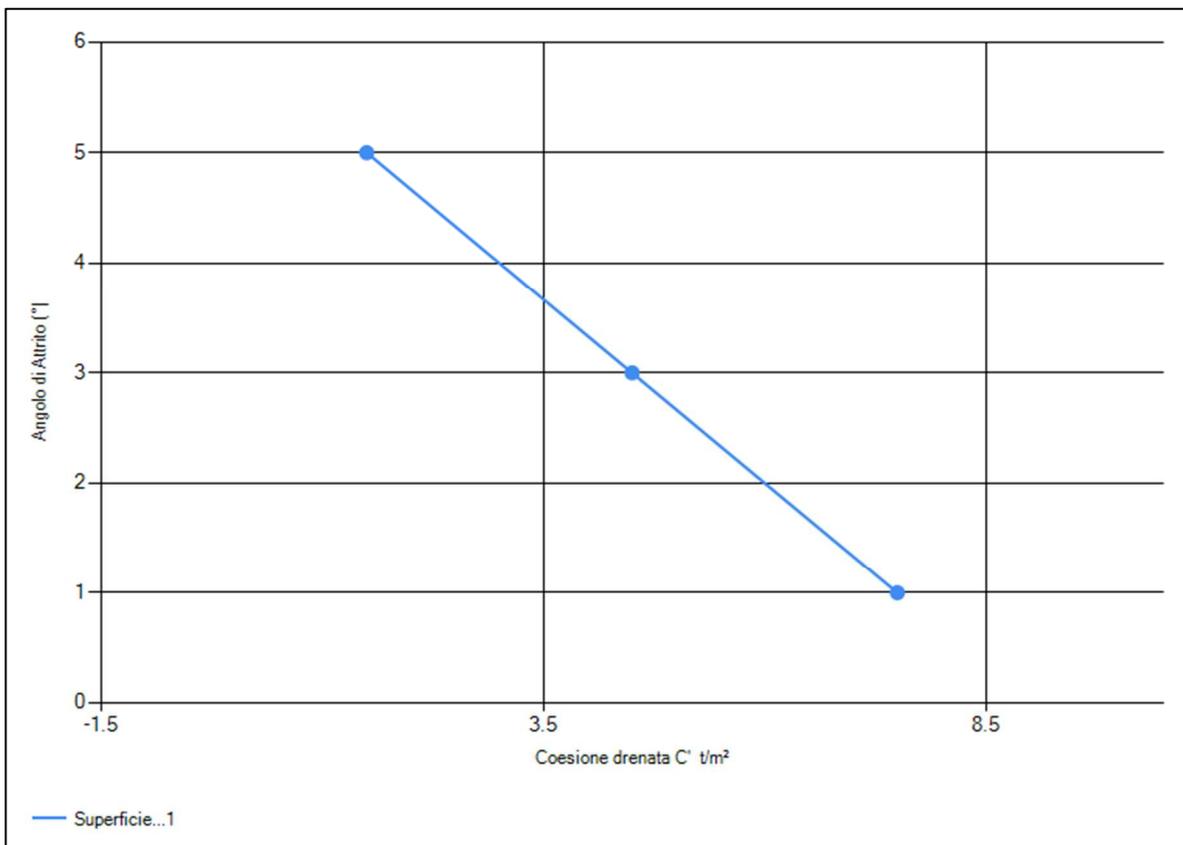


Fig. 38 – Esempio *Back analysis* per la frana di Cavola di Toano

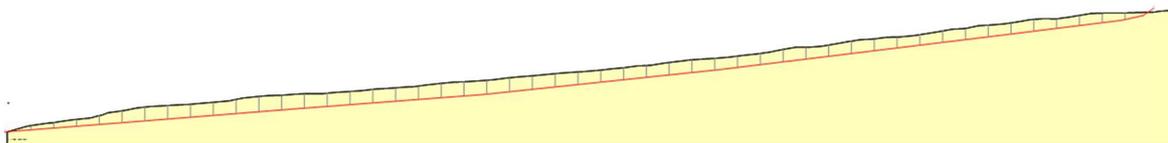


Fig. 39 – Sezione analizzata con suddivisione in conci del corpo di frana

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

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	59 di 83

La verifica dinamica è stata effettuata per tre dei sette accelerogrammi di output ottenuto dall’analisi RSL, quindi opportunamente scalati secondo le caratteristiche del sito (cfr. § 6.1.5).

Nella seguente Tab. 11 sono riportati gli spostamenti massimi in cm, calcolati per ciascuno dei tre accelerogrammi.

Accelerogramma	Spostamento massimo
NGA RSN1091_NORTHR_VAS090.AT2	4.19 cm
ESM EU.HRZ..HNE.D.19790524.172317.C.ACC.ASC	2.99 cm
KiKnet SMNH100010061330.EW2	2.45 cm

Tab. 11 – Spostamento massimo calcolato per i tre accelerogrammi

Di seguito si riportano i grafici dei sismi analizzati con indicati in rosso i punti con accelerazione superiore all’accelerazione critica che determinano spostamento.

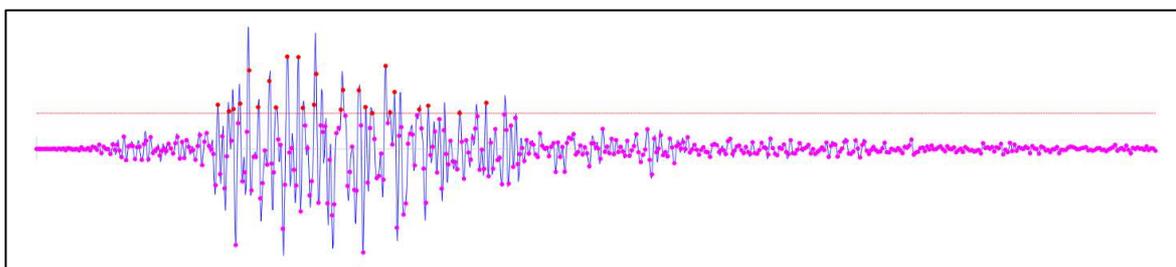


Fig. 40 – Analisi dinamica: accelerogramma NGA RSN1091_NORTHR_VAS090.AT2

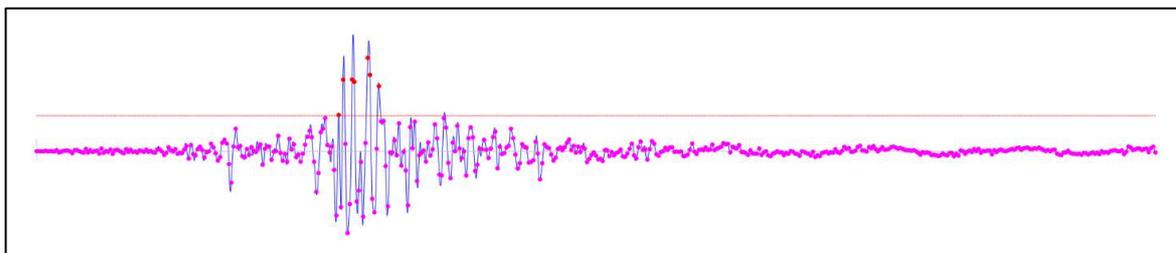


Fig. 41 – Analisi dinamica: accelerogramma KiKnet SMNH100010061330.EW2

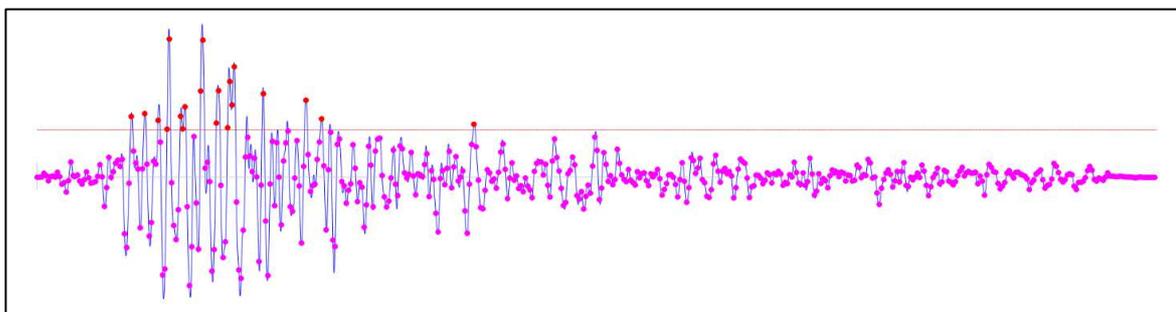


Fig. 42 – Analisi dinamica: accelerogramma ESM EU.HRZ..HNE.D.19790524.172317.C.ACC.ASC

In Fig. 43 si riporta il risultato del caso più critico, relativo all'accelerogramma NGA RSN1091_NORTHR_VAS090.AT2.

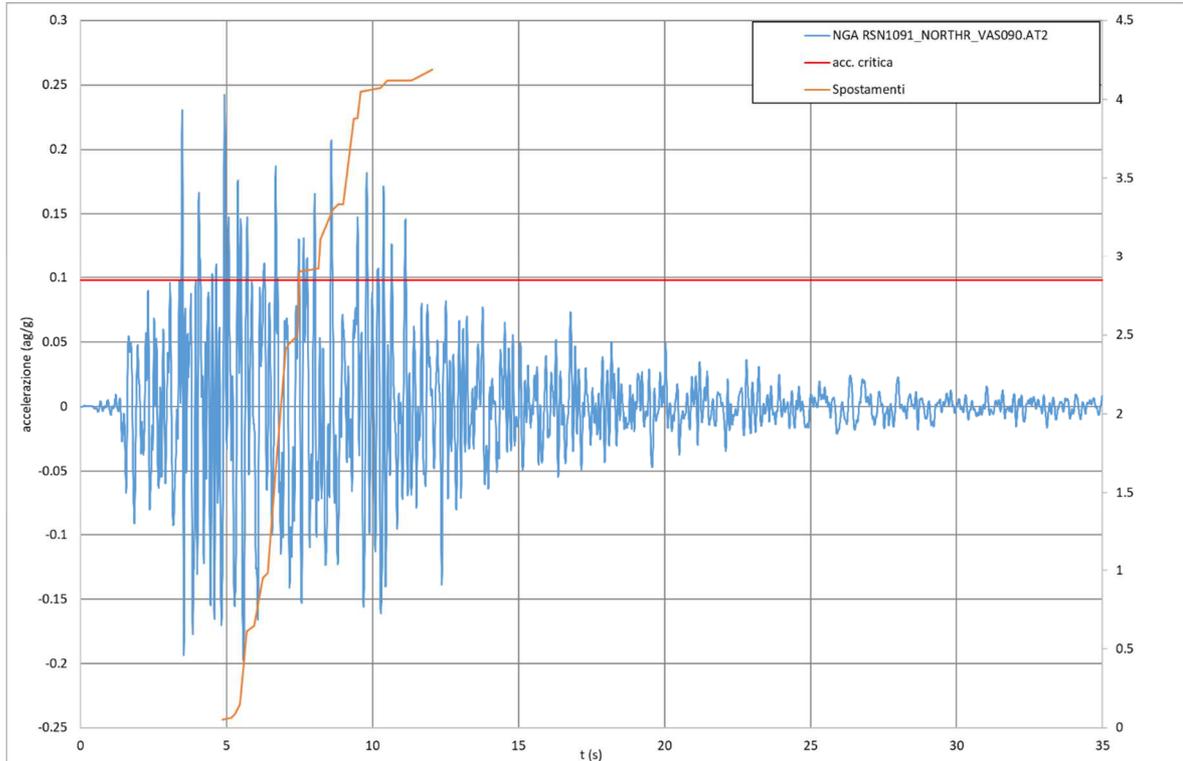


Fig. 43 – Risultati della verifica dello spostamento della frana di Cavola di Toano per $F_s=1$ per il sisma NGA RSN1091_NORTHR_VAS090.AT2

9. ELABORATI CARTOGRAFICI

9.1 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. 44).

	Sondaggio a carotaggio continuo
	Sondaggio a distruzione di nucleo
	Prova sismica in foro tipo Downhole
	Sondaggio con inclinometro
	Prova penetrometrica in foro (SPT)
	Trincea o pozzetto esplorativo
	Prova penetrometrica statica con punta meccanica
	Prova penetrometrica dinamica superpesante
	Prova penetrometrica dinamica pesante
	Prova penetrometrica dinamica media
	Stazione microtremore a stazione singola
	Stratigrafia zona MS (teorica)
	MASW
	Profilo sismico a rifrazione
	Tomografia elettrica

Fig. 44 – 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 dove sono state indirizzate le analisi, ma ugualmente utili a definire le caratteristiche litostratigrafiche e/o geofisiche dei terreni.

9.2 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.

La legenda della carta geologico-tecnica è la seguente (Fig. 45):



Fig. 45 – Legenda della Carta geologico tecnica

L'assetto giaciturale e strutturale delle formazioni geologiche è rappresentato dalla sezione geologica rappresentata nella Fig. 47, la cui traccia è riportata nella carta geologico-tecnica e la cui ubicazione viene riproposta nella Fig. 46

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	63 di 83

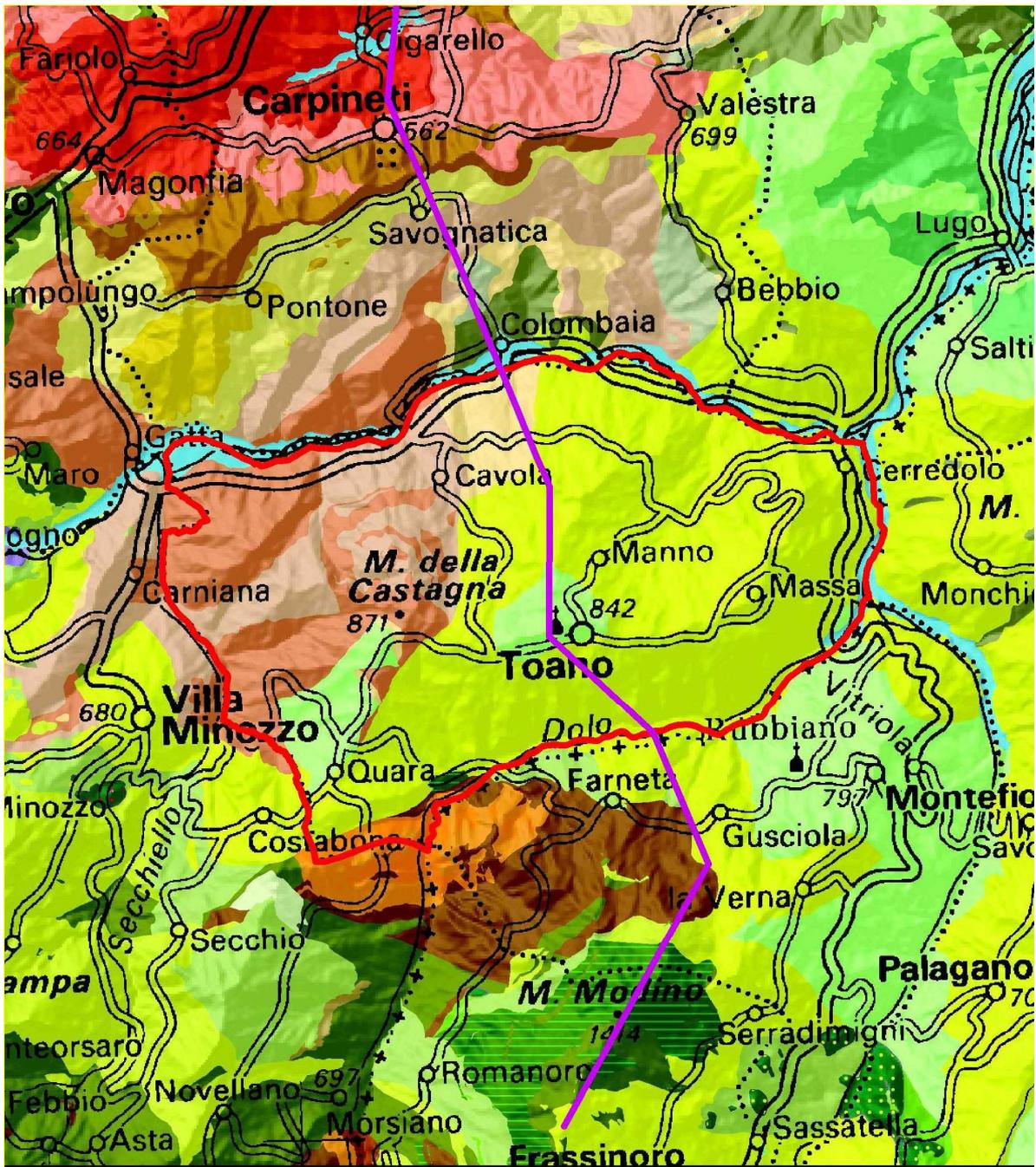


Fig. 46 – Ubicazione della sezione geologica interpretativa

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	64 di 83

STUDIO DI MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO 3

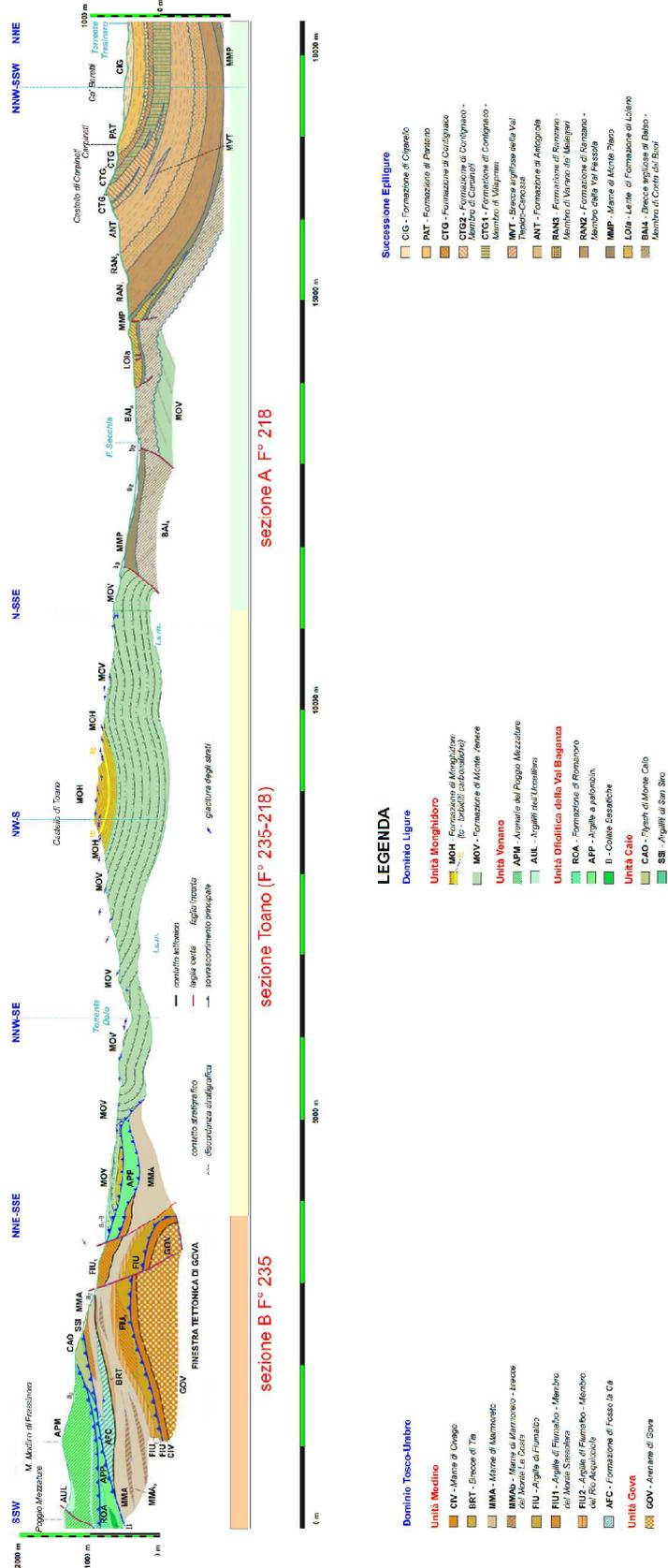


Fig. 47 – Sezione geologica (elaborazione: dott. Maurizio Andreozzi)

 <p>Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti</p>	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	65 di 83

9.3 Carta delle frequenze naturali dei terreni

Sulla base di tutti i dati tomografici disponibili integrati con quelli 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.

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

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	66 di 83

frequenza picco significativo (Hz)	ampiezza picco			spessore atteso (m)
	$1,5 \leq \text{HVSr} < 2$	$2 \leq \text{HVSr} < 3$	$\text{HVSr} \geq 3$	
$F_0 \leq 0,6$				> 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 frequenze relative al primo picco significativo (in rosso) e al secondo picco (in blu) se presente

Fig. 48 – Legenda della Carta delle frequenze

9.4 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. 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. In queste zone 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. 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 comunale) e densificazione. In queste zone sono richiesti approfondimenti di terzo livello.

Le zone stabili sono state individuate dove affiora il substrato lapideo e risultano particolarmente estese in corrispondenza del settore centro-orientale del territorio comunale. Le aree che presentano maggiore estensione sono caratterizzate da

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	67 di 83

alternanza di litotipi (Formazione di Monte Venere) e, in percentuale residuale, da substrato lapideo (Marne di Civago).

La categoria delle zone stabili suscettibili di amplificazioni locali è rappresentata in particolare nel settore occidentale del territorio comunale, nell'areale del Capoluogo e lungo i fondovalle di Secchia, Secchiello ed Ozola.

All'interno di questa categoria sono state operate ulteriori distinzioni. Infatti, sulla base delle caratteristiche litostratimetriche, sono stati identificate 8 microzone omogenee ognuna con un proprio profilo stratigrafico tipo (cfr. Fig. 49):

- 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 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 s.l., a granulometria prevalentemente argillosa e spessore medio pari a circa 5,00 m;
- Zona 4 - Successione stratigrafica costituita da substrato geologico rigido ($V_s > 800$ m/s), ricoperto da depositi di versante s.l., a granulometria prevalentemente argillosa e spessore medio pari a circa 5,00 m;
- Zona 5 - Successione stratigrafica costituita da un orizzonte superficiale ghiaioso con ridotta copertura fine, dello spessore di 5÷10 m, che ricopre un substrato geologico di tipo non rigido ($V_s < 800$ m/s);
- 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 insufficienza di dati litostratimetrici;
- Zona 7 - Successione stratigrafica costituita da un orizzonte superficiale ghiaioso con ridotta copertura fine, dello spessore medio di 5 m, che ricopre un substrato geologico di tipo rigido ($V_s > 800$ m/s);

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	68 di 83

- 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 insufficienza di dati litostratimetrici;

In Fig. 49 sono rappresentate le colonne stratigrafiche sintetiche che caratterizzano le MOPS delle zone stabili suscettibili di amplificazioni locali.

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	69 di 83

STUDIO DI MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO 3

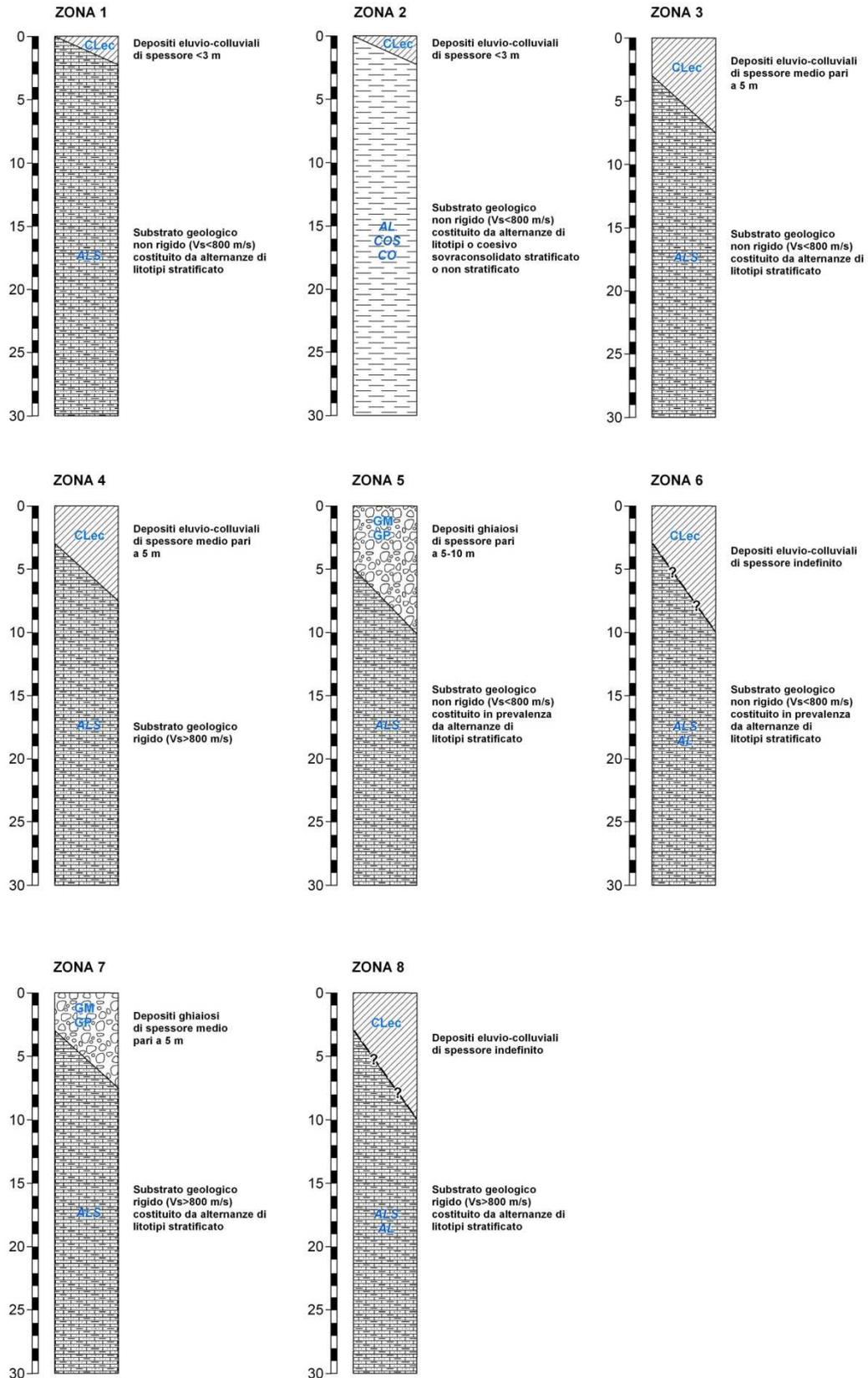


Fig. 49 - Colonne stratigrafiche sintetiche relative alle zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	70 di 83

Per le zone di attenzione per instabilità sono state cartografate altre 7 zone, riconducibili a fenomeni di instabilità di versante attivi e quiescenti come di seguito descritte (cfr. Fig. 50):

- ZAFR - Zona di Attenzione per instabilità di versante - Zona 9. Coltre di spessore <7,5 m, costituita da materiali prevalentemente argilloso-limosi con frammenti lapidei eterometrici, sovrastante ad un substrato di tipo non rigido ($V_s < 800$ m/s);
- ZAFR - Zona di Attenzione per instabilità di versante - Zona 10. Coltre di spessore <7,5 m, costituita da materiali prevalentemente argilloso-limosi con frammenti lapidei eterometrici, sovrastante ad un substrato di tipo rigido ($V_s > 800$ m/s);
- ZAFR - Zona di Attenzione per instabilità di versante - Zona 11. Coltre di spessore compreso tra 7,5 e 15 m, costituita da materiali prevalentemente argilloso-limosi con frammenti lapidei eterometrici, sovrastante un substrato di tipo rigido ($V_s > 800$ m/s);
- ZAFR - Zona di Attenzione per instabilità di versante - Zona 12. Coltre di spessore > 15 m, costituita da materiali prevalentemente argilloso-limosi con frammenti lapidei eterometrici, sovrastante un substrato di tipo non rigido ($V_s < 800$ m/s);
- ZAFR - Zona di Attenzione per instabilità di versante - Zona 13. Coltre di spessore > 15 m, costituita da materiali prevalentemente argilloso-limosi con frammenti lapidei eterometrici, sovrastante un substrato di tipo rigido ($V_s > 800$ m/s);
- ZAFR - Zona di Attenzione per instabilità di versante - Zona 14. Corpo di frana di spessore non definibile per insufficienza 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 15. Corpo di frana di spessore non definibile per insufficienza 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	Luglio 2022	0	71 di 83

STUDIO DI MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO 3

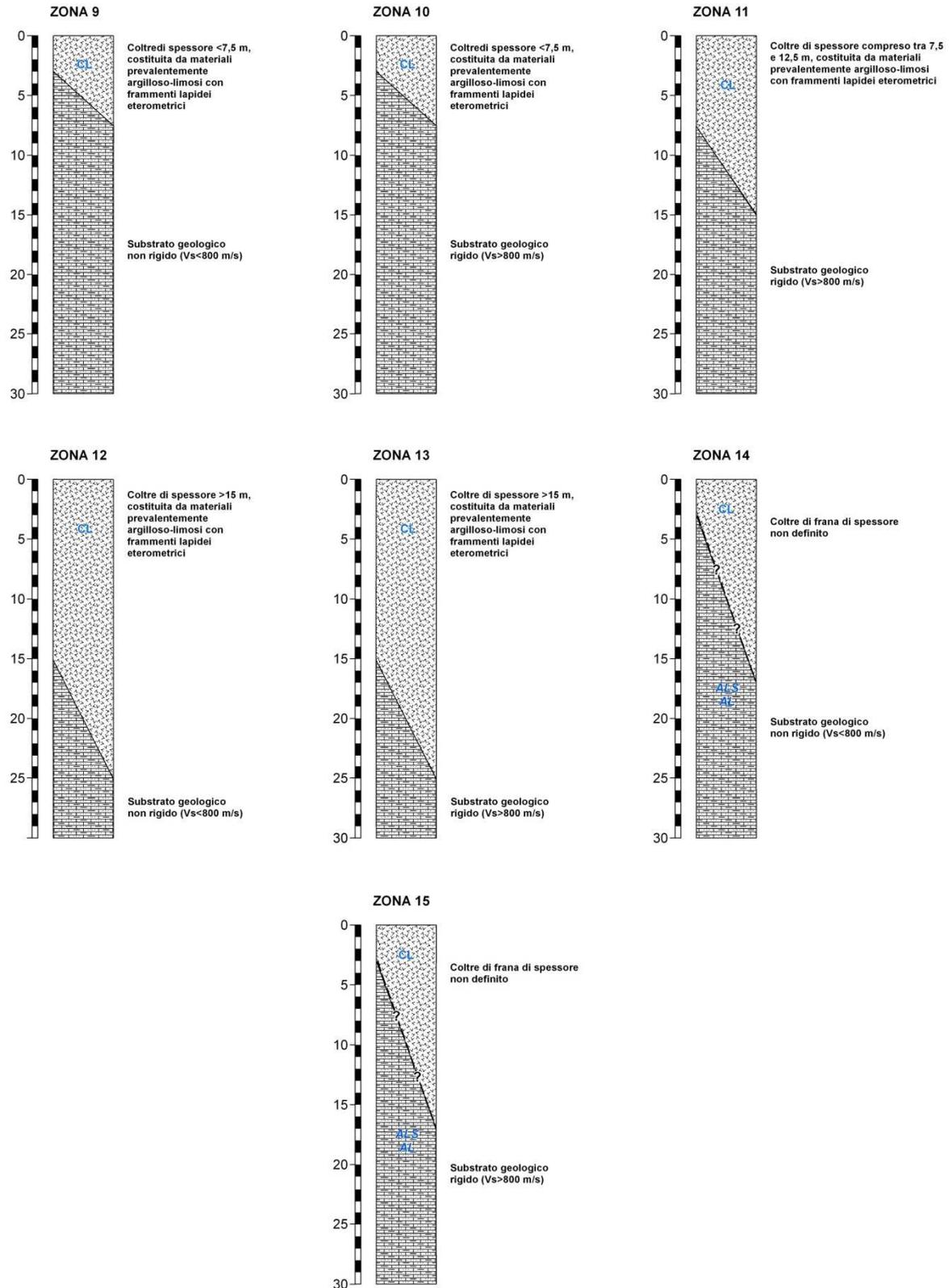


Fig. 50 - Colonne stratigrafiche sintetiche relative alle zone di attenzione per instabilità di versante

Infine nella carta delle MOPS sono state riportate le conoidi alluvionali quali forme di superficie e sepolte e le tracce per gli approfondimenti delle amplificazioni topografiche.

9.5 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).

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 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*);

o di V_{s30} (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. 51 si riporta uno stralcio della legenda di tale elaborato cartografico:

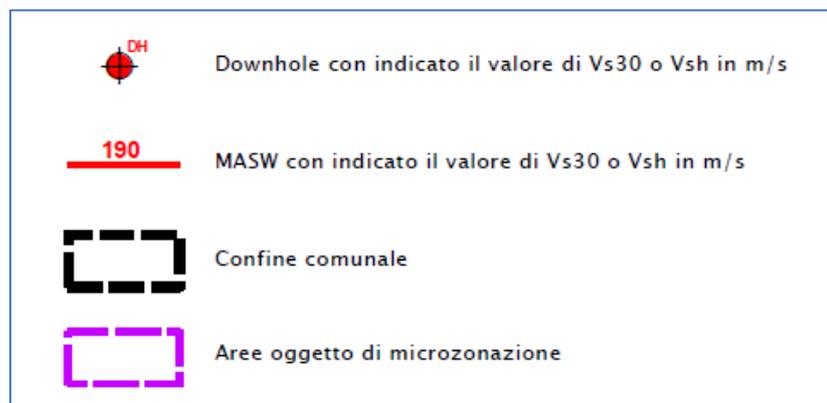


Fig. 52 – Legenda della Carta delle velocità delle onde di taglio S

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	73 di 83

9.6 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 $0,7s \leq T \leq 1,1s$;
- $FH = SI/SI_0$, 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 $0,5s \leq T \leq 1,0s$.

Per le aree sottoposte ad analisi di secondo livello i valori dei fattori di amplificazione (FA) sono stati ricavati dalle tabelle allegate alla DGR 12 aprile 2021, n. 476 della Regione Emilia-Romagna.

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

Per la zona di suscettibilità per instabilità di Cavola, sottoposta ad analisi di Livello 3, i fattori di amplificazione sono stati viceversa determinati attraverso l'analisi di risposta sismica locale descritta nel Cap. 7. Inoltre per queste zone è indicato anche lo spostamento massimo atteso (FRT) stimato attraverso l'analisi di stabilità del versante (Cap. 8).

In Fig. 53 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	Luglio 2022	0	74 di 83

STUDIO DI MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO 3

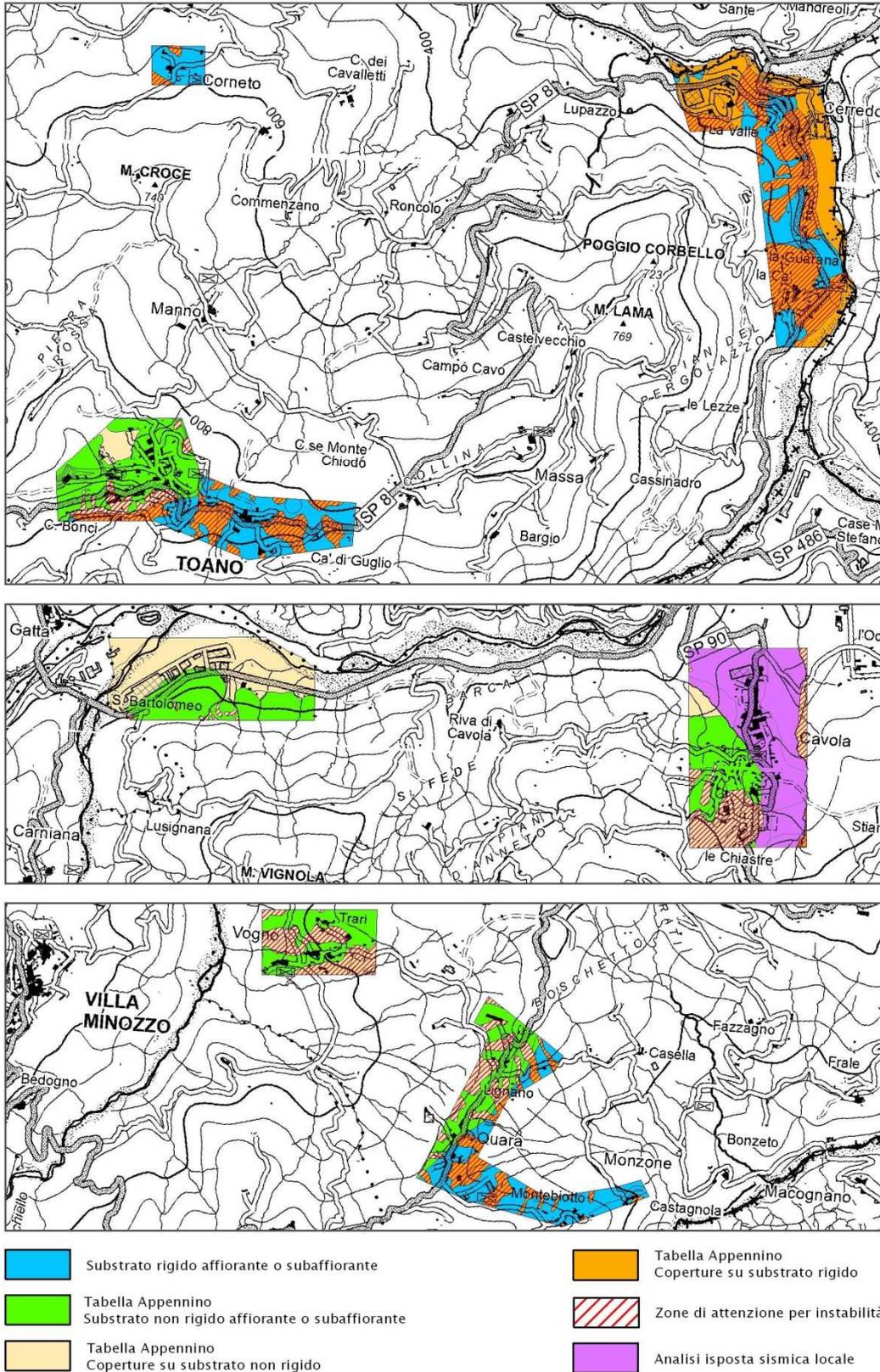


Fig. 53 - Suddivisione delle zone in base alle tabelle allegate alla DGR n. 476/2021 utilizzate per la determinazione dei fattori di amplificazione

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	75 di 83

STUDIO DI MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO 3

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

STUDIO DI MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO 3

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	1,0	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	1,7	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 SA1 (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	1,2	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)

Tab. 13 – Tabella da utilizzare per la stima di F.A., in termini di PGA, SA e SI, nel caso di substrato marino rigido con $V_s > 800$ m/s con sovrastanti depositi di copertura maggiori di 2,5 metri (da Allegato 2 degli indirizzi regionali)

STUDIO DI MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO 3

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	2,0	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	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	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)

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	1,4	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	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)

Tab. 14 – Tabella da utilizzare per la stima di F.A., in termini di PGA, SA e SI, nel caso di substrato marino non rigido con Vs <<800 m/s con sovrastanti depositi di copertura maggiori di 2,5 metri (da Allegato 2 degli indirizzi regionali)

La Tab. 15 riporta i Fattori di Amplificazione determinati secondo la DGR 12 aprile 2021, n. 476 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	SI 0,1-0,5 S	SI 0,5-1,0 S
STAB	2001	Appennino - Substrato affiorante con Vs <<800 m/s	Vs30 = 450	RAN1, RAN2, RAN2a, RAN3	1,6	1,6	1,5	1,3	1,6	1,4
	2001	Appennino - Substrato affiorante con Vs <<800 m/s	Vs30 = 500	MOH	1,4	1,4	1,4	1,3	1,4	1,4
	2003	Appennino - Substrato con Vs <<800 m/s	Vs5 = 200		2,0	1,8	1,4	1,3	1,7	1,4
	2004	Appennino - Substrato con Vs >800 m/s	Vs5 = 200		1,7	1,4	1,0	1,0	1,2	1,0
	2005	Appennino - Substrato con Vs <<800 m/s	Vs10 = 400		1,4	1,4	1,4	1,3	1,4	1,4
	2007	Appennino - Substrato con Vs >800 m/s	Vs5 = 300		1,2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
INSTAB	2009	Appennino - Substrato con Vs <<800 m/s	Vs5 = 200		2,0	1,8	1,4	1,3	1,7	1,4
	2010	Appennino - Substrato con Vs >800 m/s	Vs5 = 200		1,7	1,4	1,0	1,0	1,2	1,0
	2010	Appennino - Substrato con Vs >800 m/s	Vs5 = 300		1,2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	2011	Appennino - Substrato con Vs <<800 m/s	Vs10 = 200		2,2	2,3	1,8	1,5	2,3	1,6
	2012	Appennino - Substrato con Vs >800 m/s	Vs10 = 350		1,5	1,2	1,0	1,0	1,1	1,0
	2012	Appennino - Substrato con Vs >800 m/s	Vs15 = 300		1,9	1,8	1,1	1,0	1,7	1,0
	2013	Appennino - Substrato con Vs <<800 m/s	Vs25 = 350		1,9	2,0	1,7	1,4	2,0	1,5
	2014	Appennino - Substrato con Vs >800 m/s	Vs20 = 300		2,0	2,0	1,4	1,1	2,0	1,2
		RSL		Cavola	1,84	1,37	1,15	1,73	1,83	1,38

Tab. 15 – Fattori di Amplificazione

Dal momento che alcuni settori degli abitati di Toano e di Montebiotto-Castagnola ricadono in contesti morfologici caratterizzati da pendii di altezza > 30 m e con inclinazione media > 15°, sono state eseguite le verifiche al fine di valutare l'amplificazione dell'impulso sismico generata dalle condizioni topografiche (Fig. 54 e 55).

STUDIO DI MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO 3



Fig. 54 – Ubicazione tracce sezioni topografiche Toano

Infine sono state prodotte le carte dello scuotimento in accelerazione, che rappresenta lo scuotimento atteso al sito in valore assoluto (accelerazione in unità di misura “g”).

Tale scuotimento è 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.

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

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

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	82 di 83

10. ELENCO ELABORATI

- Relazione illustrativa
- Carta delle indagini (Tav. A – Tav. B) in scala 1:3.000
- Carta geologico-tecnica in scala 1:10.000
- Carta delle frequenze naturali dei terreni in scala 1:10.000
- Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica in scala 1:10.000
- Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs) in scala 1:10.000
- 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_{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 – H_{SM} in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica – H_{0,4 - 0,8s} in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - H_{0,7 - 1,1s} in scala 1:5.000

Allegato n° 1 – Indagini integrative

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	83 di 83

ALLEGATO 1

INDAGINI INTEGRATIVE

 Studio di geologia Dott. Stefano Castagnetti	Elaborato	Data	Agg.	Pag.
	RELAZIONE ILLUSTRATIVA	Luglio 2022	0	

PARMAGEO S.r.l. indagini geognostiche V. Argini sud, 31 • 43030 BASILICANOVA (PR) ☎ 0521.681030 • 📠 0521.1550449 info@parmageo.com • www.parmageo.com C.F., p. IVA e Reg. Impr. di PR: 01716130347 REA: 173188 • Cap. Soc.: 30.000,00 Euro int. vers.	Committente: COMUNE DI TOANO (RE)		Sondaggio N°: Sdh	Pag: 1/1	
	Località: Cavola di Toano (RE)		Certificato di prova N°: 21-125.G Sc.Sdh		
	Cantiere: ZONA CAMPO DA TENNIS		Data inizio: 02/11/2021	Data fine: 08/11/2021	
	Il geologo di cantiere: Dr. S. Verduri		Fluido perf.: acqua	Metodo: carotaggio continuo	
Il direttore del laboratorio: Dr. E. Faccini		Perforatrice: MDT "80 V"		Quota inizio: p.c.	
				Coordinate:	

Profondita'	Stratigrafia	Descrizione	Scala 1:175	Nspt	Cassetta	Carotaggio %	Down Hole	Falda	
30.00		<p>Deposito eluvio-colluviale di versante derivante dalla paleomovimentazione di rocce argillose ed arenacee e pertanto costituito da una matrice di base a composizione eterogenea (dalle argille ai limi alle sabbie) impregnata di frammenti litici quasi esclusivamente arenacei (di colore bianco-griastro) e dimensioni per lo più millimetriche e plurimillimetriche. Nei casi in cui le inclusioni arenacee rivelano maggiori dimensioni, il materiale appare fortemente alterato e ridotto allo stato di sabbie poco o moderatamente cementate. Lungo la verticale esplorata, le percentuali relative di argille, limi e sabbie variano continuamente da un punto all'altro, impedendo la delimitazione di veri e propri intervalli di prevalenza dell'una o dell'altra componente. Dopo un tratto iniziale di circa cinque metri in cui l'ammasso denota colorazioni marroni, i terreni si portano verso tonalità essenzialmente grigio chiaro, con occhiature, sfumature e venature policrome: verdine, azzurrine, marroni ecc.. A confermare l'origine gravitativa dell'ammasso in questione, resti arborei/arbustivi a varie quote (anche nella parte terminale del foro). Si segnala come, oltre i primi dieci metri (tratto testato meccanicamente con prove S.P.T. e rivelatosi il meno consistente dell'intera verticale esplorata) il livello di compattezza dei terreni verificato in fase di carotaggio salga a valori pertinenti a litotipi molto consistenti e si mantenga pressochè uniforme fino alla massima profondità raggiunta.</p>	1		1	100			
			2						
			3						
			4	3.10 4-5-5 pa 3.55	2				6.05 3-6-9 pa 6.50
			5						
			6		3				8.70 5-10-11 pa 9.15
			7						
			8		4				
			9						
			10		5				
			11						
			12		6				
			13						
			14						
			15						
			16						
			17						
			18						
			19						
			20						
			21						
			22						
			23						
			24						
			25						
			26						
			27						
			28						
			29						
			30						

NOTE:

- Specifiche esecutive prove S.P.T. in foro:
 - pa: prova eseguita con utensile a punta aperta (campione Raymond in cassetta alla relativa quota);
 - pc: prova eseguita con utensile a punta chiusa.
- Si segnala l'elevato recupero quantitativo del fluido di perforazione in fase di tubaggio provvisorio del foro.
- Rilievi piezometrici:
 - il dato riportato in colonnina è stato rilevato in data 06/11 con fondo foro e rivestimenti a - 21.00 mt da p.c..

Comune: Toano (RE)		Località: via Papa Giovanni XXII°, Cavola	
Codice lavoro: 21_007_CSTG	Cantiere: MS Toano	Committente: Dott. Geol. Stefano Castagnetti	
Codice Prova: DH1-S1	File: 2021-11-30_10-39-34.cdh	Data: 30/11/2021	Ora inizio prova: 9.30
Operatore: Dott. Geol. Alessandro Ferrari			

Ubicazione:

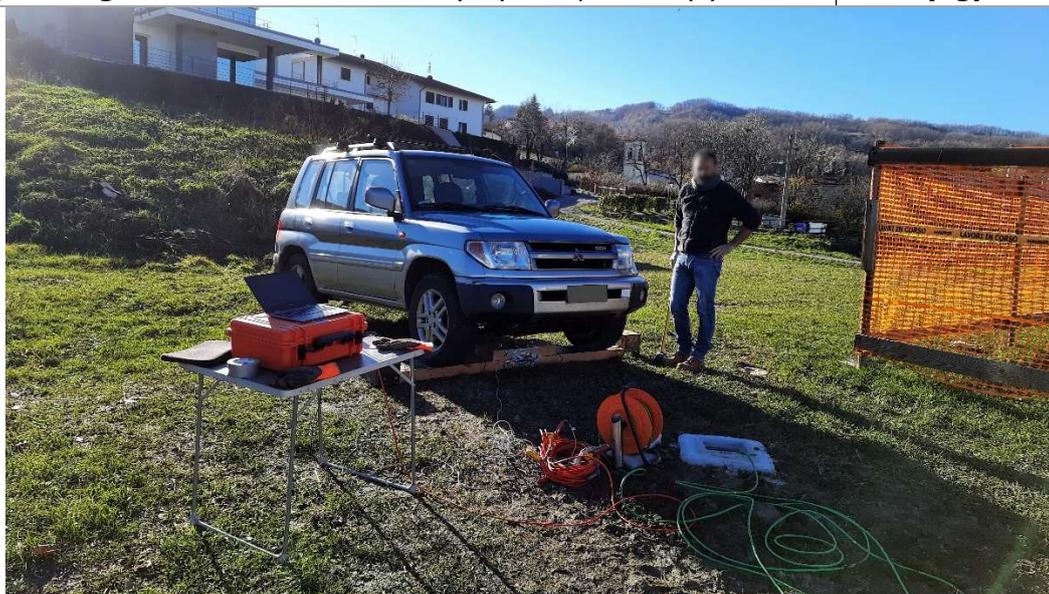


STRUMENTAZIONE

Marca: Sara Electronic Instruments	Modello: Sismografo digitale DoReMi
Geofono: Sara SS-BH a 5 canali (1 verticale + 4 orizzontali)	Frequenza (Hz): 10

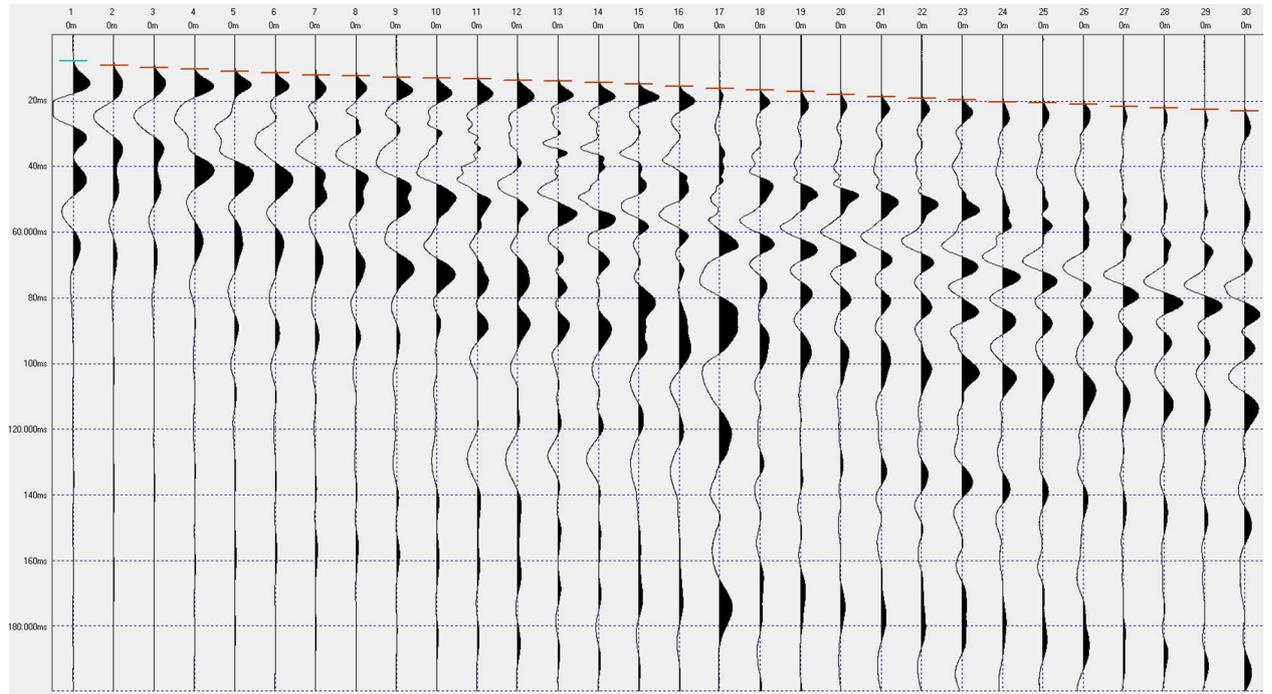
SPECIFICHE INDAGINE

Tipo: Down-Hole	Onde: <input checked="" type="checkbox"/> P <input checked="" type="checkbox"/> SH	N°canali: 5
Profondità indagine (m): 30	Spaziatura (m): 1	Offset foro-sorgente (m): 2
Durata registrazioni (sec): 0.20	Frequenza di campionamento (Hz): 5000	
Tipologia energizzazione: mazza su trave (SH) e su piattello (P)		Peso (Kg): 9

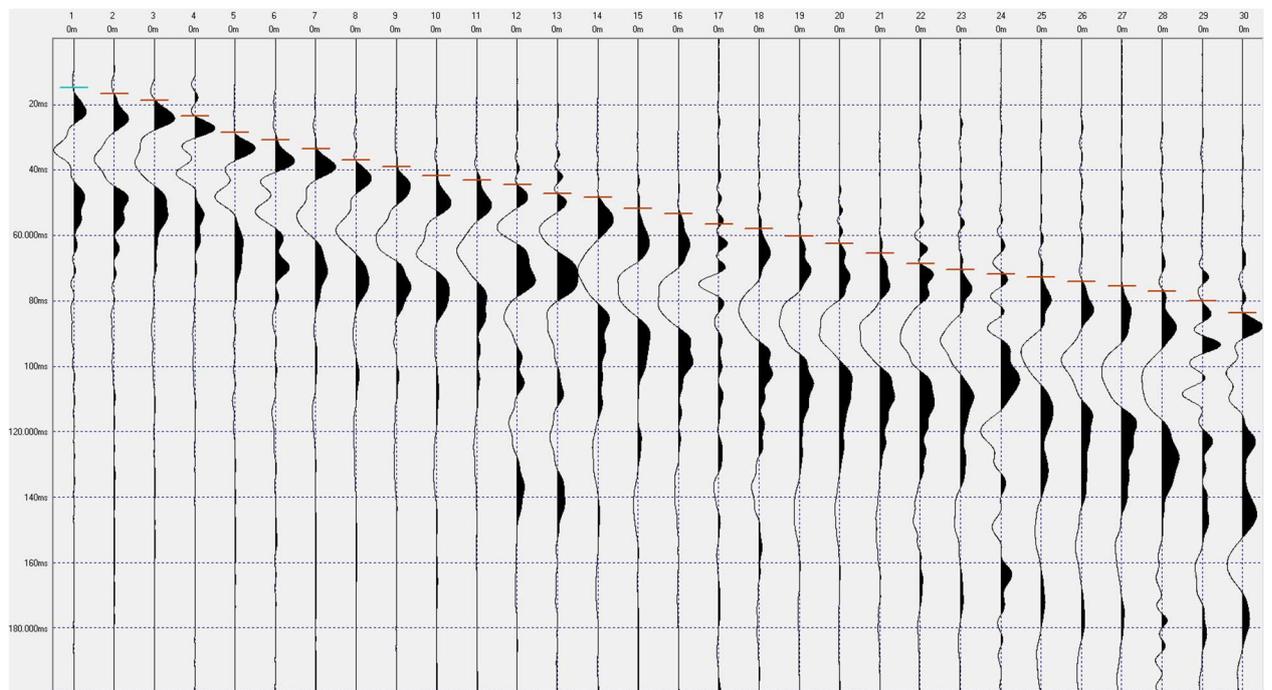


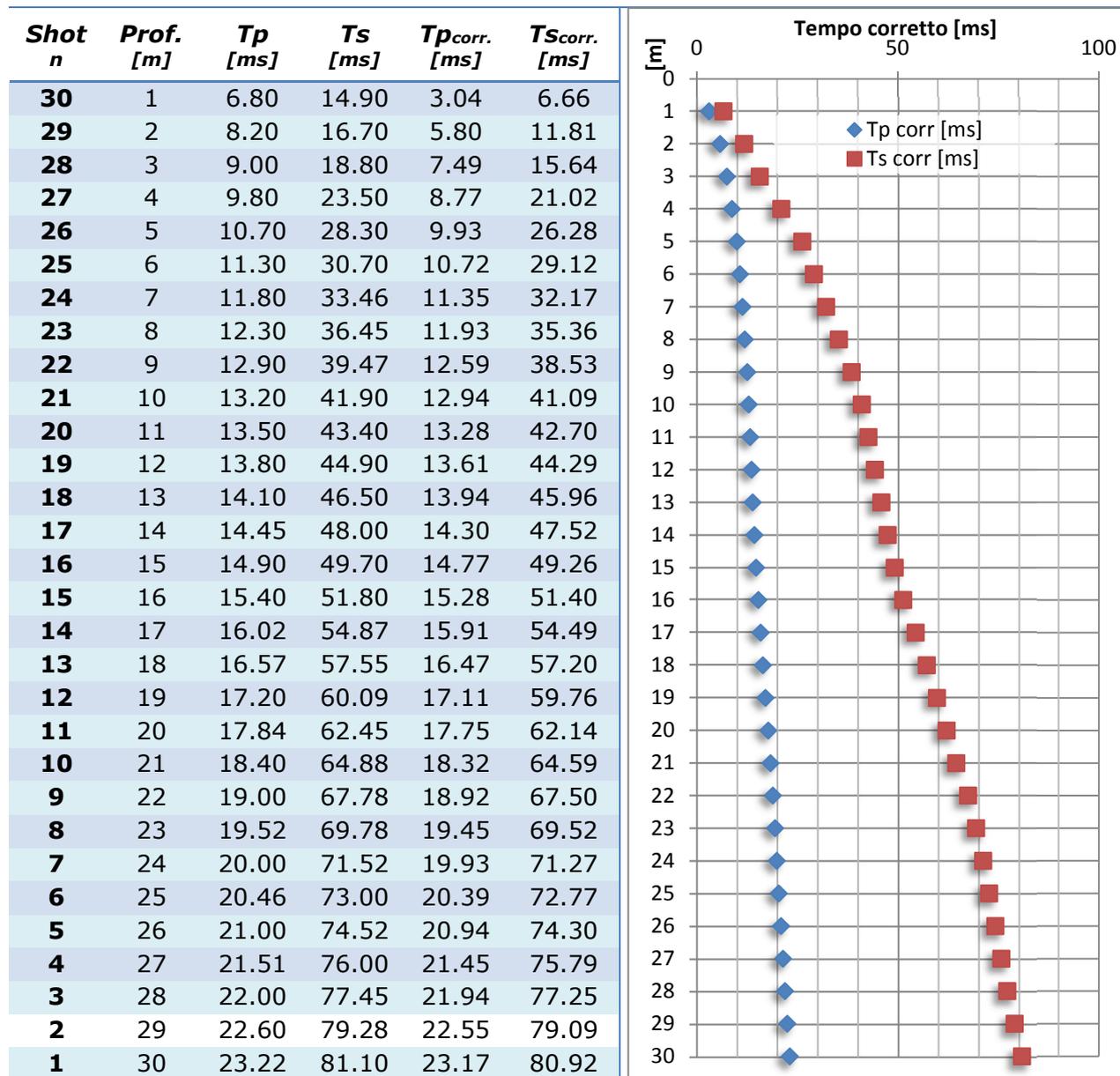
OSSERVAZIONI:

Sismogramma onde P

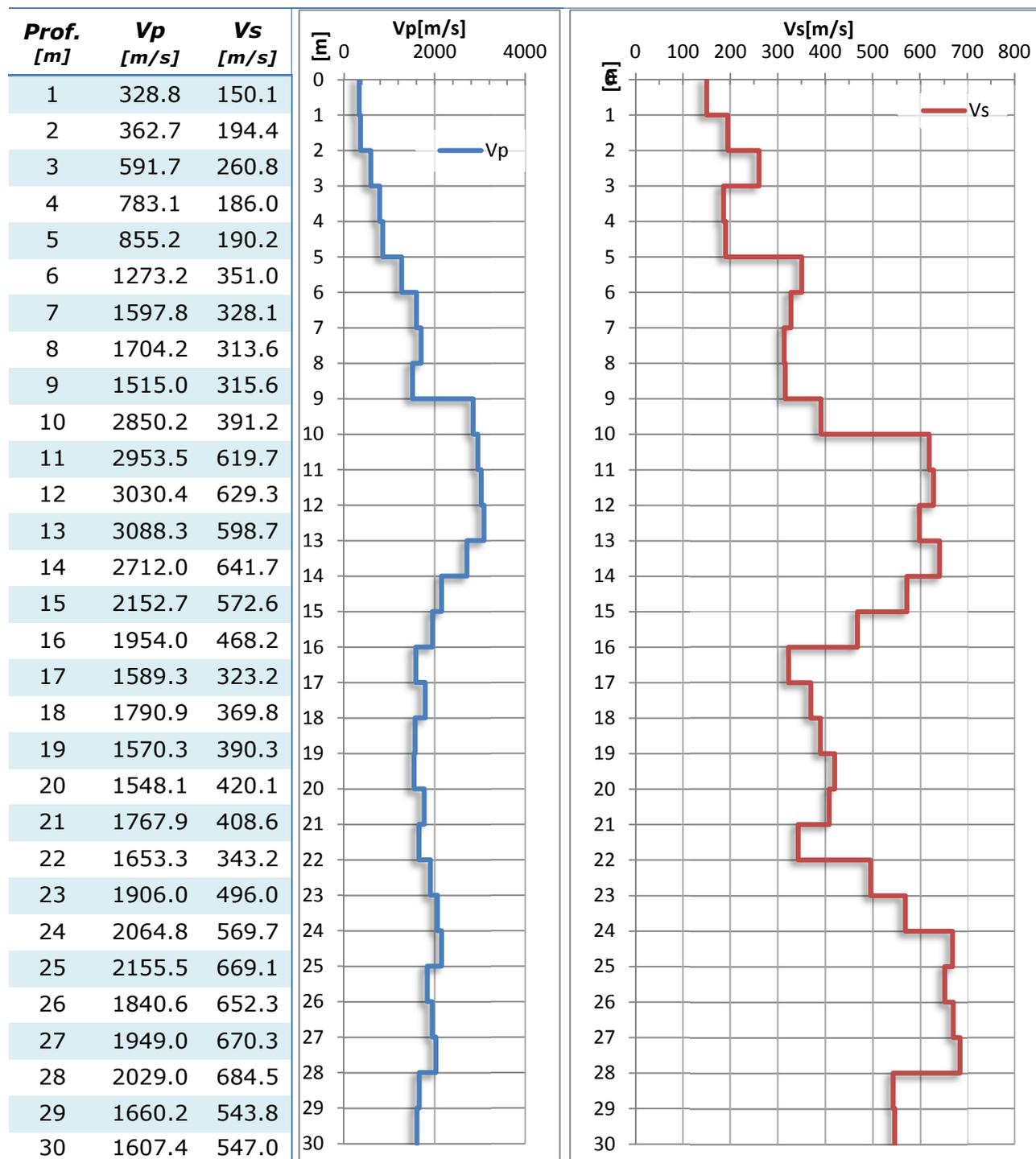


Sismogramma onde SH



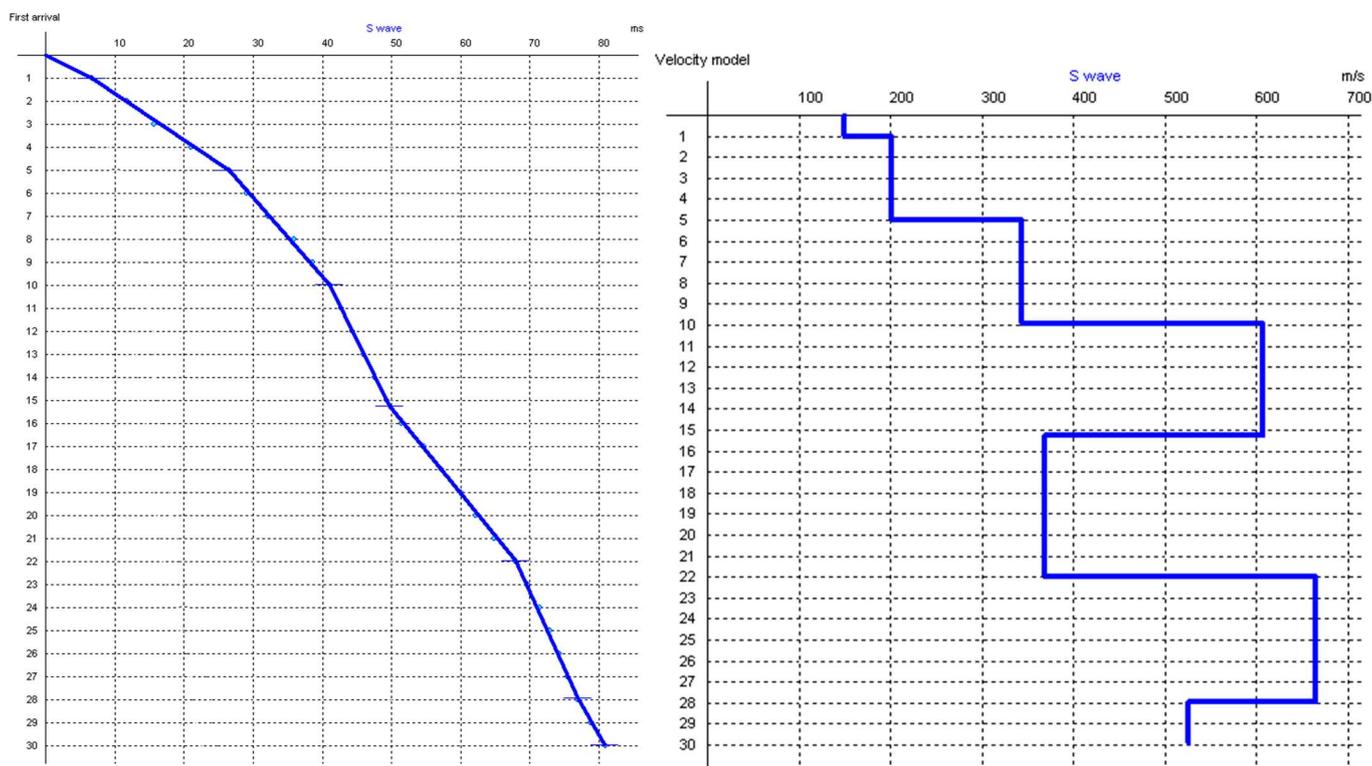


Interpretazione con METODO DELL'INTERVALLO



Valore V_{s30} : 370.7 m/s

Interpretazione con METODO DIRETTO



SISMOSTRATO	DA [m]	A [m]	Spessore [m]	Vs media [m/s]
1	0	1	1	149
2	1	5	4	202
3	5	10	5	343
4	10	15	5	606
5	15	22	7	369
6	22	28	6	664
7	28	30	4	525

Valore V_{s30} : 369.7 m/s

CAVOLA RSL,

Instrument: TRZ-0189/01-12

Data format: 16 byte

Full scale [mV]: 51

Start recording: 06/06/22 12:55:02 End recording: 06/06/22 13:11:02

Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

GPS data not available

Trace length: 0h16'00". Analyzed 81% trace (manual window selection)

Sampling rate: 128 Hz

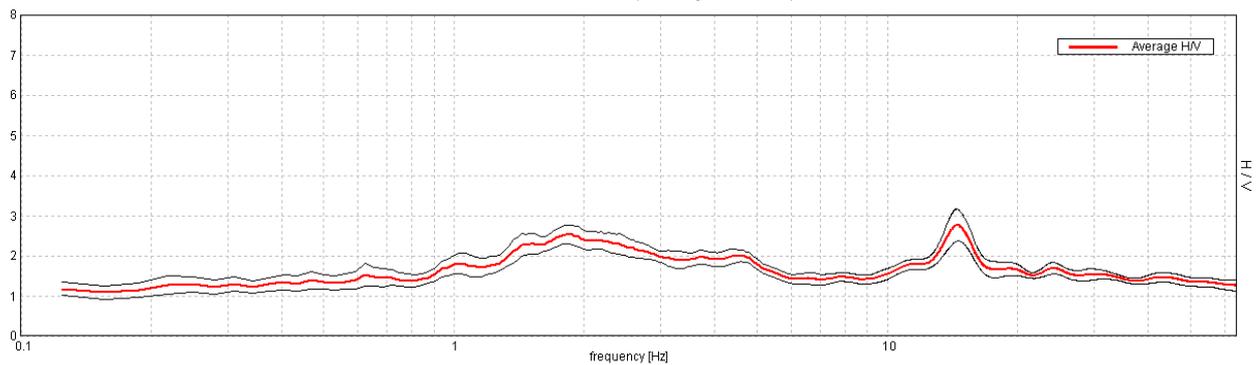
Window size: 20 s

Smoothing type: Triangular window

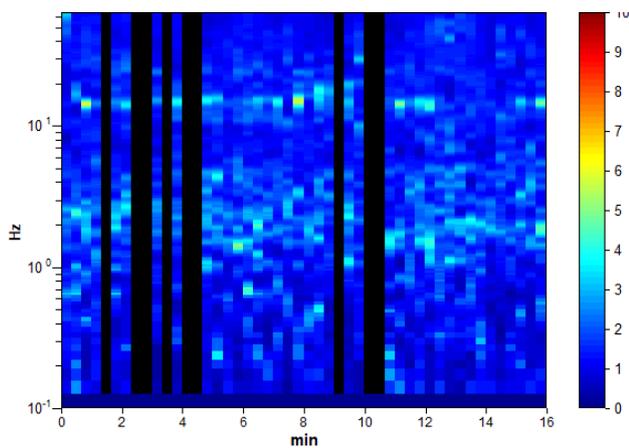
Smoothing: 10%

RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE

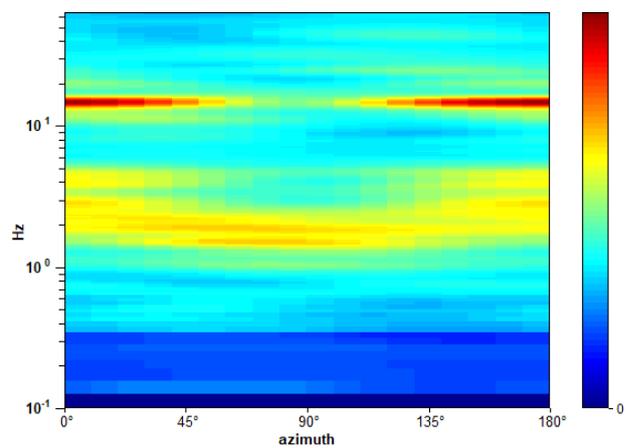
Max. HVV at 14.53 ± 9.23 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).



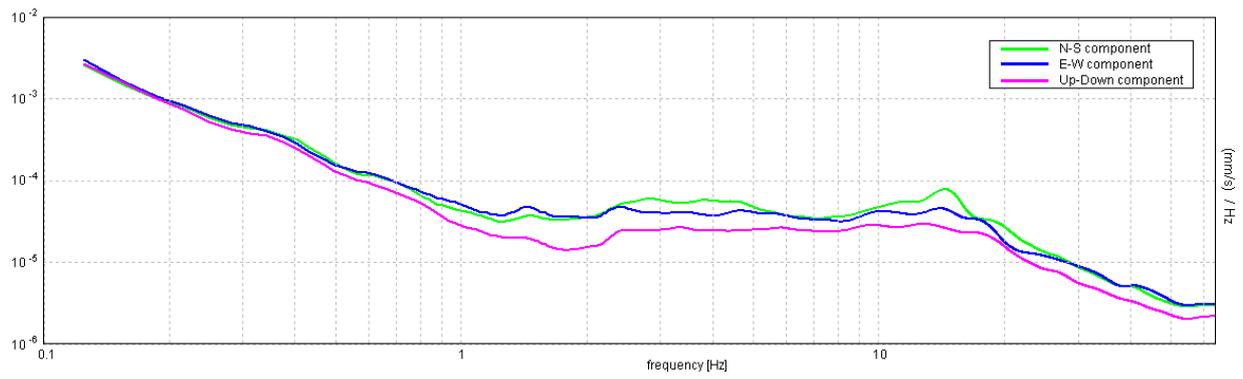
SERIE TEMPORALE H/V



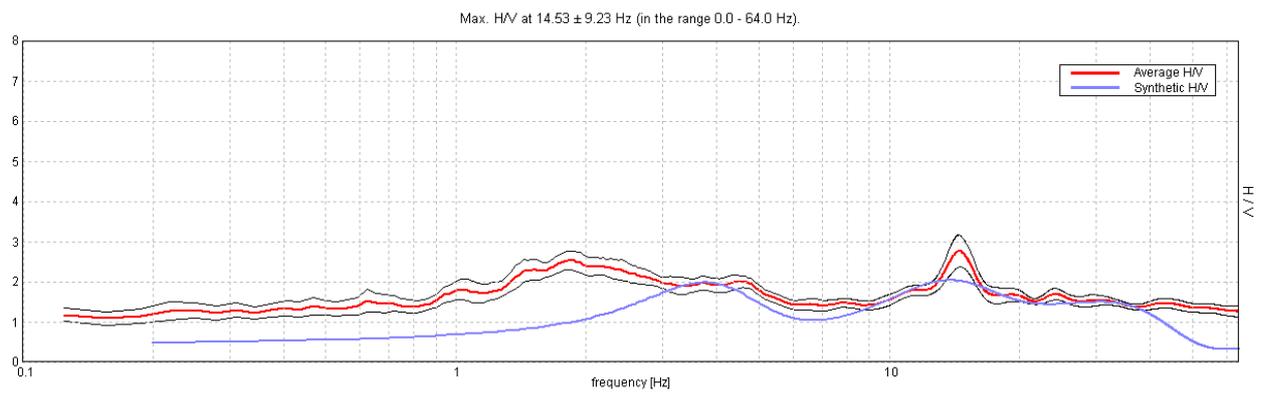
DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO



[Secondo le linee guida SESAME, 2005. Si raccomanda di leggere attentamente il manuale di Grilla prima di interpretare la tabella seguente].

Max. H/V at 14.53 ± 9.23 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	14.53 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	11334.4 > 200	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 698	OK	

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$			NO
Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	36.25 Hz	OK	
$A_0 > 2$	2.76 > 2	OK	
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.63519 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$9.23012 < 0.72656$		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.3936 < 1.58$	OK	

L_w	lunghezza della finestra
n_w	numero di finestre usate nell'analisi
$n_c = L_w n_w f_0$	numero di cicli significativi
f	frequenza attuale
f_0	frequenza del picco H/V
σ_f	deviazione standard della frequenza del picco H/V
$\varepsilon(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	ampiezza della curva H/V alla frequenza f_0
$A_{H/V}(f)$	ampiezza della curva H/V alla frequenza f
f^-	frequenza tra $f_0/4$ e f_0 alla quale $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequenza tra f_0 e $4f_0$ alla quale $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	deviazione standard di $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ è il fattore per il quale la curva $A_{H/V}(f)$ media deve essere moltiplicata o divisa
$\sigma_{\log H/V}(f)$	deviazione standard della funzione $\log A_{H/V}(f)$
$\theta(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Valori di soglia per σ_f e $\sigma_A(f_0)$

Intervallo di freq. [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.2 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ per $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ per $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20