PROTEZIONE CIVILE
Presidenza del Consiglio dei Ministri
Dipartimento della Protezione Civile

RegioneEmiliaRomagna

CONFERENZA DELLE REGIONI E DELLE PROVINCE AUTONOME

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

MICROZONAZIONE SISMICA

Relazione illustrativa

Livello 3

Regione Emilia-Romagna

Comune di Massa Lombarda

Regione	Soggetto realizzatore	Data
Emilia-Romagna	Dott. Geol. Aldo Antoniazzi (capogruppo/mandatario) Dott. Geol. Aldo Antoniazzi (Legale Rappresentante) Dott. Geol. Marco Baldi (mandante) Dott. Arch. Giulia Mancini (mandante) SOGEO S.r.l. (mandante) Collaboratori: Dott. Geol. Stefano Castagnetti Dott. Geol. Luca Castellucci Dott. Geol. Maurizio Moroni	Dicembre 2024

INDICE

RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO ... 2
GRUPPO DI LAVORO ... 2
ELABORATI ... 3
1. INTRODUZIONE ... 4
2. DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO ... 6
2.1. Inquadramento geografico ... 6
2.2. Inquadramento geologico ... 7
2.3. Inquadramento tettonico ... 10
2.4. Caratteristiche sismotettoniche ... 11
2.5. Storia sismica ... 14
2.6. Classificazione sismica ... 16
3. DATI GEOTECNICI E GEOFISICI ... 18
3.1. Acquisizione ed elaborazione dati ... 18
3.2. Pozzi, sondaggi e penetrometrie ... 19
3.3. Prove geofisiche ... 19
4. MODELLO DEL SOTTOSUOLO ... 22
5. DETERMINAZIONI ED INCERTEZZE ... 25
6. METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI ... 28
6.1. Prima fase del lavoro ... 28
6.2. Seconda fase del lavoro ... 28
6.3. Terza fase del lavoro ... 29
7. ELABORATI CARTOGRAFICI ... 30
7.1. Carta delle indagini ... 30
7.2. Carta geologico-tecnica per microzonazione sismica ... 30
7.3. Carta delle frequenze naturali dei terreni ... 33
7.4. Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica ... 33
7.5. Carta delle velocità delle onde di taglio S ... 39
7.6. Carte di microzonazione sismica ... 39
8. ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE ... 41
8.1. Area considerata ... 41
8.2. Metodologia ... 41
8.3. Modello geofisico del sottosuolo ... 41
8.3.1. Litologia ... 42
8.3.2. Determinazione della Vs e del bedrock sismico ... 42
8.3.3. Curve di variazione dello smorzamento (D) e della rigidezza (G/G0) ... 44
8.3.4. Azioni sismiche in ingresso ... 47
8.4. Procedura di analisi RSL ... 48
8.4.1. Metodo lineare equivalente ... 48
8.4.2. Soluzione alla singola iterazione mediante FEM ... 50
8.4.3. Procedimento iterativo ... 52
8.4.4. Interpretazione dei risultati ... 52
8.5. Analisi dei risultati ... 52
8.5.1. Microzona 2001 ... 53
8.5.2. Microzona 2002 ... 58
8.5.3. Microzona 2003 ... 62
8.5.4. Microzona 2004 ... 66
8.6. Pericolosità sismica ... 71
9. VERIFICA DELLA PERICOLOSITÀ SISMICA DI LIQUEFAZIONE ... 74
9.1. Premessa ... 74
9.2. Calcolo dell'indice del potenziale di liquefazione (LPI) ... 74
9.2.1 Analisi (LPI) ... 75
9.3. Calcolo dei cedimenti permanenti post-sismici ... 77
9.3.1 Analisi (Cedimenti) ... 77
9.4. Liquefaction Severity Number (LSN) ... 78
9.4.1 Analisi (LSN) ... 79
9.5. Indice del potenziale di liquefazione con la funzione di Ishihara (LPI_{ISH}) ... 81
9.5.1 Analisi (LPI_{ISH}) ... 81
10. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE ... 83

RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO

Dott. Ing. Sara Martini
Responsabile del Servizio Sismica - Area Economia e Territorio dell'Unione dei Comuni della Bassa Romagna

GRUPPO DI LAVORO

Soggetto Incaricato

GEOLOGO DOTT. ALDO ANTONIAZZI
Studio di Geologia Tecnica e Ambientale

Professionisti	Professione	Principali competenze
Dott. Aldo Antoniazzi (Capogruppo/Mandatario)	Geologo	Pianificazione territoriale, Microzonazione Sismica, idrogeologia, meccanica delle terre e rocce e Protezione Civile
Dott. Marco Baldi (Mandante)	Geologo	Pianificazione territoriale, Microzonazione Sismica, sistemi informativi territoriali (GIS) e telerilevamento
Dott. Arch. Giulia Mancini (Mandante)	Architetto	Pianificazione territoriale e CLE
Sogeo S.r.l. (Mandante)		Indagini geognostiche

Collaboratori e specialisti

Dott. Geol. Alberto Domenico Antoniazzi	Pianificazione territoriale, geopedologia ed evoluzione costiera
Dott. Geol. Stefano Castagnetti	Pianificazione territoriale, Microzonazione Sismica, Protezione Civile e CLE
Dott. Geol. Luca Castellucci	Sistemi informativi territoriali (GIS)
Dott. Geol. Maurizio Moroni	Esplorazione del sottosuolo, geofisica applicata e geotecnica

Esecuzione indagini

Dott. Geol. Maurizio Moroni (indagini penetrometriche e geofisiche)
Sogeo S.r.l. (sondaggi e prove in laboratorio)

Fonte dati

Uffici Tecnici Comunali - Comune di Massa Lombarda
Unione dei Comuni della Bassa Romagna
Provincia di Ravenna
Area Geologia, Suoli e Sismica - Regione Emilia-Romagna
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (I.N.G.V.)

ELABORATI

- Relazione illustrativa
- Analisi del potenziale di liquefazione
- Carta delle indagini in scala 1:3.000 (4 tavole)
- Carta geologico-tecnica in scala 1:5.000
- Carta delle frequenze naturali dei terreni in scala 1:5.000
- Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica in scala 1:5.000
- Carta delle velocità delle onde di taglio S in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - FPGA in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $FA_{0,1 - 0,5\ s}$ in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $FA_{0,4 - 0,8\ s}$ in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $FA_{0,7 - 1,1\ s}$ in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $FA_{0,5 - 1,5\ s}$ in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $FH_{0,1 - 0,5\ s}$ in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $FH_{0,5 - 1,0\ s}$ in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $FH_{0,5 - 1,5\ s}$ in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - H_{sm} in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $H_{0,4 - 0,8\ s}$ in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $H_{0,7 - 1,1\ s}$ in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $H_{0,5 - 1,5\ s}$ in scala 1:5.000

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 Massa Lombarda (Provincia di Ravenna), effettuato su incarico dell'Unione di Comuni della Bassa Romagna (Contratto Rep. n. 1040 del 10/01/2023 e Atto aggiuntivo Rep. n. 1125 del 01/02/2024) e finanziato con contributi derivanti delle deliberazioni della Giunta Regionale dell'Emilia-Romagna:

- n. 1885/2021 avente ad oggetto "OCDPC 20 MAGGIO 2021, N. 780 - ATTUAZIONE DELL ART.2, COMMA 1, LETT. A) E COMMA 2. APPROVAZIONE DEI CRITERI PER L'ATTRIBUZIONE, LA CONCESSIONE E LA LIQUIDAZIONE DI CONTRIBUTI E PER LA REALIZZAZIONE E PRESENTAZIONE DEGLI ELABORATI RELATIVI A STUDI DI MICROZONAZIONE SISMICA E ANALISI DELLA CONDIZIONE LIMITE PER L'EMERGENZA.", con cui vengono approvate le specifiche di realizzazione degli studi di microzonazione sismica e analisi della Condizione Limite per l'Emergenza e viene deliberato altresì di dare priorità, nell'attribuzione delle risorse, agli Enti precedentemente esclusi per esaurimento delle risorse disponibili, tra cui l'Unione dei Comuni della Bassa Romagna;
- n. 1899/2021 avente ad oggetto "O.C.D.P.C. 780/2021: APPROVAZIONE SECONDO ELENCO DEGLI ENTI LOCALI DESTINATARI DEI CONTRIBUTI PER STUDI DI MICROZONAZIONE SISMICA E ANALISI DELLA CONDIZIONE LIMITE DI EMERGENZA, IN ATTUAZIONE DELLA DELIBERA DI GIUNTA DELLA REGIONE EMILIA ROMAGNA N. 1885 DEL 15/11/202" con cui viene attribuito all'Unione dei Comuni della Bassa Romagna un finanziamento per gli approfondimenti degli studi di microzonazione sismica di III livello e per l'analisi della Condizione Limite di Emergenza relativa ad ogni singolo Comune dell'Unione.

Il Comune di Massa Lombarda è dotato di uno studio di Microzonazione Sismica di Livello 3 e dell'Analisi della Condizione Limite per l'Emergenza (CLE) validato della riunione della Commissione Tecnica per il monitoraggio degli studi di microzonazione sismica (ai sensi dell'OPCM 3907/2010, art. 5, comma 7) del 20 luglio 2016 (Regione Emilia-Romagna, prot. n. PG.2016.0573024 del 9/8/2016).

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

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 alle direttive e agli atti tecnici sottoelencati:

- 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)";
- "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).

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 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.

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

2.1. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

Il Comune di Massa Lombarda appartiene alla Regione Emilia-Romagna, ricade nella Provincia di Ravenna (RA) e si sviluppa tra le sponde del fiume Santerno il Torrente Sillaro. Si trova circa a metà strada tra Faenza e Imola (figura n. 2.1).

Il territorio di Massa Lombarda è di bassa pianura, il capoluogo raggiunge infatti la quota di 13 metri sul livello marino. La superficie del Comune di Massa Lombarda è pari a 37,25 chilometri quadrati.

Il Comune di Massa Lombarda confina a nord con il Comune di Conselice, a sud con il Comune di Mordano, a ovest con il Comune di Imola e, infine, a est con i Comuni di Lugo e Sant'Agata sul Santerno.

Figura n. 2.1 - Ubicazione di Massa Lombarda nell'ambito della Regione Emilia-Romagna.

Nella figura n. 2.2 è rappresentata la posizione del Comune di Massa Lombarda nell'ambito della Provincia di Ravenna.

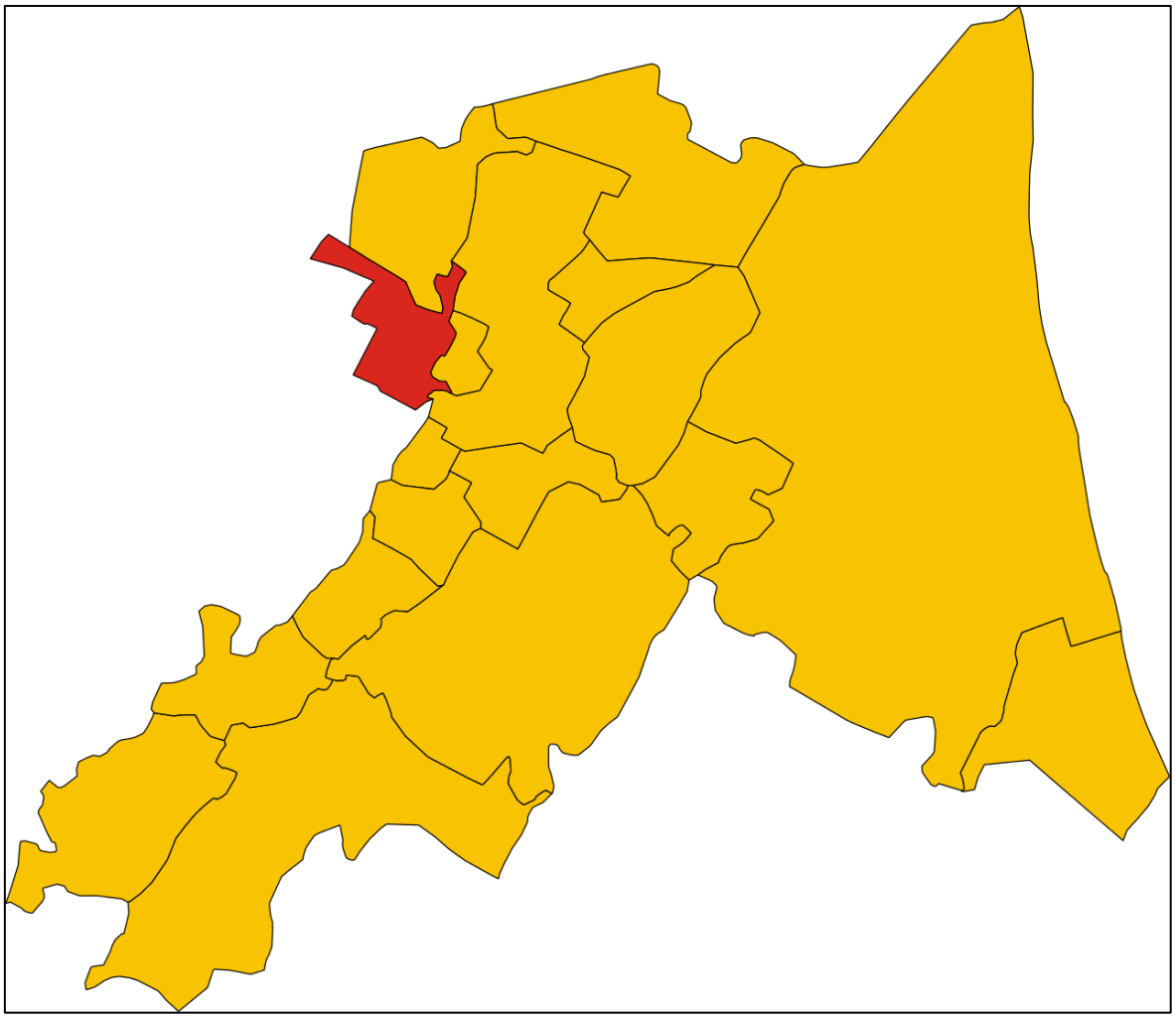

Figura n. 2.2 - Inquadramento del Comune di Massa Lombarda (area in rosso) nell'ambito della Provincia di Ravenna.

2.2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Il territorio del Comune di Massa Lombarda è situato nel settore sudorientale della Pianura Padana (Pianura romagnola): una vasta area pianeggiante, dovuta essenzialmente al deposito di sedimenti alluvionali.

I terreni affioranti nel territorio in esame (figura n. 2.3), di età olocenica, sono schematicamente riconducibili:

- ai depositi alluvionali di pertinenza dell'Unità di Modena (AES_{8a}) dell'Olocene. Unità costituita da ghiaie e ghiaie sabbiose o da sabbie con livelli e lenti di ghiaie ricoperte da una coltre limoso argillosa discontinua, in contesti di conoide alluvionale, canale fluviale e piana alluvionale intravalliva; da argille e limi, in contesti di piana inondabile; da alternanze di sabbie, limi ed argille, in contesti di piana deltizia; da sabbie prevalenti passanti ad argille e limi e localmente a sabbie ghiaiose, in contesti di piana litorale. Al tetto l'Unità presenta localmente un suolo calcareo poco sviluppato di colore grigio-giallastro. Spessore massimo di circa 10 metri.

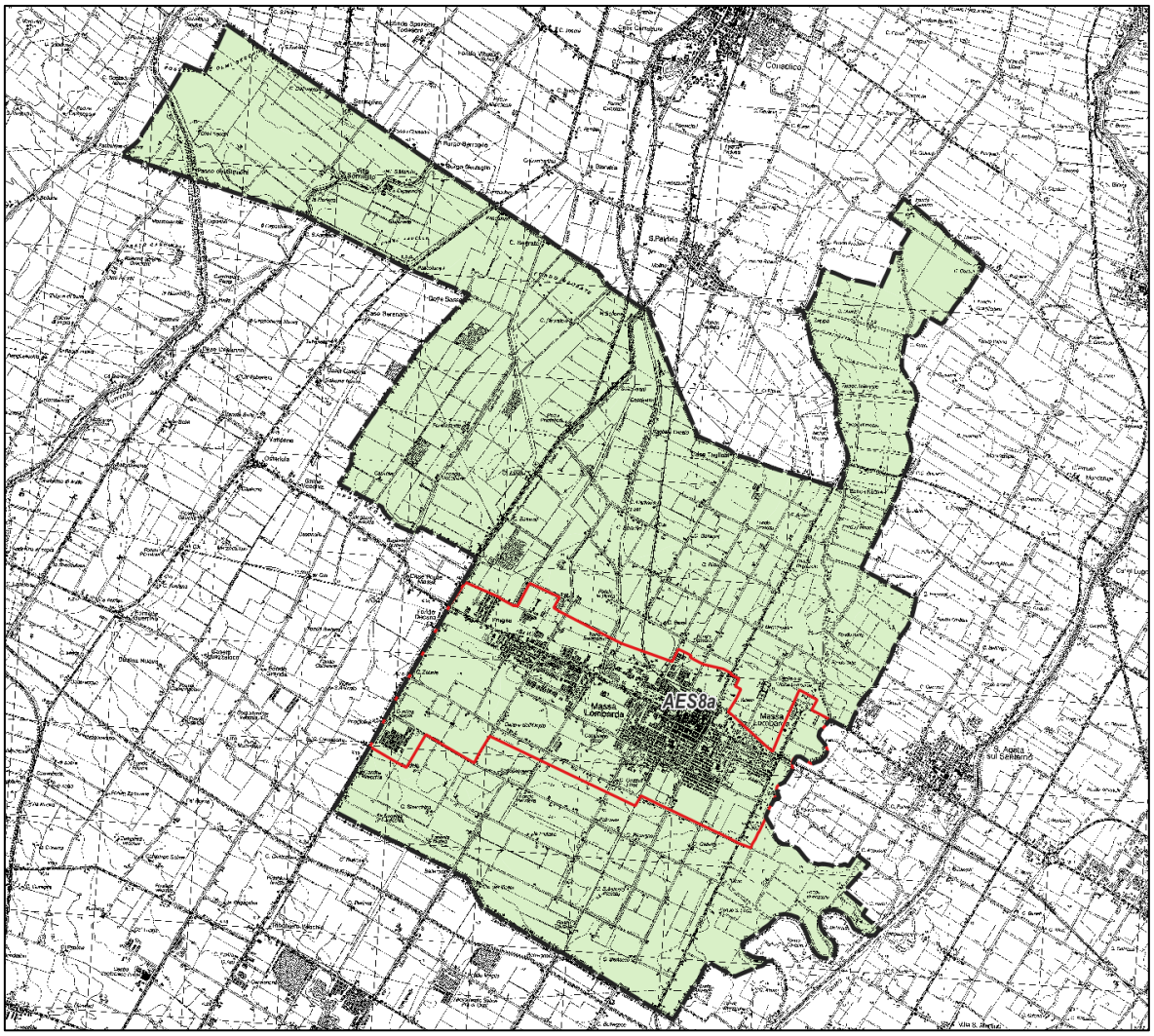

Figura n. 2.3 - Lineamenti geologici del Comune di Massa Lombarda. Nell'area affiora l'Unità di Modena (AES8a) dell'Olocene appartenente al Subsintema di Ravenna - Sintema Emiliano-Romagnolo superiore. Le aree perimetrate con la linea di colore rosso sono oggetto di microzonazione sismica.

Nel sottosuolo di Massa Lombarda la base dei depositi quaternari è situata ad una profondità dell'ordine di 1.500 metri rispetto al piano di campagna. Si veda in proposito la carta dell'imbasamento del Quaternario nella valle padana[1] presente nella figura n. 2.4.

[1] LUCCHETTI L.: *Tettonica padana*, in "I giacimenti gassiferi dell'Europa Occidentale. Atti del Convegno di Milano 30 settembre - 5 ottobre 1957, indetto dall'Accademia Nazionale dei Lincei e dall'Ente Nazionale Idrocarburi, Volume II, Roma, Accademia Nazionale dei Lincei, 1959, p. 20.

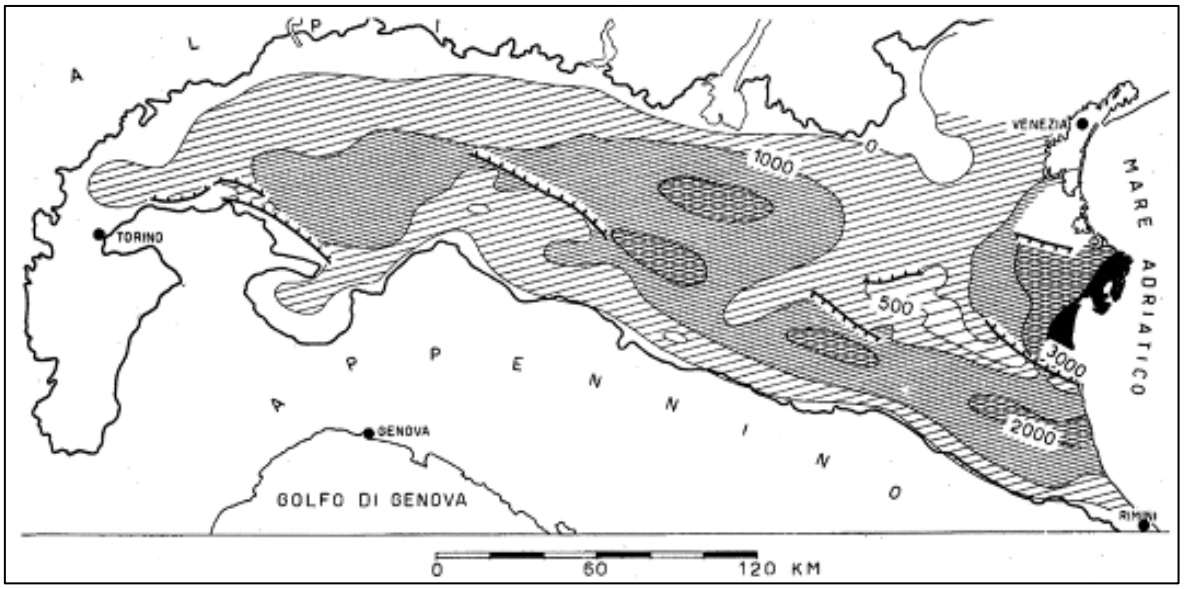

Figura n. 2.4 - Carta della base del Quaternario nella Valle Padana (Da Lucchetti L., 1959).

I depositi alluvionali e, talvolta costieri, hanno un andamento generalmente suborizzontale, variamente lentiforme, ma indisturbato, e poggiano su rocce interessate da pieghe e faglie, sviluppatesi dal Pliocene al Quaternario inferiore. Le principali strutture sepolte nel sottosuolo padano, quindi anche nella zona in esame, sono evidenti nello schema tettonico (figura n. 2.5), redatto dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli dell'Emilia-Romagna.

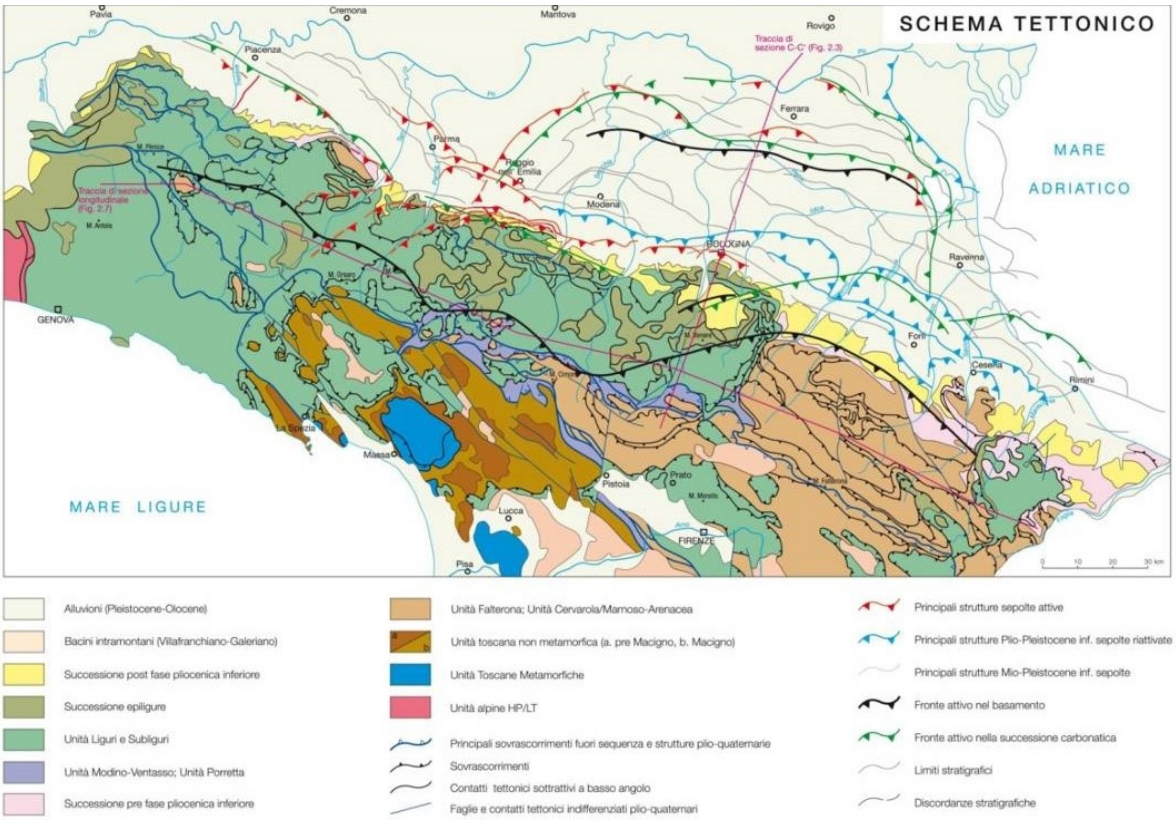

Figura n. 2.5 - Schema tettonico dell'Emilia-Romagna.

Una sintesi schematica della situazione del sottosuolo, indicativamente valida anche per quanto concerne il territorio del Comune di Massa Lombarda, è fornita dalla sezione geologica schematica (figura n. 2.6), che taglia trasversalmente la penisola italiana dalla Toscana alla Romagna e si estende dalla superficie fino alla parte superiore del mantello terrestre[2].

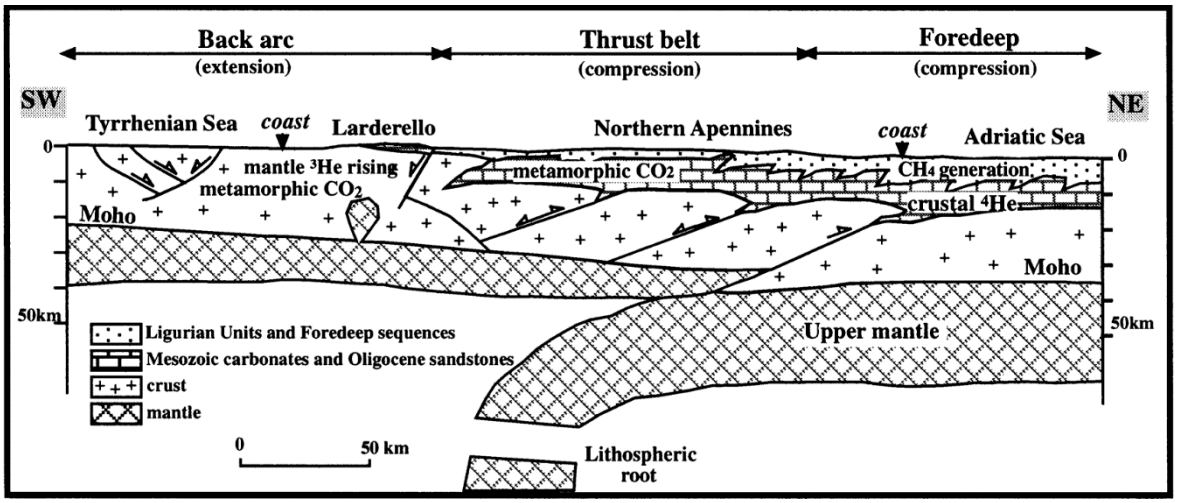

Figura n. 2.6 - Sezione geologica schematica attraverso l'Appennino Settentrionale, estesa dal Tirreno all'Adriatico e dalla superficie al Mantello superiore (da A. MINISSALE E ALTRI, 2.000).

2.3. INQUADRAMENTO TETTONICO

Il territorio del Comune di Massa Lombarda appartiene strutturalmente all'Appennino Settentrionale[3], la cui tettonica è contraddistinta da ampi fronti di scorrimento, che individuano alcune unità tettoniche fondamentali, e da importanti accavallamenti (figura n. 2.5). Le ricerche compiute dall'Agip hanno evidenziato che la struttura tettonica dell'Appennino settentrionale prosegue, sepolta sotto le alluvioni della pianura fino a nord di Ferrara ed anche sotto l'Adriatico, come evidente nella figura n. 2.7, tratta dal foglio 222 Lugo della Carta geologica d'Italia in scala 1:50.000 (2009).

[2] MINISSALE A., MAGRO G., MARTINELLI G., VASELLI G., TASSI G.F., *Fluid geochemical transect in the Northen Apennines (central-northen Italy): fluid genesis and migration and tectonic implications*, «Tectonophysics», 319, (2000), p. 218.

[3] L'Appennino settentrionale è una catena a falde derivata dal corrugamento e dalla sovrapposizione di prismi sedimentari, depositatisi nel paleo oceano ligure-piemontese e sul margine continentale della microplacca dell'Adria, durante la collisione tra la placca africana e quella europea. L'orogenesi, iniziata nell'Eocene medio e sviluppatasi soprattutto a partire dall'Oligocene, ha dato luogo a pieghe e a sovrascorrimenti lungo faglie inverse con spostamento generale verso nord-est.

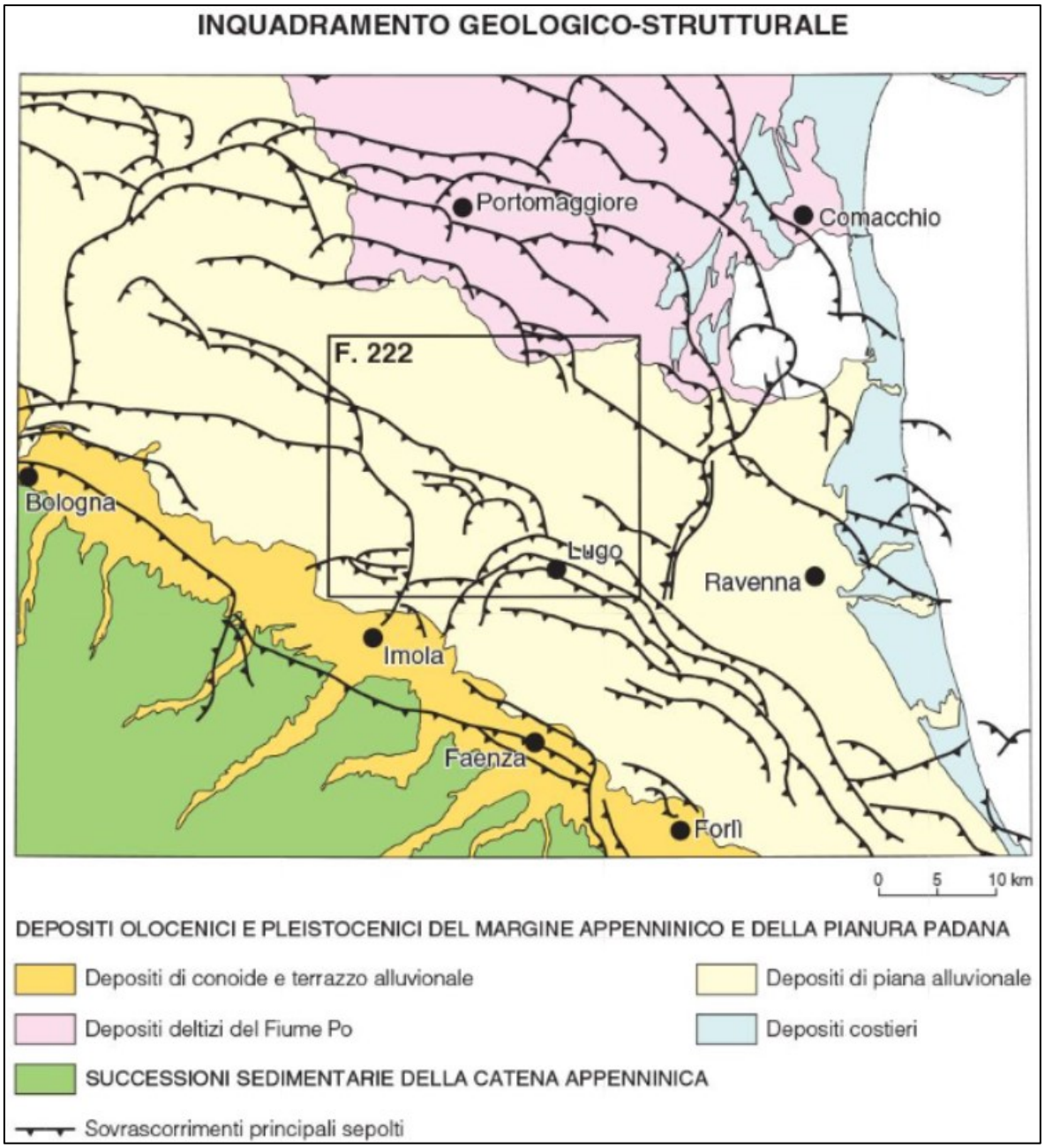

Figura n. 2.7 - Schema geologico-strutturale del territorio ove ricade il Comune di Massa Lombarda.

Risulta pertanto che il territorio comunale in esame è situato in un settore contraddistinto da un complesso sistema di fronti di accavallamento, sepolti sotto le alluvioni della pianura.

2.4. CARATTERISTICHE SISMOTETTONICHE

Un inquadramento generale delle principali strutture attive sismogenetiche dell'Emilia-Romagna, quindi anche della zona in esame, è fornito dall'apposita carta (figura n. 2.8), a cura dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli dell'Emilia-Romagna.

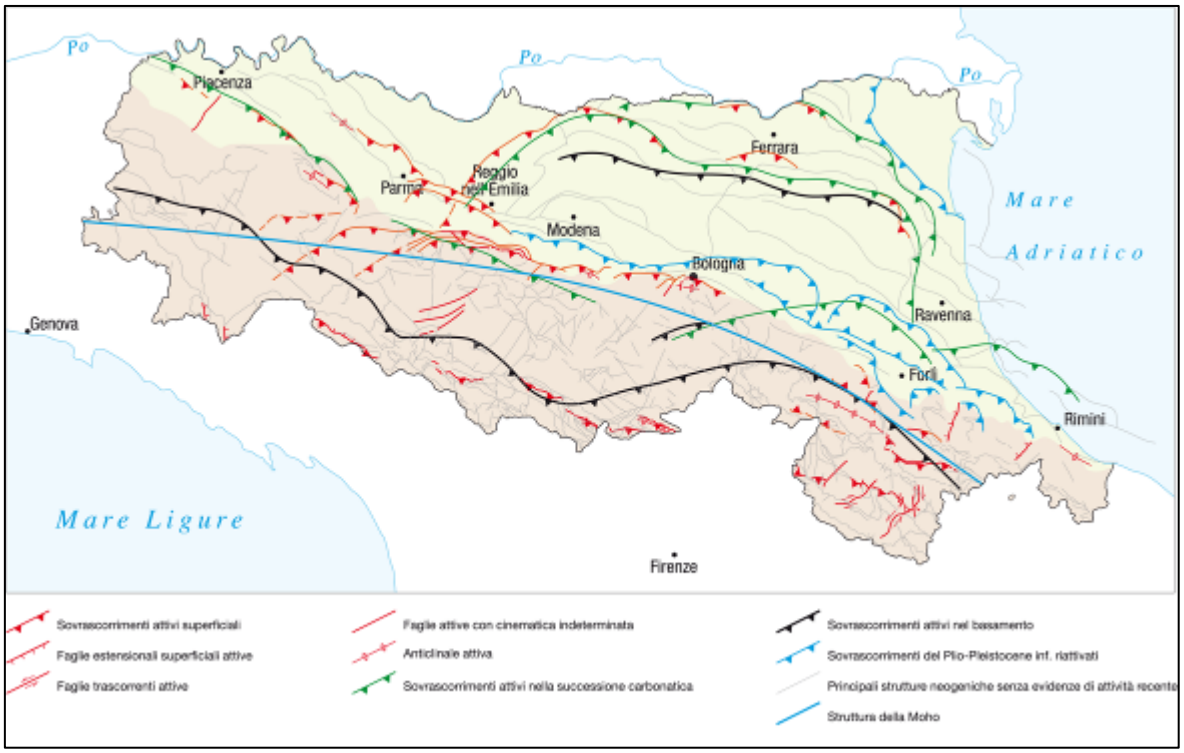

Figura n. 2.8 - Principali strutture attive in Emilia-Romagna.

Le sorgenti sismogenetiche e le faglie potenzialmente attive e capaci, interessanti specificatamente il territorio comunale di Massa Lombarda, sono state ricavate dal *Database of Individual Seismogenic Sources* (DISS) dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Version 3.2.1., ossia dal database delle sorgenti sismogenetiche italiane, potenzialmente in grado di generare sismi con magnitudo superiore a M 5.5 nell'area Italiana[4]. La loro distribuzione geografica è evidente nella figura n. 2.9.

Nel territorio di pertinenza di Massa Lombarda figura la sorgente sismogenetica composita ITCS011: Ascensione-Armaia con Mw max (magnitudo momento massima) 6,0 e la sorgente sismogenetica individuale ITIS100: Bagnacavallo con Mw max (magnitudo momento massima) 5,8.

[4] BASILI R., G. VALENSISE, P. VANNOLI, P. BURRATO, U. FRACASSI, S. MARIANO, M.M. TIBERTI, E. BOSCHI (2008), The Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), version 3: summarizing 20 years of research on Italy's earthquake geology, ***Tectonophysics.***

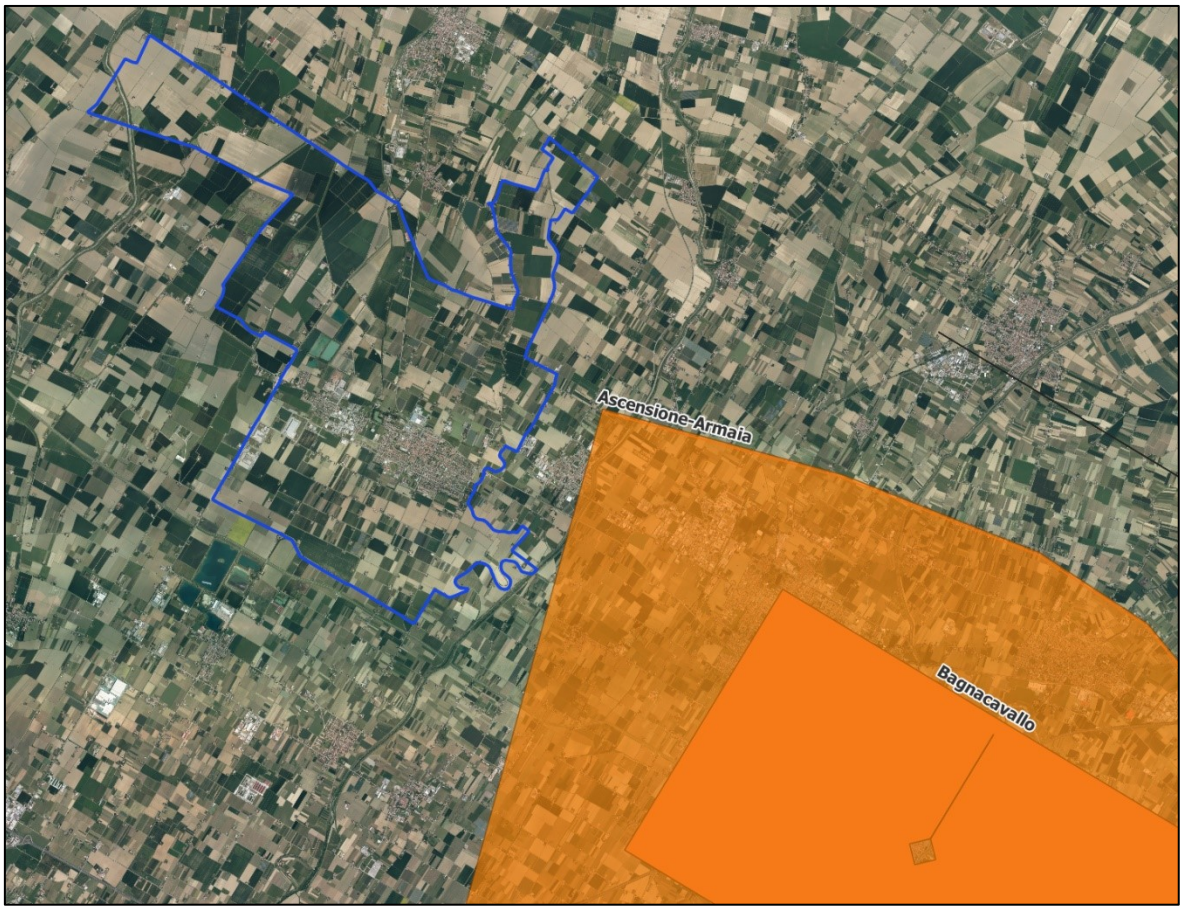

Figura n. 2.9 - Ubicazione delle sorgenti sismogenetiche del DISS (Versione 3.2.1) nella zona di pertinenza del Comune di Massa Lombarda.

Nella Zonazione sismogenetica ZS9 dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia[5], il territorio comunale di Massa Lombarda (figura n. 2.10) ricade nella "Dorsale Ferrarese 912" con Mw max (magnitudo momento massima) di 6,14.

[5] MELETTI C. E VALENSISE G. (a cura) del 2004, Zonizzazione sismogenetica ZS9 - App. 2 al Rapporto conclusivo.

Figura n. 2.10 - Zonazione sismogenetica ZS9 del Comune di Massa Lombarda.

2.5. STORIA SISMICA

La storia sismica del Comune di Massa Lombarda è stata desunta dal Database Macrosismico Italiano (edizione 2015, versione 4,0)[6]. Nella tabella n. 2.1 sono riportati gli eventi di maggiore intensità verificatisi a Massa Lombarda, indicando per ciascuna di esse, oltre agli effetti provocati al sito, espressi come Intensità (MCS), quando si è verificato, il numero di località coinvolte (NMDP), l'intensità massima epicentrale in scala MCS (Io), e la magnitudo momento (Mw).

TABELLA N. 2.1 - MAGGIORE SISMICITÀ STORICA DEL COMUNE DI MASSA LOMBARDA

Effetti	In occasione del terremoto del:				
Intensità [MCS]	**Data Year Mo Da Ho Mi Se**	**Area epicentrale**	**NMDP**	**Io**	**Mw**
7	1688 04 11 12 20	Romagna	39	8-9	5.84
5	1875 03 17 23 51	Costa romagnola	144	8	5.74
3	1887 09 30 15 55	Faenza	10	5	4.12
3	1895 03 23	Comacchio	33	6	4.65
3-4	1898 01 16 13 10	Romagna settentrionale	110	6	4.59
NF	1898 03 04 21 05	Parmense	313	7-8	5.37
4	1898 03 09 11 43	Romagna settentrionale	68	6	4.59

[6] HTTPS://EMIDIUS.MI.INGV.IT/CPTI15-DBMI15/

Effetti	In occasione del terremoto del:				
Intensità [MCS]	**Data Year Mo Da Ho Mi Se**	**Area epicentrale**	**NMDP**	**Io**	**Mw**
NF	1899 06 26 23 17 22.00	Valle del Bisenzio	138	7	5.02
5	1909 01 13 00 45	Emilia Romagna orientale	867	6-7	5.36
5	1911 02 19 07 18 30.00	Forlivese	181	7	5.26
3	1931 04 11 01 26	Faentino	19	4-5	4.81
NF	1953 12 14 07 11 06.00	Appennino forlivese	48	5-6	4.7
3	1971 07 15 01 33 23.00	Parmense	228	8	5.51
NF	1971 10 04 16 43 32.60	Valnerina	43	5-6	4.51
NF	1972 11 30 11 25 27.45	Costa pesarese	30		4.52
NF	1986 12 06 17 07 19.77	Ferrarese	604	6	4.43
3	2000 05 06 22 07 03.78	Faentino	85	5	4.08
4	2000 05 08 12 29 56.20	Faentino	126	5	4.67
NF	2000 05 10 16 52 11.60	Faentino	151	5-6	4.82
NF	2002 11 02 10 57 44.89	Ferrarese	79	4	4.21
NF	2003 12 07 10 20 33.04	Forlivese	165	5	4.18
NF	2005 07 15 15 17 18.00	Forlivese	173	4-5	4.29

DEFINIZIONI DELLE SIGLE UTILIZZATE NELLA TABELLA N. 2.1

Intensità	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 (anno, mese, giorno, ora, minuto, secondo)
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
Mw	Magnitudo momento, da CPTI15

CODICI ALTERNATIVI MCS UTILIZZATI NELLA TABELLA N. 2.1

Codice	Descrizione
D	danno (damage): danno di entità non precisabile (indicativamente Int>=6)
F	avvertito (felt): si ritiene di escludere che si siano verificati danni (3<=Int<=5)
NC	non classificato (not classified): indica una informazione non classificabile in termini di intensità ovvero con i codici utilizzati
EE	effetti sull'ambiente (environment effects): effetti sull'ambiente in prossimità della località cui vengono riferiti
SW	effetti marini anomali (sea waves): indica maremoto o comunque effetti anomali in mare, in prossimità della località cui vengono riferiti
NR	non segnalato (not reported): utilizzato a volte per segnalare che nelle fonti non vi è menzione di effetti per quella data località
NF	non avvertito (not felt): in presenza di segnalazione esplicita è equiparabile a Int=1
RS	registrazione strumentale: alcuni studi riportano questa informazione, non utilizzabile dal punto di vista macrosismico, che tuttavia si è preferito conservare

Il maggiore terremoto locale, com'è evidente nella figura n. 2.11, si è verificato nell'aprile del 1688.

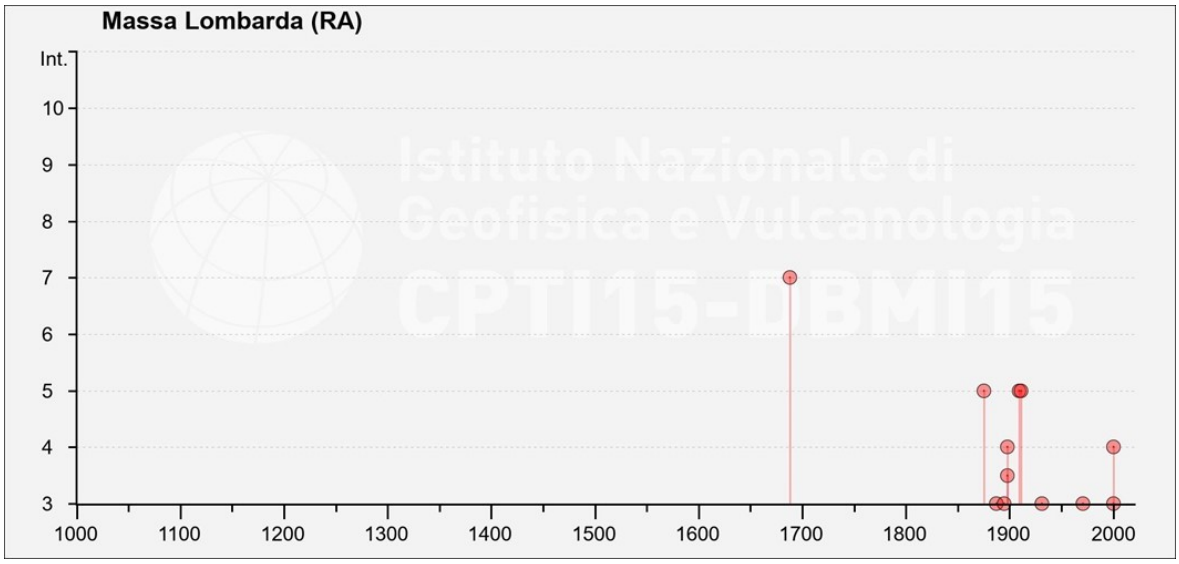

Figura n. 2.11 - I maggiori terremoti storici che hanno colpito Massa Lombarda.

Nella figura n. 2.12, è riportata la magnitudo dei terremoti verificatisi nella zona di pertinenza di Massa Lombarda dal 1985 ad oggi, entro il raggio di 30 chilometri[7].

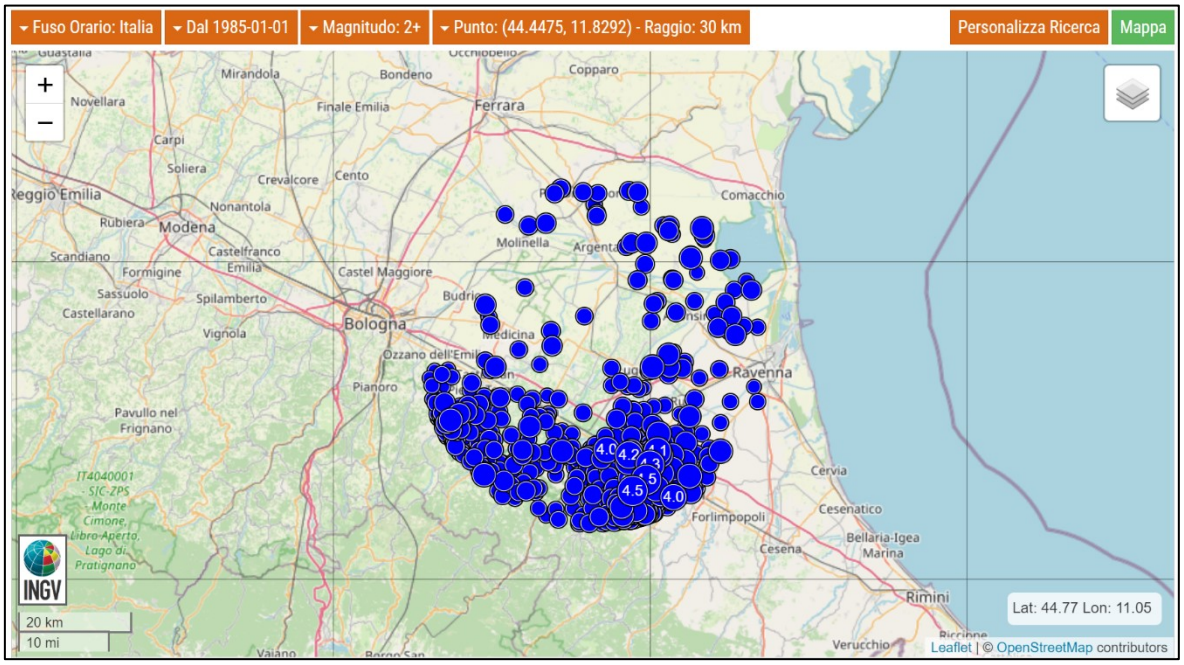

Figura n. 2.12 - Sismi verificatisi nella zona di pertinenza di Massa Lombarda dal 1985 ad oggi.

2.6. CLASSIFICAZIONE SISMICA

Il territorio del Comune di Massa Lombarda è classificato sismico di seconda categoria (S=9) dal 1983, in base alla classificazione nazionale dei Comuni italiani

[7] Istituto nazionale di Geofisica e Vulcanologia - https://terremoti.ingv.it

stabilita dall'Allegato 1, punto 3 dell'Ordinanza n. 3274 del 20 marzo 2003, che ha confermato quella precedente proposta nel 1998.

I Comuni sismici italiani sono pertanto distinti in 4 zone. Le prime 3 zone con sismicità alta (S=12), media (S=9) e bassa (S=6)] erano già state definite dalla Legge 64/74. La zona 4 è invece di nuova introduzione. A ciascuna di queste zone è stato assegnato uno specifico valore dell'accelerazione di picco orizzontale del suolo (ag) con probabilità di superamento del 10% in 50 anni (tabella n. 2.2). Ad ogni area del territorio nazionale è stato assegnato un proprio livello di pericolosità sismica.

TABELLA N. 2.2 - ZONE SISMICHE E MASSIMI VALORI DI ag

ZONA	*VALORI MASSIMI DI ag*
1	>0,25
2	**0,15 ÷ 0,25**
3	0,05 ÷ 0,15
4	<0,05

In base alla Classificazione sismica della Regione Emilia-Romagna, di cui alla DGR n. 1164 del 23.07.2018, evidente nella figura n. 2.13, il territorio comunale di Massa Lombarda è classificato in zona 2.

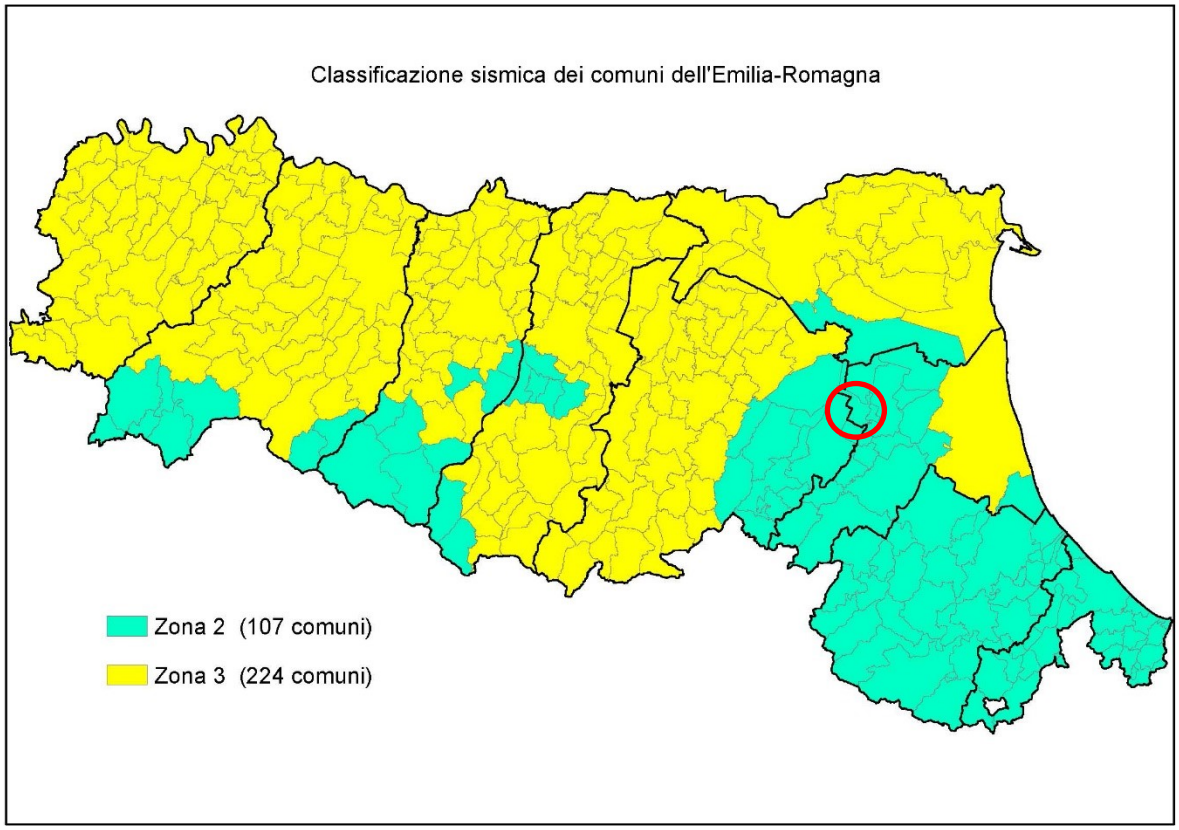

Figura n. 2.13 - Classificazione sismica dei Comuni della Regione Emilia-Romagna. DGR n° 1164 del 23.07.2018 "Aggiornamento della classificazione sismica di prima applicazione dei comuni dell'Emilia-Romagna".

3. DATI GEOTECNICI E GEOFISICI

3.1. ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DATI

I dati elaborati nello studio precedente e in questa sede derivano:

- dalla raccolta ed elaborazione di quanto disponibile presso gli Uffici Tecnici del Comune di Massa Lombarda, la Provincia di Ravenna, l'Area Geologia, Suoli e Sismica della Regione Emilia-Romagna e l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (I.N.G.V.);
- da un'apposita campagna d'indagini, attuata allo scopo di completare ed arricchire adeguatamente la conoscenza della specifica situazione locale.

Dei 159 dati geotecnici e geofisici acquisiti (sondaggi, pozzi per acqua ed idrocarburi, penetrometrie e prove geofisiche), 92 provengono dal precedente studio di Microzonazione Sismica. Tali dati sono stati implementati in questo studio acquisendone 34 dal Comune di Massa Lombarda, 5 dalla Regione Emilia-Romagna, 2 dall'Unione dei Comuni della Bassa Romagna, 0 dalla Ditta Sogeo S.r.l. e 4 dall'archivio interno dello scrivente. In questa sede sono state realizzate 22 indagini geologiche e geofisiche. Si veda in proposito la tabella n. 3.1.

TABELLA N. 3.1 - PROVE IN SITO ACQUISITE O REALIZZATE

Prove in sito		MS precedente	Archivio					Prove realizzate in questa sede	**Totale**
			RER	Comune	Unione	Sogeo S.r.l.	Archivio interno		
Sondaggi a carotaggio continuo		4							**4**
SCPTU	Geofisica			1				5	**6**
	Penetrometria			1				5	**6**
Microtremori (HVSR)		22		12	1			3	**38**
Prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU)		12	5	17			3	5	**42**
Prove penetrometriche statiche con punta elettrica (CPTE)		21		3			1		**25**
Prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT)		31							**31**
ESAC								4	**4**
Down Hole		1							**1**
MASW					1				**1**
REMI		1							**1**
Totale		**92**	**5**	**34**	**2**	**0**	**4**	**22**	**159**

Particolarmente fruttuosa, anche se impegnativa, si è rivelata la ricerca effettuata presso l'archivio dell'Unione dei Comuni della Bassa Romagna ove è stato possibile esaminare numerosissime relazioni geologiche, prodotte a corredo di progetti edilizi e di opere pubbliche, e trarre copia delle indagini geognostiche eseguite.

L'insieme degli elementi geologici e geofisici così acquisiti, unitamente alle informazioni presenti nella letteratura ed ai risultati dei numerosi sopralluoghi

effettuati nel territorio di Massa Lombarda, hanno permesso di ricostruire il modello geologico delle aree interessate dallo studio di microzonazione sismica.

Tutti i dati acquisiti sono stati inoltre trasformati in formato digitale con modalità georiferita, al fine di consentirne l'elaborazione in ambiente GIS. Sia i dati di base, sia quelli elaborati sono stati inoltre organizzati in formato vettoriale (*shapefile*) nel rispetto di quanto indicato negli "Standard di rappresentazione e archiviazione informatica" - Versione 4.2.

3.2. POZZI, SONDAGGI E PENETROMETRIE

L'insieme delle prove in sito acquisite o realizzate in questa sede sono ascrivibili ai seguenti tipi:

- sondaggi a carotaggio continuo
- pozzi per acqua
- prove penetrometriche statiche con sismocono (SCPTU)
- prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU)
- prove penetrometriche statiche con punta elettrica (CPTE)
- prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT)

Le stratigrafie dei pozzi hanno fornito informazioni sul sottosuolo fino a profondità dell'ordine di 500 metri. I sondaggi e le penetrometrie hanno invece raggiunto rispettivamente profondità massime dell'ordine di 20 metri e di 35 metri.

3.3. PROVE GEOFISICHE

L'insieme delle prove geofisiche acquisite o appositamente realizzate sono ascrivibili ai seguenti tipi:

- Microtremori (HVSR), prove complessive 38, di cui 3 appositamente eseguite in questa sede.
- Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW), prove complessive 1, di cui nessuna eseguita in questa sede.
- Refractor Microtremor (REMI), prove complessive 1, di cui nessuna eseguita in questa sede.
- ESAC, prove complessive 4, appositamente eseguite in questa sede.

I **rilievi dei microtremori** per analisi dei rapporti spettrali delle componenti orizzontale e verticale del moto (Horizontal to Vertical Spectral Ratio), effettuati nell'ambito del presente studio, sono stati effettuati con uno strumento marca Moho, modello *Tromino Engy* che adotta una metodologia, anche chiamata tecnica di Nakamura (1989), che è stata introdotta da Nogoshi e Igarashi (1971) sulla base degli studi di Kanai e Tanaka del 1961.

Lo strumento è dotato di tre sensori elettrodinamici (velocimetri) orientati N-S, E-W e verticalmente, e permette la registrazione nel campo di frequenze 0-200 Hz. Dopo che il segnale dei tre velocimetri è stato acquisito, per un tempo t, e digitalizzato a 24 bit, viene trasmesso ad un software dedicato, denominato *Grilla* il quale, per ciascuna delle 3 componenti del moto, esegue le seguenti operazioni:

- divisione del tracciato in finestre la cui lunghezza è immessa dall'operatore;
- depurazione del segnale dal trend di ciascuna finestra;
- "taper" con una finestra di Bartlett;
- "pad" di ciascuna finestra con degli zero;
- calcolo della trasformata di Fourier (FFT) per ciascuna finestra;
- calcolo dello spettro di ampiezza per ciascuna finestra;

- smoothing (lisciamento) dello spettro di ogni finestra secondo differenti funzioni la cui scelta viene definita dall'operatore;
- calcolo del rapporto spettrale HVSR per ogni frequenza e per ogni finestra.

Questa tecnica si basa essenzialmente sul rapporto spettrale H/V di rumore ambientale (*seismic noise*) e permette di valutare gli effetti locali di sito.

La tecnica proposta da Nakamura assume che i microtremori (il cosiddetto rumore di fondo registrabile in qualunque momento posizionando un sensore sismico sul terreno) consistano principalmente di un tipo di onde superficiali, le onde di Rayleigh, che si propagano in un singolo strato soffice su semispazio e che la presenza di questo strato sia la causa dell'amplificazione al sito.

L'applicazione, per la determinazione della Vs richiede la conoscenza della stratigrafia del sottosuolo, in particolare della profondità del primo riflettore.

Infatti, la frequenza di risonanza è legata alla Vs dalla formula:

$$fr = Vs1 / (4\ h)$$

Per sfruttare la misura della frequenza di risonanza è necessario quindi la conoscenza della profondità del primo riflettore o la velocità del primo strato.

Questa tecnica presenta il vantaggio di poter essere adoperata pressoché ovunque, purché siano garantite l'assenza di forti vibrazioni indotte da attività umane nelle vicinanze del punto di misura.

Questa tecnologia è stata oggetto del progetto di ricerca SESAME (*Site EffectS assessment using AMbient Excitations*) ed a questo si rimanda per le linee guida della tecnica H/V *spectral ratio* La sismica passiva a stazione singola fornisce inoltre informazioni sui terreni di indagine relativamente alle frequenze naturali e di risonanza.

Le **indagini microsismiche E.S.A.C.** (Estended Spatial Auto Correlation) attuate nell'ambito del presente studio, sono state realizzate sfruttando uno stendimento 2D, rilevando i microtremori ambientali come fonte di eccitazione con una finestra temporale lunga.

Per il rilievo si è utilizzato un sismografo marca Moho modello SoilSpy Rosina a 24 canali (matricola SAA----0027/4-12) collegato ad un pc netbook.

Operativamente si è realizzata una stesa di 14 geofoni verticali da 4,5 Hz interspaziati 3,0 m, adottando tipicamente 10 geofoni per il lato lungo dello stendimento e 4 per quello corto.

La lunghezza totale dello stendimento rappresenta l'ipotenusa del triangolo formato dalla catena geofonica.

I dati sono quindi acquisiti con frequenza di campionamento pari a 256 Hz tramite il software Rosina ed analizzati tramite Grilla.

Utilizzando la componente Z per le onde di Rayleigh si ottiene quindi una curva di dispersione dalla quale ricavare un profilo di Vs in condizioni di 1 D e strati pian paralleli.

La curva di dispersione è realizzata attraverso il software Grilla che analizza per ogni singola frequenza una velocità di prova compresa in un range (ad esempio 50 m/s – 350 m/s) e ad un passo (per esempio 2 m/s) preimpostati dall'operatore.

L'elaborazione del segnale è data da una trasformata bidimensionale Slowness - Frequency che analizza l'energia di propagazione del rumore in entrambe le direzioni della linea sismica rappresentando lo spettro di potenza su un grafico p-f.

La zona colorata in rosso è quella in cui, attraverso l'operazione di slant/stack si giunge a trovare la Vs che meglio fitta le varie serie temporali alle finestre di frequenza.

Si può arrivare ad assimilare la zona rossa con una spezzata. La retta presenta pendenze variabili e ad ogni cambio di pendenza si rilevano Vs e profondità che andranno poi a ricostruire i sismostrati.

La retta tende all'infinito quando per tutte le velocità di prova si ha lo stesso grado di correlazione, ovvero si hanno infinite soluzioni.

La massima lunghezza d'onda indagata è data quindi dalla relazione:

$$\mathbf{l_{max} = V_{max} / f_{min}}$$

con: $\mathbf{l_{max}}$ **=** massima lunghezza d'onda indagata, V_{max} = massima velocità prima che la retta tenda all'infinito e f_{min} = frequenza corrispondente alla V_{max}.

La massima profondità indagata equivale a:

$$\boldsymbol{Dh\ max = l_{max}/2{,}5}$$

4. MODELLO DEL SOTTOSUOLO

Basilare, in uno studio di Microzonazione sismica, è la definizione, più accurata possibile, del modello geologico del sottosuolo locale con particolare riferimento all'individuazione della profondità del substrato rigido.

Mentre si rimanda ad una successiva parte della presente relazione la descrizione della situazione delle varie parti del Comune di Massa Lombarda, distinte dall'elaborazione dell'insieme dei dati acquisiti nell'ambito della presente ricerca, è bene soffermarsi, a questo punto, sull'assetto generale del sottosuolo locale, che può modificare il moto sismico in superficie e quali problematiche comporti per la determinazione degli effetti locali.

Com'è evidente nella figura n. 4.1 i depositi quaternari, presenti nel sottosuolo del Comune di Massa Lombarda, appartengono al Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES), che comprende unità stratigrafiche a limiti inconformi (Subsintemi) ossia a corpi sedimentari compresi tra superfici di discontinuità, spesso riconducibili ad erosioni oppure a lacune stratigrafiche. Ciascuna di queste unità stratigrafiche comprende, al suo interno, anche sedimenti di differenti ambienti deposizionali e di varia litologia.

Nel Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES) figurano:

- in superficie depositi alluvionali, deltizi, litorali e marini;
- nel sottosuolo una sequenza di cicli trasgressivo-regressivi, costituiti da argille, limi, sabbie e ghiaie di ambiente alluvionale e, limitatamente al settore costiero, da sabbie litorali.

Nel territorio del Comune di Massa Lombarda (figura n. 2.3) affiora l'Unità di Modena (AES8a) dell'Olocene, che rappresenta la parte sommitale del Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore e comprende terreni di pertinenza del:

1) Subsintema di Ravenna - Unità di Modena (AES8a). Depositi di canale, argine e rotta fluviale. Piana alluvionale dell'Olocene;
2) Subsintema di Ravenna - Unità di Modena (AES8a). Depositi di piana inondabile in area interfluviale dell'Olocene.

Il sottosuolo della pianura in oggetto AES è caratterizzato dalla sovrapposizione di vari cicli deposizionali, di norma contraddistinti dall'alternanza irregolare e lentiforme di sedimenti fini, ove predominano le facies di tracimazione fluviale, e di depositi grossolani, ove prevalgono le facies di riempimento di canale fluviale. Alla base di ciascun ciclo dei depositi di tracimazione fluviale si presentano sedimenti deltizi e litorali. La figura n. 4.1 mostra che, al di sotto del Subsintema di Ravenna (AES8), figurano, procedendo verso il basso, con evidenziati i reciproci spessori e discontinuità, il Subsintema di Villa Verucchio (AES7), il Subsintema di Bazzano (AES6) ecc.

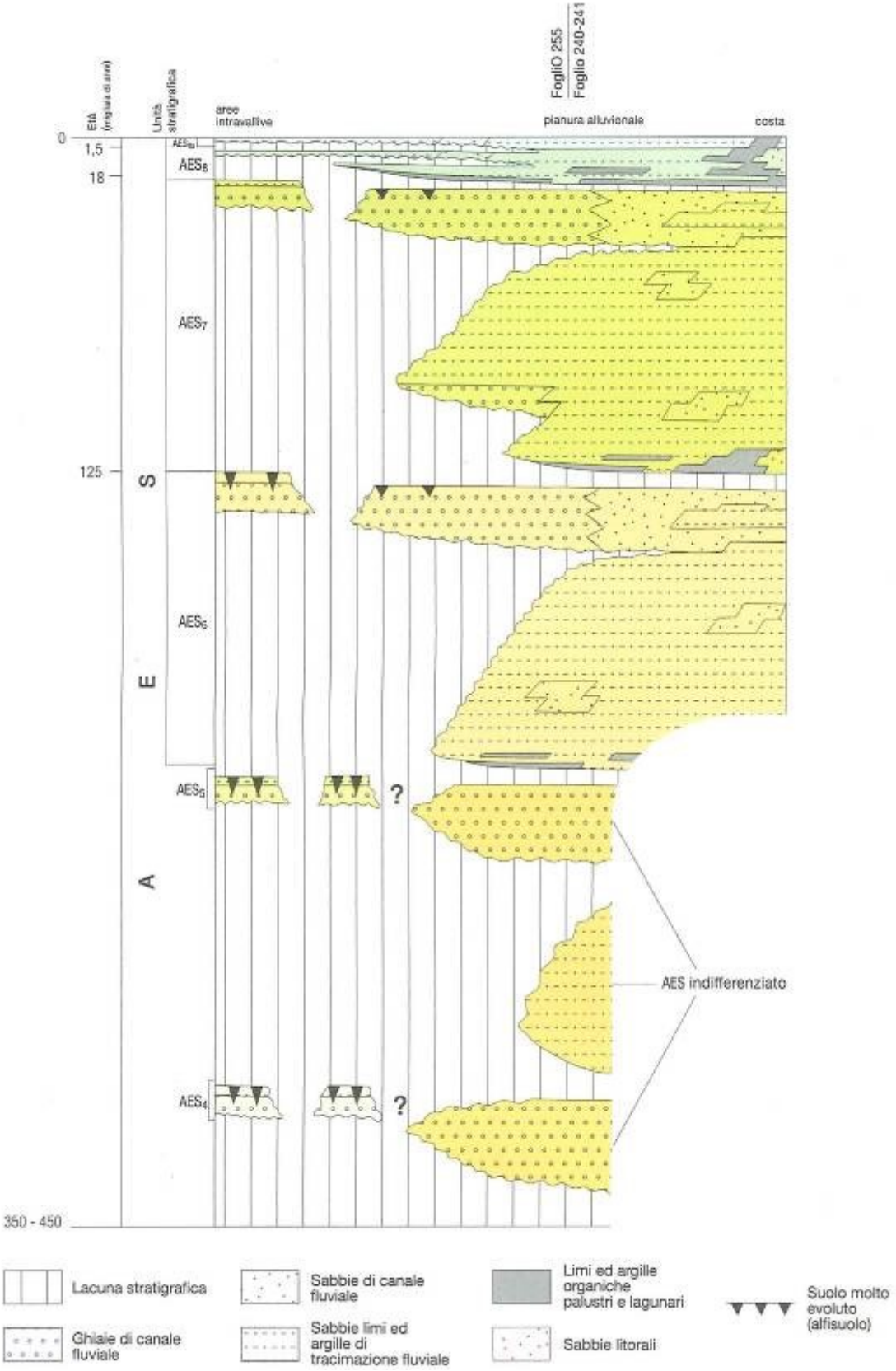

Figura n. 4.1 - Schema cronostratigrafico del sintema emiliano-romagnolo superiore (AES).

I rilievi dei microtremori, effettuati in questa sede, mostrano che nel sottosuolo del Comune di Massa Lombarda è generalmente presente un solo picco rappresentativo, caratterizzato da una frequenza compresa tra 0,8 e 1 Hz, connessa a una discontinuità prossima a profondità di 80÷90 metri.

Nell'assetto litostratigrafico locale il bedrock sismico risulta posizionabile ad una profondità dal piano di campagna pari a circa 420 metri.

5. DETERMINAZIONI ED INCERTEZZE

Nel **rilievo dei microtremori** per analisi dei rapporti spettrali delle componenti orizzontale e verticale del moto (HVSR), direttamente rilevati nello studio precedente, e nelle relative analisi sono state seguite le linee guida del progetto SESAME (European research project - Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio tecnique on ambient vibration) con le tecniche di acquisizione e le modalità di elaborazione esplicitate negli indirizzi e criteri per la microzonazione sismica.

Questo metodo (HVSR o di Nakamura) si basa sul rapporto spettrale tra le componenti orizzontale (H) e verticale (V) del noise, assumendo che la componente verticale (V) nel passare dal *bedrock* alla superficie non subisce amplificazione, e consente di determinare la "*frequenza di risonanza*" di uno strato caratteristico del sito, per il quale assume il valore massimo il rapporto *RHV* = *HS*/*VS* (*Horizontal to Vertical Ratio*) tra gli spettri delle componenti orizzontale e verticale del moto del suolo.

Ciascuna prova realizzata, riportata in dettaglio nel documento "Indagini penetrometriche e geofisiche realizzate in questo studio", ha fornito, in particolare, un grafico del rapporto spettrale H/V - frequenza, in cui si possono osservare il picco o i picchi caratteristici, in corrispondenza di determinate frequenze (figura n. 5.1).

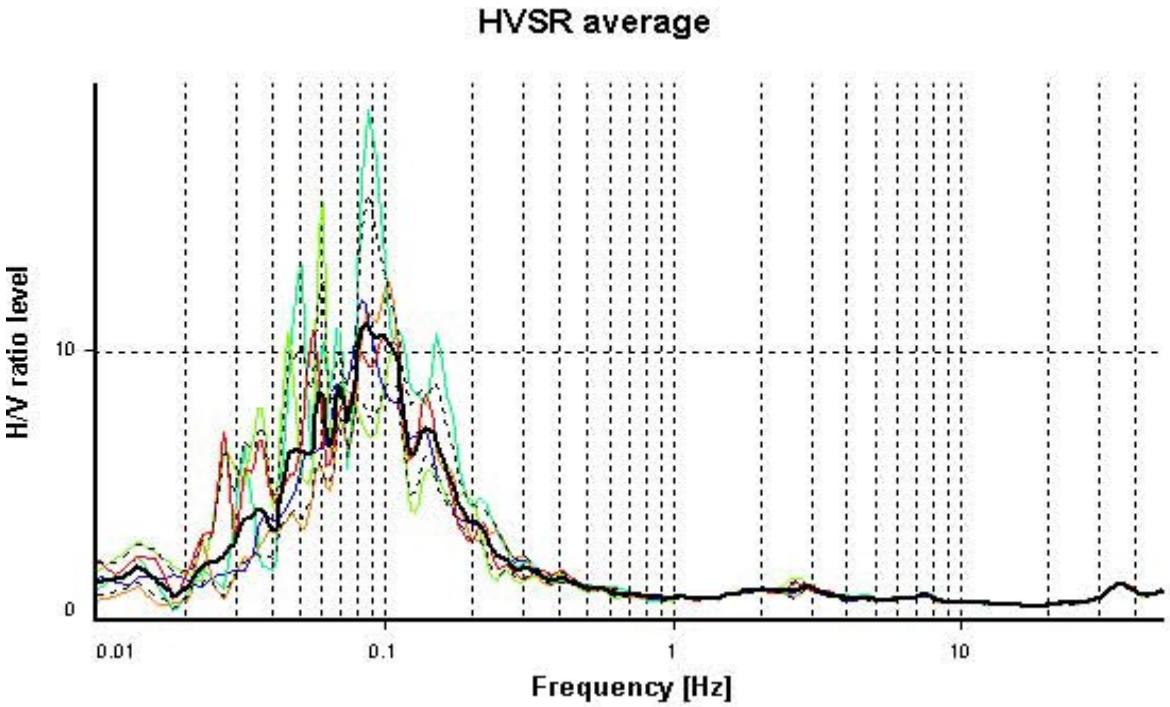

Figura n. 5.1 - Esempio di diagramma ottenuto da una prova HVSR eseguita a Massa Lombarda.

Per determinare la qualità delle singole misure HVSR effettuate e la loro relativa affidabilità, si è proceduto all'analisi della durata complessiva delle singole registrazioni, utilizzando quelle capaci di produrre stime "robuste" del campo medio delle vibrazioni ambientali. In genere le misure soddisfano i primi 3 criteri del progetto SESAME (linee guida 2005), relativi alla robustezza statistica del segnale. Solo una misura NON rispetta il primo criterio (039013P125HVSR125).

Per ogni singola acquisizione è stato inoltre valutato l'andamento complessivo della curva H/V, prestando particolare attenzione, durante la fase di elaborazione, alla plausibilità fisica della curva stessa, verificabile attraverso l'individuazione di massimi caratterizzati da una diminuzione localizzata di ampiezza dello spettro verticale.

In fase di elaborazione, sfruttando le possibilità di analisi direzionale e temporale del software utilizzato (Jsesame, Geopsy), è stata valutata la stazionarietà temporale dei rapporti spettrali misurati, prestando inoltre particolare attenzione alle variazioni azimuthali di ampiezza, nel rispetto della condizione di isotropia del segnale.

Con riferimento ai criteri delle linee guida SESAME 2005, relativi alla "chiarezza" del picco di possibile risonanza, si osserva che normalmente le misure NON soddisfano almeno 5 su 6 criteri. Solo tre casi (039013P81HVSR81, 039013P94HVSR94, 039013P128HVSR128) soddisfano questi requisiti. Verosimilmente questo accade per le peculiarità del complesso e variabile deposito del Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES), presente nel sottosuolo in esame.

Le **indagini microsismiche E.S.A.C.,** (Estended Spatial Auto Correlation) attuate nell'ambito del presente studio, sono state realizzate sfruttando uno stendimento 2D, rilevando i microtremori ambientali come fonte di eccitazione con una finestra temporale lunga. Le modalità del rilievo sono riportate nel paragrafo 3.3. della presente relazione.

La tecnica di investigazione ed elaborazione ESAC dei dati consente di rilevare la situazione sismo-stratigrafica del sottosuolo in riferimento alla velocità delle onde S, basandosi sulla misura delle onde superficiali di Rayleigh (onde di superficie prodotte da un movimento circolare retrogrado delle particelle del suolo), che si presta ad una agevole elaborazione in considerazione del fatto che il contenuto energetico risulta nettamente superiore a quello che compete alle componenti delle onde di volume P ed S, il cui decadimento ed attenuazione risulta proporzionale al quadrato della distanza piuttosto che alla distanza dalla sorgente dell'impulso.

Dato che in un mezzo stratificato le onde di Rayleigh subiscono il fenomeno della dispersione, poiché le differenti lunghezze d'onda, che descrivono il movimento delle particelle, viaggiano a velocità differenti in relazione alle caratteristiche dei terreni presenti nel sottosuolo, la loro dispersione consente di analizzare le variazioni di velocità delle onde S e di discriminare in profondità le principali variazioni di rigidità dei terreni, tenendo conto che le componenti d'onda ad alta frequenza impegnano e caratterizzano gli strati più superficiali dell'area di indagine, mentre quelle a più bassa frequenza interessano spessori maggiori del sottosuolo e caratterizzano gli strati più profondi. La velocità delle onde S si determina, in particolare, considerando che è dell'ordine del 90-110% di quella delle onde di Rayleigh.

Le interpretazioni ESAC, eseguite con softwares votati (WinMASW, Seisimager, Masw-Vitantonio e WinMasw-Eliosoft), hanno permesso di determinare le sismostratigrafie in onde S dei siti, accertando eventuali e locali inversioni di velocità e calcolando il valore equivalente alla profondità di 30 metri attraverso la seguente relazione:

$$Vs_{30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_i}}$$

dove: $\mathbf{Vs_{30}}$ è la velocità sismica ponderata su 30 metri delle onde trasversali, $\mathbf{h_i}$ è lo spessore dell'orizzonte iesimo nei 30 metri di riferimento, $\mathbf{V_i}$ è la velocità delle onde S dell'orizzonte iesimo di spessore h.

I valori ottenuti sono riportati nella specifica documentazione allegata.

6. METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI

6.1. PRIMA FASE DEL LAVORO

Nella prima fase di lavoro, considerando l'intero territorio del Comune di Massa Lombarda, ma con particolare riferimento alle aree da sottoporre allo studio di Microzonazione Sismica (territorio urbanizzato e urbanizzabile), 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 un'attenta campagna di rilievi integrativi e di controllo.

Nella prima fase di lavoro sono stati realizzati i seguenti elaborati:

- **Carta delle indagini (scala 1:3.000) -** In questa carta, suddivisa in quattro tavole, è riportata l'ubicazione di tutte le indagini in sito acquisite o realizzate nell'ambito della presente ricerca, distinte in base alla specifica tipologia (sondaggi, penetrometrie, pozzi, prove geofisiche ecc.);
- **Carta geologico-tecnica (scala 1:5.000) -** Nella realizzazione di questa carta è stata particolarmente curata l'evidenziazione degli elementi geologici e morfologici che possono modificare il moto sismico in superficie. Nella sua redazione, oltre ai dati acquisiti durante i sopralluoghi effettuati, sono stati tenuti presenti sia i rilievi ufficiali disponibili [cartografia geologica ufficiale nazionale (Servizio Geologico d'Italia) e regionale (Area Geologia, Suoli e Sismica della Regione Emilia-Romagna)], sia i documenti geologici predisposti in sede di pianificazione urbanistica comunale e sovra comunale, sia altre valide indagini su specifiche caratteristiche (geologiche, geomorfologiche, litotecniche, geotecniche e idrogeologiche) del territorio considerato;
- **Carta delle frequenze naturali dei terreni (scala 1:5.000) -** La carta presenta l'ubicazione dei punti ove sono state eseguite le indagini di sismica passiva (misure HVSR). A fianco di ciascuno di questi simboli è riportata la frequenza F relativa al picco di maggiore ampiezza (in rosso). Nel caso sia presente, è indicata anche la frequenza (in blu) di un secondo picco di minor ampiezza;
- **Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (scala 1:5.000) -** In questa carta sono indicate le aree in cui si ritiene necessario effettuare indagini e analisi di microzonazione sismica e i livelli di approfondimento ritenuti necessari, distinguendo tra zone di attenzione per l'instabilità, ove sono richiesti approfondimenti di terzo livello, e zone stabili suscettibili di amplificazioni locali, oggetto di approfondimenti di secondo livello, all'interno delle quali sono state operate ulteriori distinzioni, identificando delle microzone omogenee, sulla base delle caratteristiche litostratimetriche.

6.2. SECONDA FASE DEL LAVORO

La seconda fase del presente lavoro, la cui esecuzione ha seguito in continuità l'esecuzione della prima, ha portato alla realizzazione della **Carta delle velocità delle onde di taglio S** in scala 1:5.000. In questa carta è precisata l'ubicazione delle indagini geofisiche (MASW, RE.MI., SCPT e ESAC), concernenti il territorio in esame, con precisato il rispettivo valore di Vs30.

6.3. TERZA FASE DEL LAVORO

Nella terza ed ultima fase di lavoro è stata, infine, predisposta un'analisi approfondita di livello 3 su tutte le zone indicate nella Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica.

In questa fase è stata, pertanto, sviluppata un'Analisi della Risposta Sismica Locale che ha portato alla determinazione dello spettro di risposta in superficie e dei fattori di amplificazione che hanno permesso di realizzare anche la verifica alla liquefazione. In questa sede sono stati prodotti i seguenti elaborati:

- Carta di microzonazione sismica - FPGA in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $FA_{0,1 - 0,5\ s}$ in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $FA_{0,4 - 0,8\ s}$ in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $FA_{0,7 - 1,1\ s}$ in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $FA_{0,5 - 1,5\ s}$ in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $FH_{0,1 - 0,5\ s}$ in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $FH_{0,5 - 1,0\ s}$ in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $FH_{0,5 - 1,5\ s}$ in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - H_{sm} in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $H_{0,4 - 0,8\ s}$ in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $H_{0,7 - 1,1\ s}$ in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $H_{0,5 - 1,5\ s}$ in scala 1:5.000

7. ELABORATI CARTOGRAFICI

7.1. CARTA DELLE INDAGINI

Nella Carta delle indagini in scala 1:3.000, composta da quattro tavole, concernente il territorio comunale di Massa Lombarda è riportata l'ubicazione di tutte le indagini in sito acquisite o realizzate nell'ambito della presente ricerca. Nella relativa legenda esse sono così distinte:

- Sondaggio a carotaggio continuo
- Prova penetrometrica statica con punta meccanica (CPT)
- Prova penetrometrica statica con punta elettrica (CPE)
- Prova penetrometrica statica con piezocono (CPTU)
- Prova penetrometrica con cono sismico (SCPTU)
- Pozzo per acqua
- Stazione microtremore a stazione singola (HVSR)
- ESAC
- Stratigrafia zona MS (teorica)
- MASW

Nella carta sono inoltre indicati i confini del Comune e i limiti delle aree oggetto di microzonazione sismica.

7.2. CARTA GEOLOGICO-TECNICA PER MICROZONAZIONE SISMICA

Nella realizzazione della Carta geologico-tecnica per la microzonazione sismica in scala 1:5.000 sono state utilizzate le informazioni di base (geologia, geomorfologia, caratteristiche litotecniche, geotecniche e idrogeologiche) derivate, com'è già stato fatto rilevare, da un apposito rilievo di superficie e dall'acquisizione della relativa documentazione nazionale, regionale, provinciale e comunale disponibile.

Il lavoro effettuato ha consentito di definire il modello del sottosuolo di Massa lombarda, già descritto, ed è stato funzionale anche alla realizzazione della Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (scala 1:5.000).

Nella figura n. 7.1 è riportata una sezione geologica, idonee a precisare ulteriormente il modello geologico locale, ricavate dal sito dell'Area Geologia, Suoli e Sismica - Regione Emilia-Romagna. La sua individuazione è evidente nella carta geologico-tecnica in scala 1:5.000.

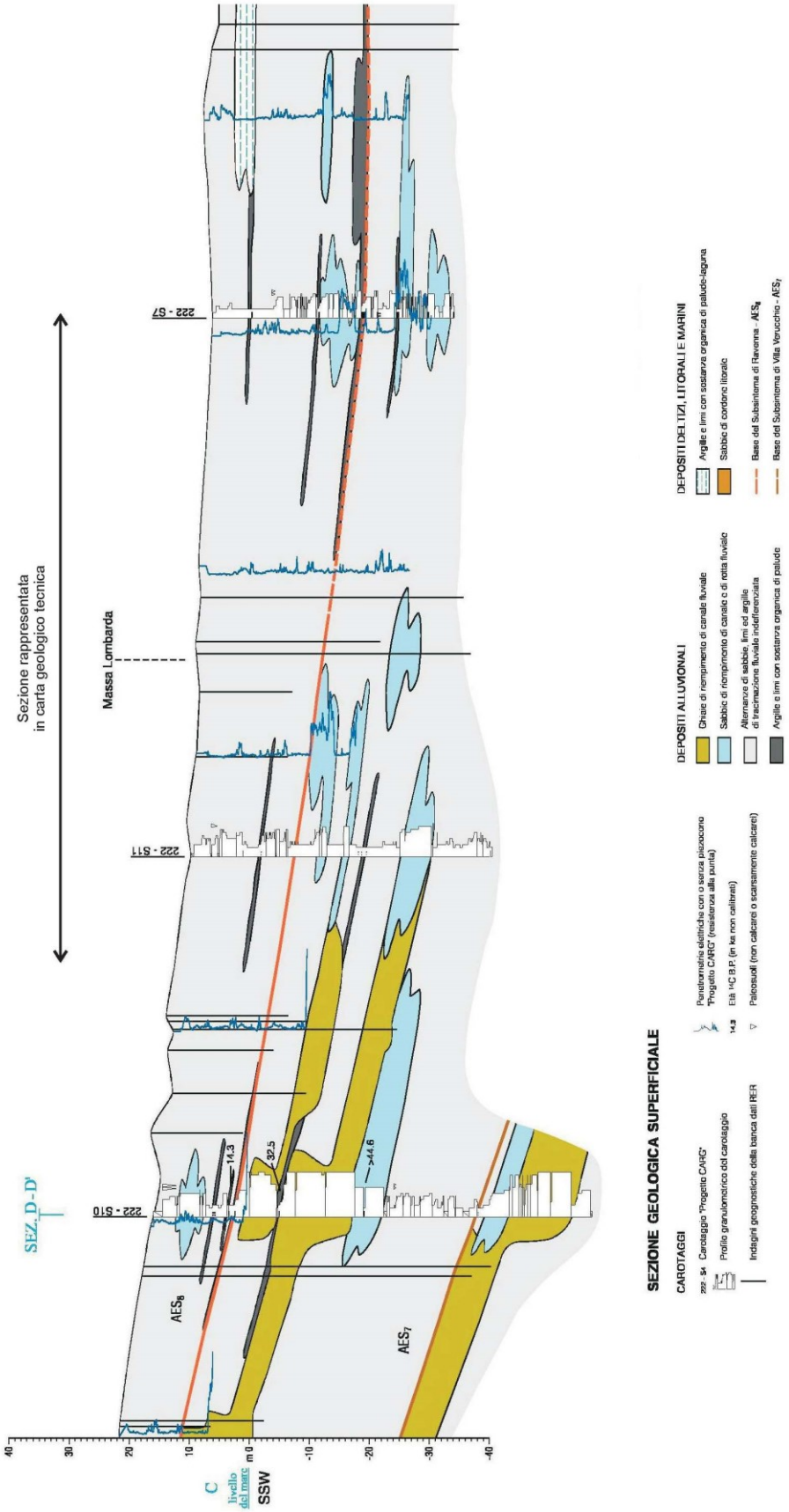

Figura n. 7.1 - Sezione 1-1'. Sezione RER n. 080.

Dall'esame della sezione, riportata nella figura n. 7.1 risulta che nel sottosuolo del Comune di Massa Lombarda è presente una successione stratigrafica costituita, procedendo dalla superficie verso il basso, da:

- sedimenti di varia litologia di pertinenza del Sintema Emiliano Romagnolo Superiore (AES), contraddistinto, all'aumentare della profondità, dalla sequenza costituita dal Subsintema di Ravenna (AES8), dal Subsintema di Villa Verucchio (AES7) e dal Subsintema di Bazzano (AES6) ed infine da AES indifferenziato;
- sedimenti di varia litologia di pertinenza del Sintema Emiliano Romagnolo Inferiore (AEI);
- sedimenti di pertinenza delle Sabbie di Imola (IMO), evidenziati da sondaggi eseguiti nella zona di Rimini.

I depositi del Subsintema di Ravenna (AES_8) raggiungono profondità massime di 18-20 metri rispetto al piano di campagna. La base del Subsintema di Villa Verucchio (AES_7), a seconda delle posizioni, si trova ad una profondità variabile tra i 50 e i 100 metri. La base del Subsintema di Bazzano (AES_6), presenta un andamento analogo a quella di AES_7 e profondità massime variabili tra 80 e 160 metri. La base dell'intero AES locale è situata, al di sotto della superficie, a profondità dell'ordine di 180-200 metri. A loro volta, per i sedimenti di varia litologia di pertinenza del Sintema Emiliano Romagnolo Inferiore (AEI) si è ipotizzato che raggiungano nella zona di Massa Lombarda profondità dell'ordine di 420 metri rispetto alla superficie.

Con simili caratteristiche del sottosuolo, è facile comprendere come nel territorio del Comune di Massa lombarda non sia facile ipotizzare quale orizzonte corrisponda al substrato rigido.

Certamente, con l'incremento della profondità, aumentano i depositi addensati e il relativo aumento delle Vs. Va però tenuto presente che i profili di Vs, in ciascuna verticale, risentono in modo significativo anche delle caratteristiche dei tipi litologici attraversati, con evidenti incrementi al passaggio da un orizzonte fine ad uno prevalentemente sabbioso/ghiaioso e un corrispondente decremento nella situazione opposta.

Nell'assetto litostratigrafico locale il *bedrock* sismico risulta pertanto posizionabile ad una profondità dal piano di campagna decisamente superiore a 100 metri e potrebbe coincidere con le Sabbie di Imola (IMO) o con il sottostante Gruppo del Santerno.

Nella Carta geologico-tecnica, con riferimento allo Standard di Rappresentazione e archiviazione informatica (SRAI) Microzonazione sismica, versione 4.2, sono state distinte, in base alle caratteristiche tessiturali, le seguenti unità di terreni di copertura:

- **CL** - Argille inorganiche di media-bassa plasticità, argille ghiaiose o sabbiose, argille limose, argille magre;
- **SM** - Sabbie limose, miscela di sabbia e limo;
- **SP** - Sabbie pulite con granulometria poco assortita.

Nella Carta geologico-tecnica sono indicati i pozzi o sondaggi che non hanno raggiunto il substrato geologico [con indicazione della profondità (m) raggiunta], la presenza della falda in aree con sabbie e/o ghiaie [con indicazione della profondità (m) del tetto della falda], l'asse di paleoalveo e gli ambienti genetico-deposizionali dei terreni di copertura. Nella carta sono anche evidenti le tracce delle sezioni geologiche rappresentative del modello del sottosuolo locale.

7.3. CARTA DELLE FREQUENZE NATURALI DEI TERRENI

Nella Carta delle frequenze naturali dei terreni in scala 1:5.000, realizzata utilizzando i dati dei microtremori disponibili (di provenienza archivistica o acquisiti nell'ambito del presente studio), sono stati ubicati i punti ove sono state effettuate le misure HVSR. Accanto all'indicazione di ciascuna prova è stato indicato il valore F del picco significativo, corrispondente a quello di maggiore ampiezza e, quando presente, il valore di un secondo picco significativo di minore ampiezza rispetto a quello precedente.

Per rendere graficamente più evidenti le variazioni di questi valori in relazione alla reciproca posizione, conformemente a quanto prescrivono gli indirizzi tecnici, sono stati utilizzati colori diversi per distinguere le prove a seconda della frequenza principale. A tale scopo sono state definite le seguenti classi:

$F \leq 0{,}6$ Hz
$0{,}6$ Hz $< F \leq 1$ Hz
1 Hz $< F \leq 2$ Hz
2 Hz $< F \leq 8$ Hz
$F > 8$ Hz

Inoltre, sono state utilizzate simbologie diverse a seconda che la prova sia caratterizzata, in corrispondenza della frequenza principale, dalle seguenti ampiezze di picco:

$1{,}5 \leq HVSR < 2$
$2 \leq HVSR < 3$
$HVSR \geq 3$

Un particolare simbolo indica anche l'assenza di picchi significativi.

7.4. CARTA DELLE MICROZONE OMOGENEE IN PROSPETTIVA SISMICA

La Carta delle Microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS) in scala 1:5.000 del Comune di Massa Lombarda è il documento fondamentale del primo livello di approfondimento ed è stata costruita sulla base degli elementi predisponenti alle amplificazioni e alle instabilità sismiche, definiti nell'ambito del presente studio. In funzione delle informazioni acquisite, il territorio viene generalmente suddiviso con riferimento alle seguenti categorie:

1) ***zone stabili*** - Aree con affioramento di un substrato rigido e morfologia pianeggiante o poco acclive, nelle quali non si ipotizzano effetti locali di alcuna natura e in cui non sono richiesti ulteriori approfondimenti.
2) ***zone stabili suscettibili di amplificazioni locali*** - 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 di attenzione per l'instabilità***. Aree nelle quali gli effetti sismici attesi e predominanti, oltre ai fenomeni di amplificazione, sono riconducibili a deformazioni permanenti del territorio, quali instabilità di versante (frane attive e quiescenti), liquefazioni e densificazione. In particolare, le Zone di Attenzione per liquefazione sono le zone nelle quali gli studi di Livello 1 hanno verificato che esistono 4 condizioni predisponenti:
    1. terreni sabbiosi;

2. falda a profondità inferiore a 15 metri;
3. Mw attesa al sito >5;
4. accelerazioni massime in superficie (PGA) >0.1g.

Tuttavia, è necessario precisare che tali zone hanno un livello di approfondimento comparabile con le altre zone di questo livello e, pertanto, non possono essere ancora classificate come zone effettivamente instabili, fintanto che non vengano esperiti i necessari approfondimenti propri del Livello 3. In queste zone sono richiesti approfondimenti di terzo livello.

Nel territorio di Massa lombarda, come si può osservare nella relativa Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica, non è presente la categoria 1 - zone stabili. Figurano invece le categorie 2 e 3.

Appartengono alle zone stabili suscettibili di amplificazioni locali le aree identificate come **ZONA 1**, codice **2001** - Successione stratigrafica costituita da prevalenti depositi fini costituiti da miscele di limi e argille, con subordinate intercalazioni di livelli sabbiosi e sabbioso limosi generalmente presenti oltre la profondità di -20 m da p.c. Il bedrock è stato assunto coincidente con la formazione delle Sabbie di Imola, situata alla profondità di circa -420 m da piano campagna. Questa microzona omogenea è dotata di un proprio profilo stratigrafico tipo, riferito ai primi 35 metri di sottosuolo (figura n. 7.2).

Alle zone di attenzione per l'instabilità è stato attribuito il codice 3050. Sono state suddivise le seguenti zone:

- **ZONA 2**, codice **30502002** ZALQ: zona di attenzione per liquefazione - Successione stratigrafica costituita da depositi sabbiosi superficiali localizzati generalmente nei primi 15 metri di profondità, cui fanno seguito depositi prevalentemente argilloso-limosi. Il bedrock è stato assunto coincidente con la formazione delle Sabbie di Imola, situata alla profondità media di circa -420 m da piano campagna. Questa microzona omogenea è dotata di un proprio profilo stratigrafico tipo, riferito ai primi 35 metri di sottosuolo (figura n. 7.3);
- **ZONA 3**, codice **30502003** ZALQ: zona di attenzione per liquefazione - Successione stratigrafica costituita da depositi argilloso-limosi con intercalazioni sabbiose e sabbioso-limose, che da profondità di -12-15 m si spingono sino a circa -22 m da p.c. Oltre la profondità di -25 m si rinvengono localmente ulteriori intercalazioni sabbiose di limitato spessore. Il bedrock è stato assunto coincidente con la formazione delle Sabbie di Imola, situata alla profondità di circa -420 m da piano campagna. Questa microzona omogenea è dotata di un proprio profilo stratigrafico tipo, riferito ai primi 35 metri di sottosuolo (figura n. 7.4);
- **ZONA 4**, codice **30502004** ZALQ: zona di attenzione per liquefazione - Successione stratigrafica costituita da depositi argilloso-limosi con intercalazioni sabbiose e sabbioso-limose di ridotto spessore, prevalentemente localizzate oltre la profondità -15 m da p.c. Il bedrock è stato assunto coincidente con la formazione delle Sabbie di Imola, situata alla profondità di circa -420 m da piano campagna. Questa microzona omogenea è dotata di un proprio profilo stratigrafico tipo, riferito ai primi 35 metri di sottosuolo (figura n. 7.5).

Nella Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica sono rappresentati anche i punti di misura del rumore ambientale, con l'indicazione del valore F del picco a maggiore ampiezza e l'asse di paleoalveo.

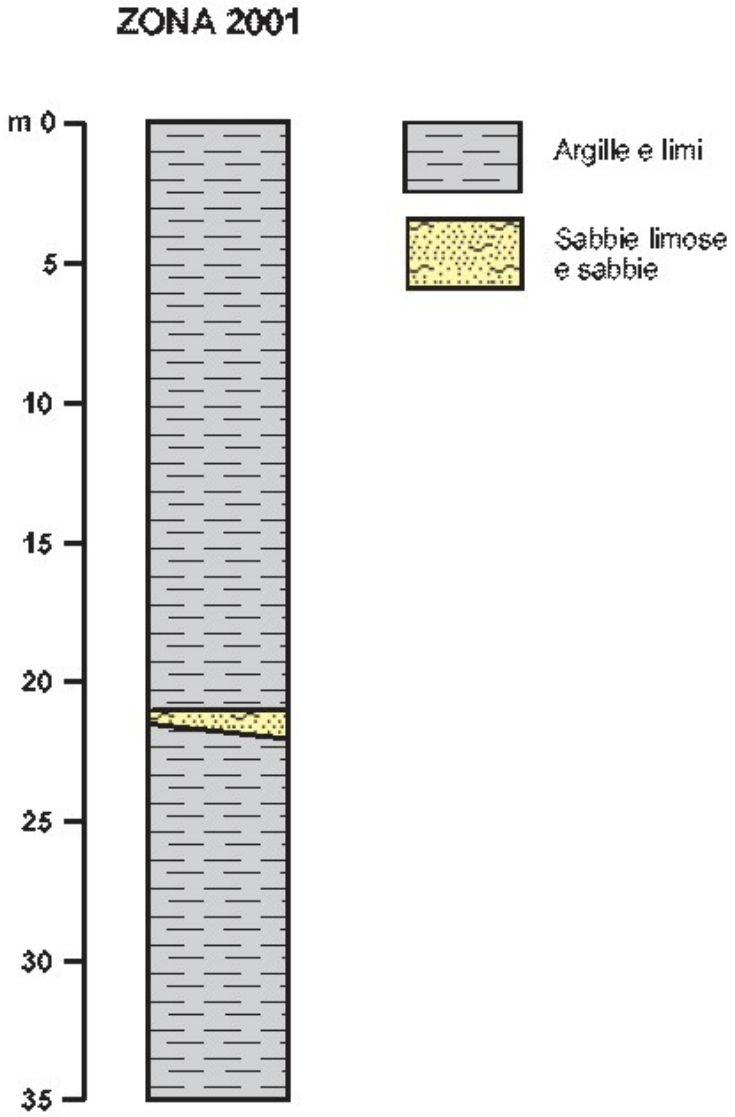

Figura n. 7.2 - Colonna stratigrafica sintetica rappresentante la MOPS: ZONA 1 Cod. 2001.

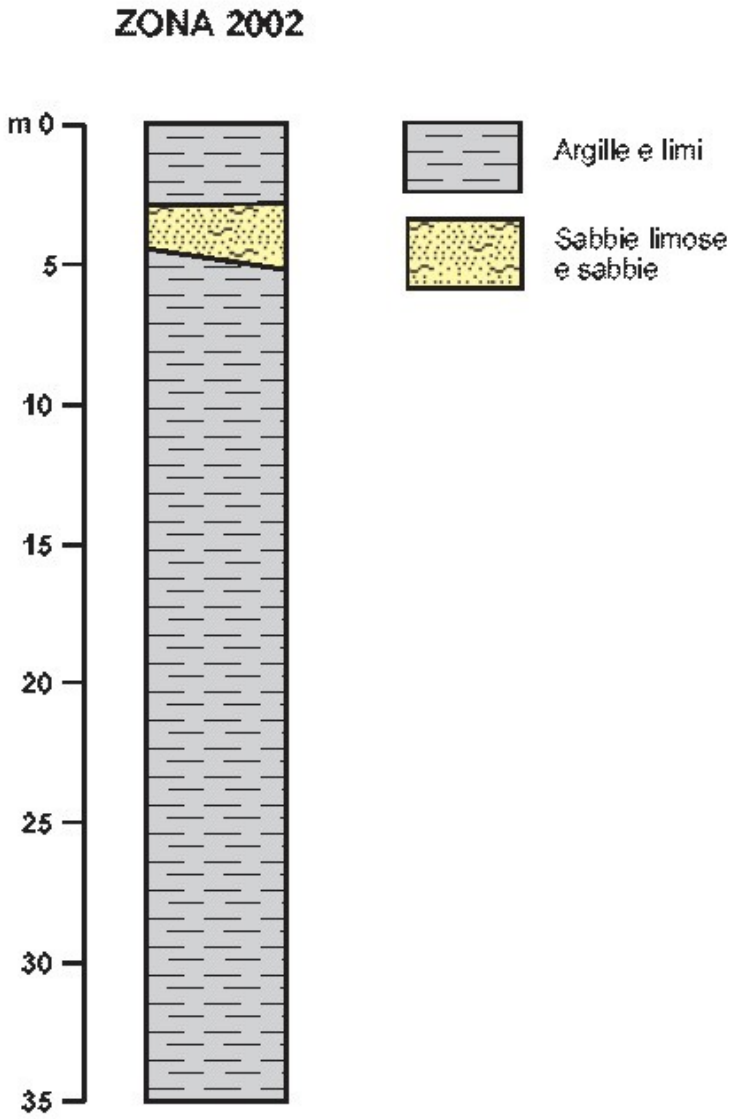

Figura n. 7.3 - Colonna stratigrafica sintetica rappresentante la MOPS: ZONA 2, ZALQ Cod. 30502002.

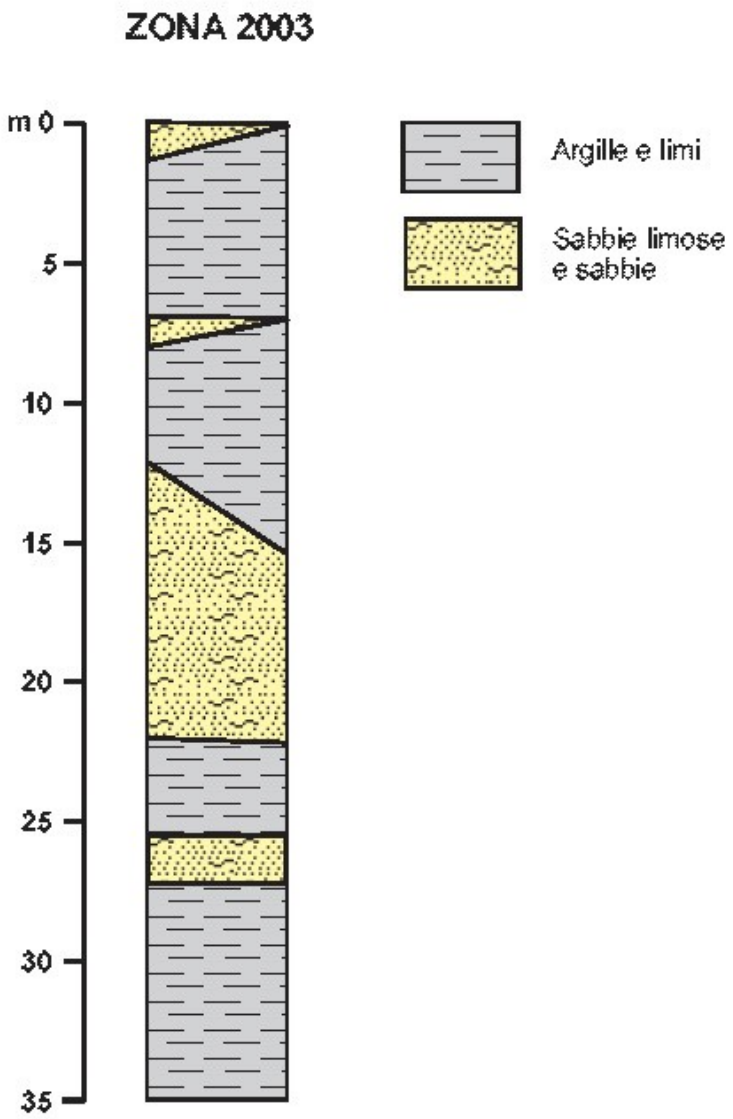

Figura n. 7.4 - Colonna stratigrafica sintetica rappresentante la MOPS: ZONA 3, ZALQ Cod. 30502003.

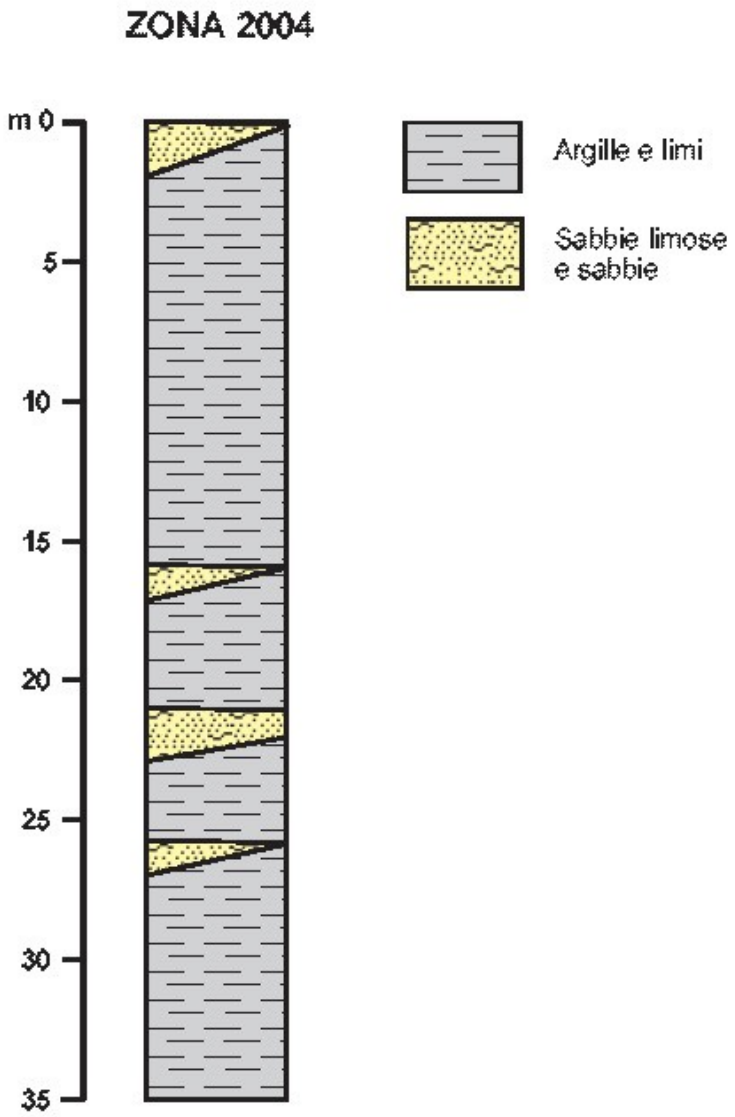

Figura n. 7.5 - Colonna stratigrafica sintetica rappresentante la MOPS: ZONA 4, ZALQ Cod. 30502004.

7.5. CARTA DELLE VELOCITÀ DELLE ONDE DI TAGLIO S

Nella Carta delle Vs in scala 1:5.000 del Comune di Massa Lombarda è precisata l'ubicazione dei rilievi geofisici effettuati/acquisiti:

- M.A.S.W. o Re.Mi.;
- ESAC;
- Prova penetrometrica con cono sismico.

Accanto a ciascuno dei rilievi geofisici effettuati/acquisiti è stato precisato il corrispondente valore di Vs_{30} (in m/s). In tutte le misure effettuate, la profondità del substrato sismico (H) è risultata essere superiore a 30 metri (se fosse stata inferiore si sarebbe dovuto considerare Vs_H al posto di Vs_{30}).

7.6. CARTE DI MICROZONAZIONE SISMICA

Nelle seguenti tavole, conclusive del presente studio:

- Carta di microzonazione sismica - FPGA in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $FA_{0,1 - 0,5\,s}$ in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $FA_{0,4 - 0,8\,s}$ in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $FA_{0,7 - 1,1\,s}$ in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $FA_{0,5 - 1,5\,s}$ in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $FH_{0,1 - 0,5\,s}$ in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $FH_{0,5 - 1,0\,s}$ in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $FH_{0,5 - 1,5\,s}$ in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - H_{sm} in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $H_{0,4 - 0,8\,s}$ in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $H_{0,7 - 1,1\,s}$ in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $H_{0,5 - 1,5\,s}$ in scala 1:5.000

sono riportati i seguenti elementi:

- Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali;
- Zone di attenzione per instabilità (liquefazioni, livello 3);
- Verticale di verifica alla liquefazione (Boulanger & Idriss - 2014) con indicato il valore di IL;
- Confine comunale;
- Aree oggetto di microzonazione.

Sia per le zone stabili suscettibili di amplificazioni locali sia per le Zone suscettibili di instabilità (livello 3) i valori dei Fattori di Amplificazione sono stati calcolati attraverso un'analisi di Risposta Sismica Locale evidente nel capitolo successivo.

L'amplificazione è stata quantificata in termini di:

- $F_{PGA} = PGA/PGA_0$, dove PGA_0 è l'accelerazione massima orizzontale a periodo T=0 al suolo di riferimento e PGA è l'accelerazione massima orizzontale a periodo T=0 alla superficie del sito;
- $FA = SA/SA_0$, dove SA_0 è l'integrale dello spettro di risposta in accelerazione al suolo di riferimento e SA è l'integrale dello spettro di risposta in accelerazione alla superficie del sito per prefissati intervalli di periodi T: SA1 per $0,1s \leq T \leq 0,5s$, SA2 per $0,4s \leq T \leq 0,8s$, SA3 per $0,7s \leq T \leq 1,1s$, SA4 per $0,5s \leq T \leq 1,5s$;

- FH = SI/SI_0, dove SI_0 è l'integrale dello spettro di risposta in velocità (Intensità di Housner) al suolo di riferimento e SI è l'integrale dello spettro di risposta in velocità (o corrispondente grandezza di Intensità di Housner) alla superficie del sito per prefissati intervalli di periodi T: SI1 per 0,1s≤T≤0,5s, SI2 per 0,5s≤T≤1,0s, SI3 per 0,5s≤T≤1,5s.

La tabella n. 7.1 riporta la sintesi dei Fattori di Amplificazione delle varie microzone, ottenuti dalle analisi di risposta sismica locale sviluppate nel capitolo successivo.

TABELLA N. 7.1 - FATTORI DI AMPLIFICAZIONE DETERMINATI III LIVELLO

MOPS	ZONA	FATTORI DI AMPLIFICAZIONE								NOTE
		FPGA	FA 0,1-0,5 S	FA 0,4-0,8 S	FA 0,7-1,1 S	FA 0,5-1,5 S	FH 0,1-0,5 S	FH 0,5-1,0 S	FH 0,5-1,5 S	
STAB	2001	1,47	1,49	2,42	2,86	2,71	1,39	2,53	2,63	
INSTAB	2002	1,41	1,47	2,04	2,39	2,29	1,41	2,12	2,26	Liquefazione
INSTAB	2003	1,38	1,43	2,08	2,39	2,30	1,37	2,15	2,26	Liquefazione
INSTAB	2004	1,43	1,50	2,19	2,39	2,32	1,45	2,21	2,28	Liquefazione

8. ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE

8.1. AREA CONSIDERATA

Gli approfondimenti di terzo livello sono stati eseguiti su tutte le aree oggetto di microzonazione sismica. È stata, in particolare, definita una successione sismostratigrafica tipo per ogni mops, coerente con i risultati delle indagini specificatamente condotte su tali aree, risultate globalmente omogenee dal punto di vista della risposta sismostratigrafica. Questo consente d'interpretare il sottosuolo considerato, ai fini delle specifiche verifiche, secondo un modello 1D.

8.2. METODOLOGIA

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 delle 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 condotta con metodo monodimensionale su ciascuna delle microzone omogenee soggette ad instabilità che caratterizzano il territorio oggetto di microzonazione sismica.

8.3. MODELLO GEOFISICO DEL SOTTOSUOLO

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

- litologia;
- velocità delle onde sismiche di taglio (VS);
- densità dei litotipi indagati;
- curve di variazione dello smorzamento (D) e della rigidezza (G/G0) 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.

8.3.1. Litologia

Per la determinazione delle caratteristiche litologiche sono stati utilizzati i dati di prove penetrometriche e di sondaggi a carotaggio continuo disponibili nell'areale.

Nelle zone soggette ad instabilità, le indagini hanno evidenziato la presenza di terreni prevalentemente argilloso-limosi con locali intercalazioni sabbioso-limose di spessore da decimetrico a metrico di forma lenticolare e/o nastriforme.

Nelle zone stabili invece non sono assenti intercalazioni sabbiose di spessore significativo entro i primi 20 metri di profondità.

8.3.2. Determinazione della Vs e del bedrock sismico

La valutazione di risposta sismica locale è stata definita considerando le sismostratigrafie derivanti dall'interpretazione delle indagini pregresse e di quelle appositamente realizzate nel corso di questo studio.

In particolare, le misure dirette di Vs attraverso prove con cono sismico, hanno consentito una dettagliata ricostruzione del profilo di Vs sino alla profondità di circa -30 metri dal piano campagna.

Per profondità maggiori sono stati utilizzati modelli sismostratigrafici derivanti dalla interpretazione delle misure di microtremori a stazione singola. Tali interpretazioni sono state effettuate sulla base di dati stratigrafici derivanti da pozzi profondi per ricerca di idrocarburi e dalle sezioni geologiche della RER.

I modelli sismostratigrafici determinati per il territorio del Comune di Sant'Agata sul Santerno evidenziano la presenza di un primo contrasto di impedenza a profondità variabili da -90 m a -100 m da p.c., localizzato in corrispondenza del tetto del Subsintema di Bazzano AES6 (v. Figura n. 8.1). Tale contrasto di impedenza è associato al picco degli spettri H/V delle misure HVSR che caratterizzano il territorio alla frequenza di 0,8÷0,9 Hz (Figura n. 8.2). Ulteriori contrasti di impedenza, anche se di entità minore, sono stati associati alla base del Sintema Emiliano-Romagnolo Sup. (AES) e al tetto del substrato marino localizzato a profondità variabili da -400 a -500 m da p.c..

Nei modelli sismostratigrafici del presente studio il substrato marino, caratterizzato da una Vs dell'ordine di 650÷700 m/s e corrispondente alle Sabbie di Imola, è stato assunto come bedrock sismico locale, pur non essendo caratterizzato da velocità superiori a 800 m/s.

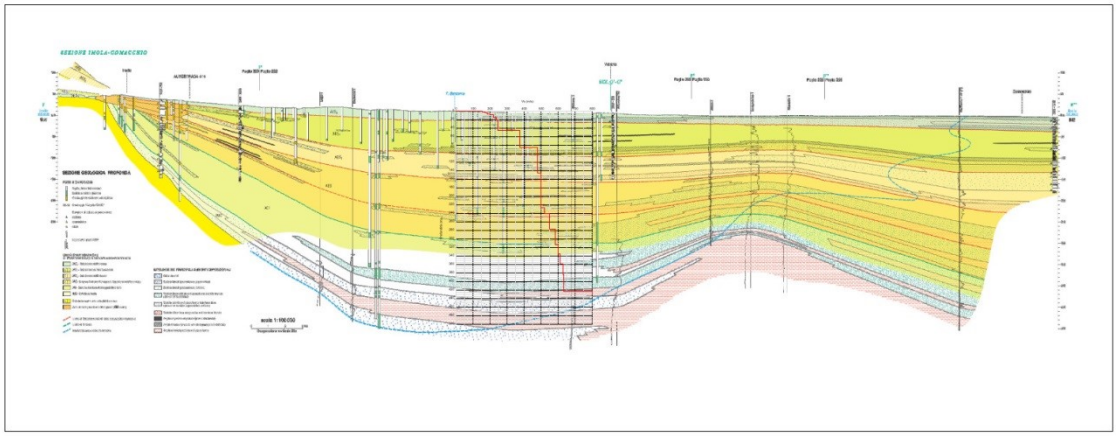

Figura n. 8.1 – Sezione geologica n. 081 della RER con sovrapposto il profilo di Vs del modello sismostratigrafico della zona di Massa Lombarda

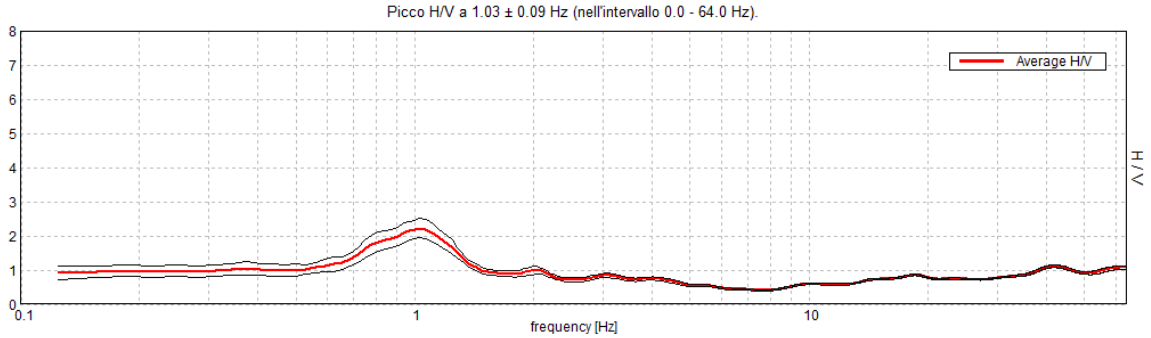

Figura n. 8.2 – Spettro H/V della misura di microtremori a stazione singola 039013P128HVSR128

In particolare, il modello sismostratigrafico adottato è caratterizzato da un profilo di Vs con velocità crescenti con la profondità e modesti contrasti di impedenza in corrispondenza delle superfici che separano le diverse unità stratigrafiche costituenti il Supersintema Emiliano-Romagnolo (figura n. 8.1 e 8.2). Il bedrock sismico è stato fatto coincidere con il tetto del substrato di origine marina (Sabbie di Imola).

8.3.3. Curve di variazione dello smorzamento (D) e della rigidezza (G/G0)

All'aumentare del livello di deformazione angolare raggiunta dal terreno si ha una diminuzione del modulo di taglio G ed un aumento del rapporto di smorzamento D. Tale comportamento può essere descritto, per ogni tipo di materiale presente nella stratigrafia, da due curve di decadimento, una relativa a G ed una D.

Per la valutazione delle curve di variazione del rapporto di smorzamento (D) e del decadimento del modulo di taglio normalizzato (rigidezza, G/G_0) in funzione della deformazione di taglio (γ), sono stati utilizzati dati ottenuti da prove di colonna risonante eseguite su campioni di terreno prelevati nel territorio dell'Unione Bassa Romagna nei primi 50 metri di profondità.

Da tali dati sono state ottenute curve di decadimento rappresentative di terreni di differenti litologie e classi di profondità, ricorrendo alle leggi di variazione dei parametri D e G/G0 mediante il modello iperbolico di Yokota (1981).

Le leggi di variazione proposte da Yokota sono le seguenti:

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

$$D = \eta e^{\left[-\lambda \frac{G}{G^0}\right]}$$

dove:

G/G0 = modulo di taglio normalizzato

D = rapporto di smorzamento

γ = deformazione di taglio

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

In figura 8.3 è riportato il grafico esemplificativo della procedura relativa a terreni argilloso-limosi della classe di profondità 0-20 metri.

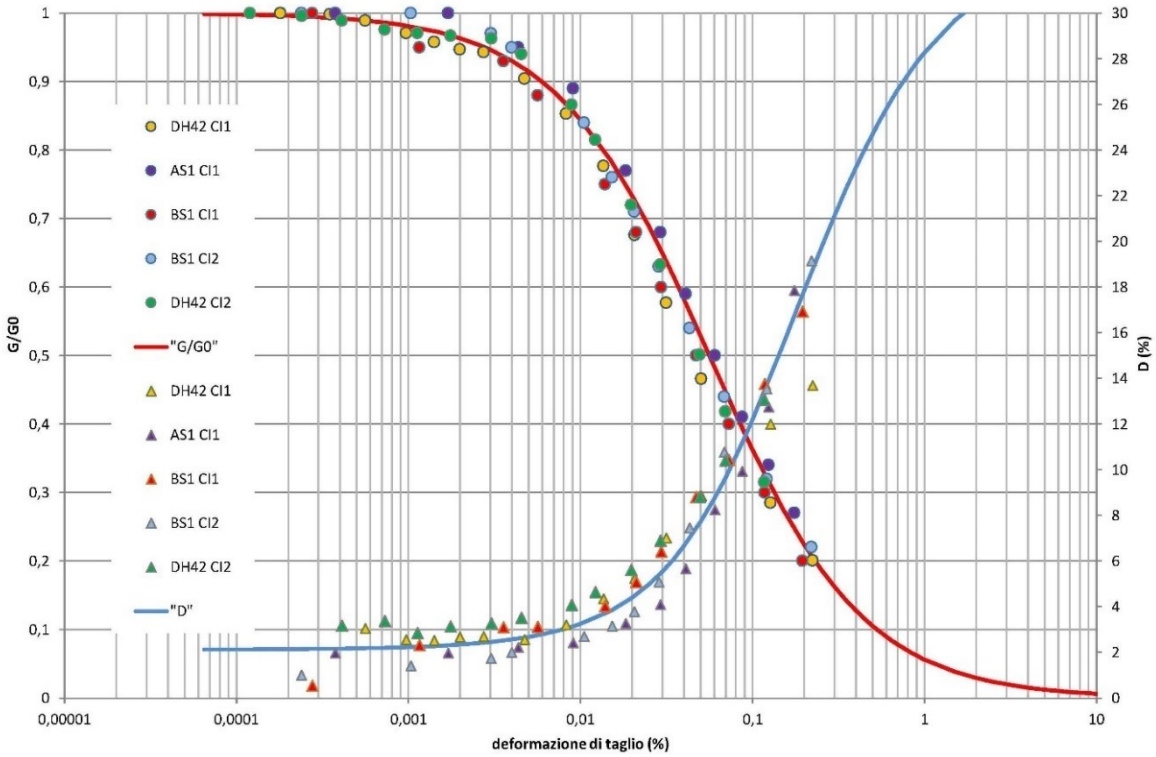

Figura n. 8.3 – Grafico dei dati sperimentali e delle curve di interpolazione per terreni argilloso-limosi classe di profondità 0-20 metri

In figura 8.4 è riportato il grafico esemplificativo della procedura relativa a terreni argilloso-limosi della classe di profondità 20-30 metri.

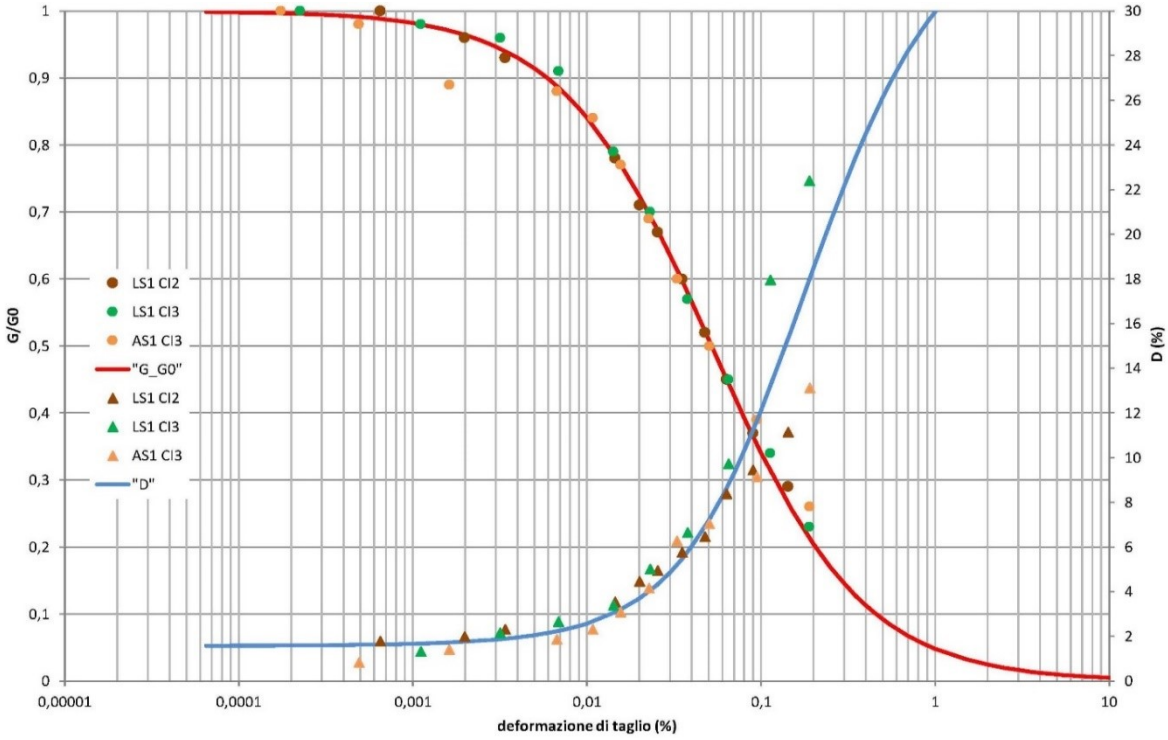

Figura n. 8.4 - Grafico dei dati sperimentali e delle curve di interpolazione per terreni argilloso-limosi classe di profondità 20-30 metri

In figura 8.5 è riportato il grafico esemplificativo della procedura relativa a terreni argilloso-limosi della classe di profondità 30-50 metri.

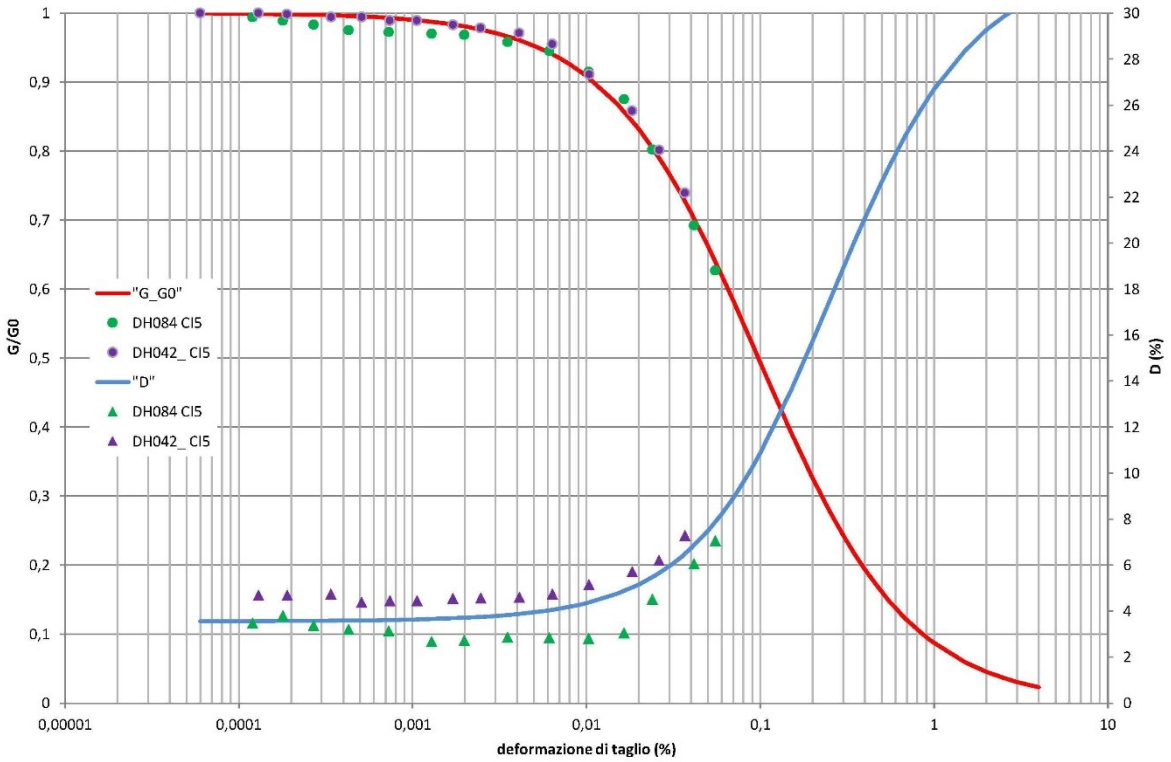

Figura n. 8.5 – Grafico dei dati sperimentali e delle curve di interpolazione per terreni argilloso-limosi classe di profondità 30-50 metri

In figura 8.6 è riportato il grafico esemplificativo della procedura relativa a terreni sabbioso limosi.

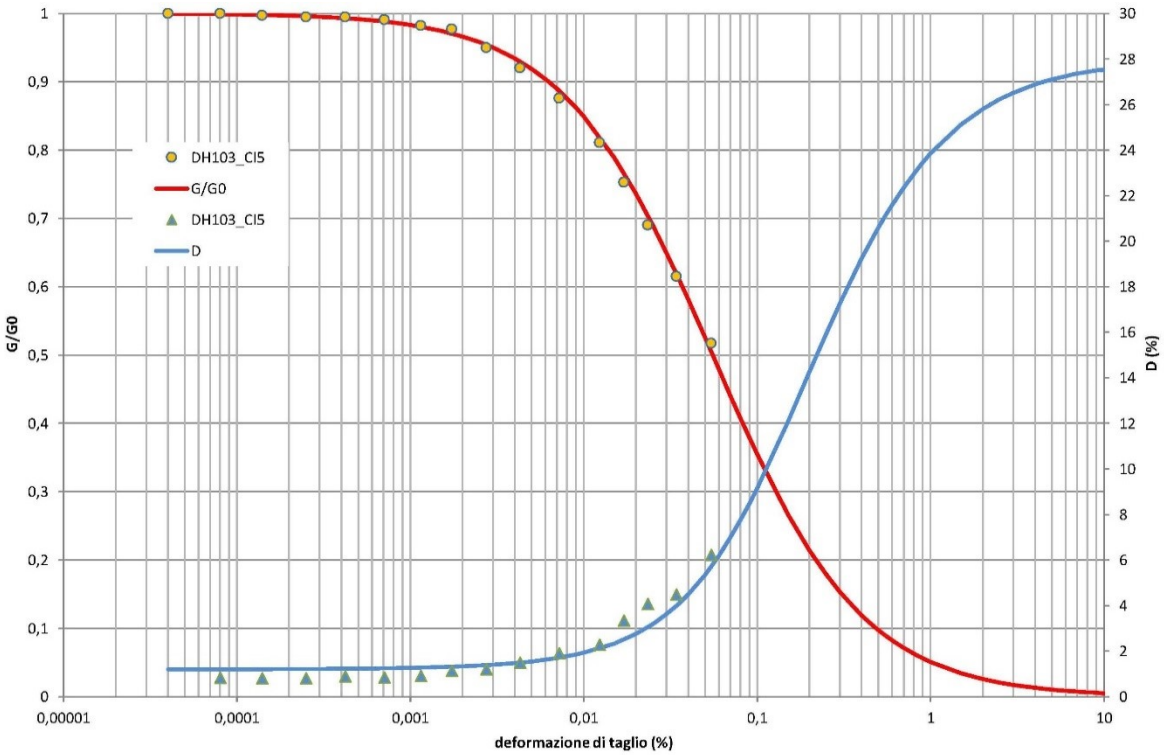

Figura n. 8.6 – Grafico dei dati sperimentali e delle curve di interpolazione per terreni sabbioso-limosi

Per profondità maggiori di 50 metri sono invece state utilizzate curve di letteratura riferite a diversi intervalli di profondità: EPRI (93) per le sabbie e Darendeli (2001) per argille e limi.

8.3.4. 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"[8].

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 ai nodi più vicini alle MOPS individuate: n° 17182.

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.

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

Mw	Distanza epicentrale	Fattore di scala	File
6,90	62,90	0,73	ESM EU.HRZ..HNE.D.19790415.061941.C.ACC.ASC
5,74	12,57	1.59	NGA RSN146_COYOTELK_G01320.AT2
6,93	94,31	2,00	NGA RSN797_LOMAP_RIN090.AT2
6,69	38,07	1.23	NGA RSN1091_NORTHR_VAS090.AT2
6,60	31,00	0.75	KiKnet SMNH100010061330.EW2
6,60	62,00	1,33	KiKnet SAGH050503201053.EW2
6,10	97,00	1,52	KiKnet MYGH041103280724.EW2

Tabella 8.1 – Sismi con tempo di ritorno di 475 anni nodo 17182

8.4. PROCEDURA DI ANALISI RSL

Per la valutazione della risposta sismica locale è stato utilizzato il codice di calcolo LSR 2D (Local Sismic Response 2D) Ver. 5.1.0 di STACEC.

Questo codice consente di effettuare una modellazione monodimensionale e 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.

8.4.1. Metodo lineare equivalente

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

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

In particolare, per quanto riguarda la risposta sismica dei depositi, l'approccio visco-elastico lineare equivalente rappresenta un valido compromesso tra

semplificazione delle analisi ed accuratezza dei risultati. La strategia consiste sostanzialmente nel fare riferimento alle soluzioni visco-elastiche lineari per la propagazione delle onde sismiche adeguando in modo iterativo i parametri costitutivi in funzione del livello deformativo indotto dal moto sismico nel terreno.

Tale modello lineare equivalente, studia il comportamento tra tensione e deformazione del terreno basandosi sul modello di Kelvin-Voigt, illustrato nella figura n. 8.7.

La tensione τ dipende dalla deformazione γ e dalla sua derivata γ', secondo la relazione:

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

dove:
G = Modulo di taglio
η = viscosità del mezzo

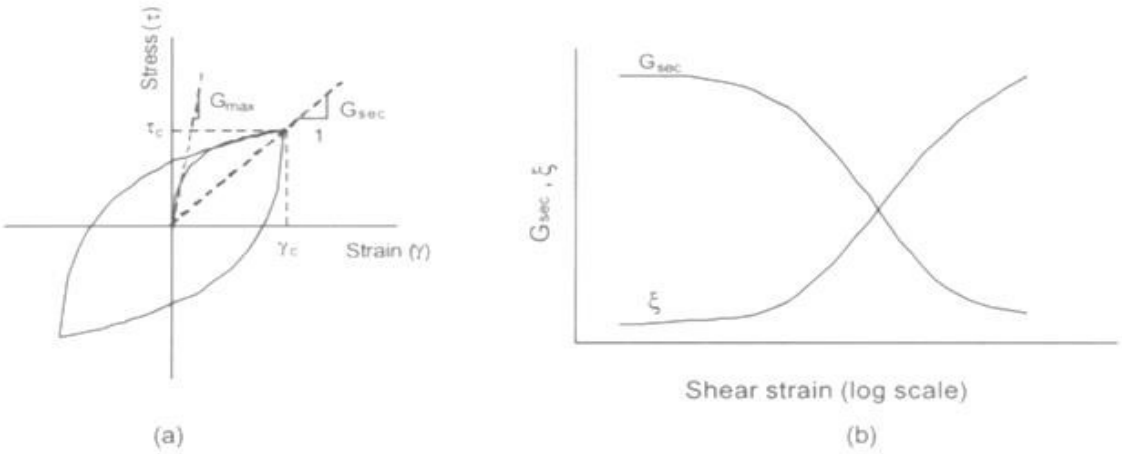

Figura n. 8.7 - Modello lineare equivalente: (a) curve tensioni - deformazioni; (b) variazione del modulo.

Il comportamento non lineare del terreno, durante un ciclo di carico, viene approssimato per come mostrato nella figura n. 8.7. Il modulo di taglio equivalente, G, è preso considerando il modulo di taglio secante Gs.

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

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

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

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

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

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

dove:

- ΔW^{dissp}= quantità di energia dissipata, per unità di volume, dal terreno durante un ciclo di carico armonico;
- W^{max} = massima energia di deformazione, per unità di volume, immagazzinata dal terreno durante lo stesso ciclo di carico armonico;
- In definitiva la risposta non lineare del terreno tramite il modello viscoelastico lineare equivalente viene riassunta mediante delle curve di riduzione del modulo di taglio e di incremento del rapporto di smorzamento.

8.4.2. Soluzione alla singola iterazione mediante FEM

L'approccio utilizzato per la soluzione visco-elastica lineare all'interno dell'i-esimo ciclo iterativo utilizza il metodo degli elementi finiti. In particolare, il deposito di terreno viene discretizzato mediante una "mesh" di elementi finiti piani che possono avere forma quadrangolare o rettangolare a seconda dei casi (figura n. 8.8) e caricato mediante un'accelerazione alla base dello stesso (bedrock), la soluzione dell'equazione del moto viene poi ottenuta nel dominio del tempo utilizzando il metodo di integrazione di Newmark.

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

dove:
M = matrice di massa del sistema;
C = matrice di smorzamento del sistema;
K = matrice di rigidezza del sistema;
$\ddot{u}, \dot{u}, u$ = rispettivamente vettori di accelerazione, velocità e spostamento del sistema;
a_g = vettore di accelerazione alla base.

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

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

dove:
Δt = incremento temporale tra l'istante di tempo tn e $tn-1$;
β = parametro del metodo di integrazione posto pari a 0.25;
γ = parametro del metodo di integrazione posto pari a 0.50.

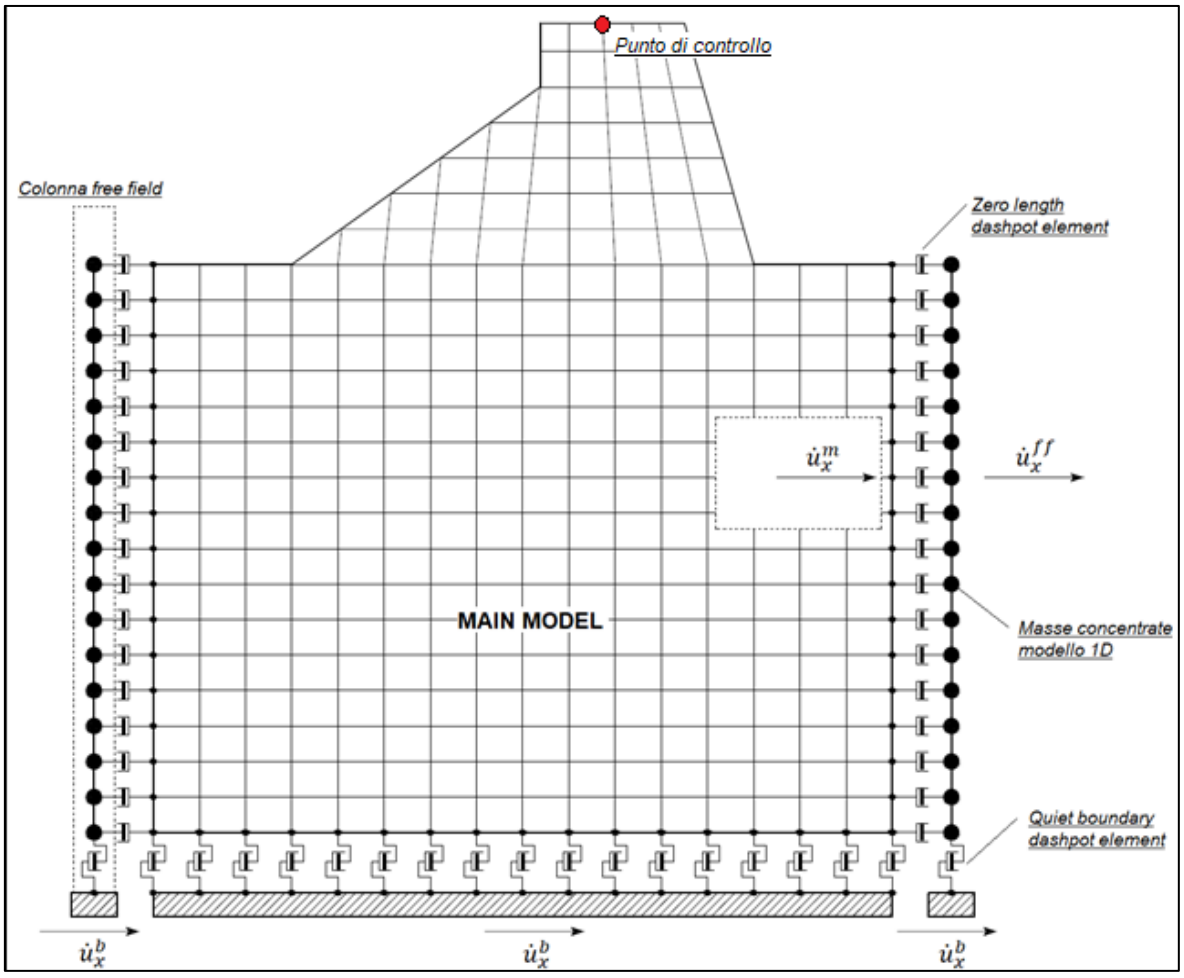

Figura n. 8.8 - Discretizzazione FEM del terreno.

8.4.2.1. Smorzamento

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

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

dove:

α_q e β_q = coefficienti di smorzamento alla Reyleigh

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

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

da cui si ottiene (Hudson, 1994):

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

dove:

$\omega 1$ = frequenza naturale del primo modo del deposito;

$\omega 2$ = $n * \omega 1$ con (approssimato all'intero pari più grande) e ωi frequenza di picco dello spettro ottenuto a partire dall'accelerazione di bedrock.

8.4.3. Procedimento iterativo

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

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

8.4.4. Interpretazione dei risultati

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

Tuttavia, dal punto di vista ingegneristico, è interessante monitorare la risposta in termini di accelerazione in superficie in corrispondenza di uno o più punti di controllo in modo da comprendere quelli che sono gli effetti indotti dal sito sull'amplificazione della sorgente sismica.

8.5. ANALISI DEI RISULTATI

I risultati delle analisi condotte con il codice di calcolo LSR 2D (Local Sismic Response 2D) Ver. 5.1.0 di STACEC, elaborati nel dominio del tempo e delle frequenze, hanno consentito di definire per il sito in esame:

- gli accelerogrammi di output;
- 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.

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 per la stima semplificata dell'amplificazione e le differenze percentuali tra i valori.

Per le zone oggetto di studio l'abaco di riferimento è quello relativo alla tabella PIANURA 3, definita come settore di pianura caratterizzato da elevati spessori di sedimenti prevalentemente fini e poco consolidati, alternanze di limi, argille e sabbie di ambiente alluvionale e transizionale, con substrato rigido a profondità non inferiore a 300 m da p.c.. Il valore di Vs30 da considerare è 200 m/s.

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 di confronto degli spettri medi in accelerazione di input e output;
- Il grafico di output dei fattori di amplificazione in termini di accelerazione e velocità;
- la tabella con i fattori di amplificazione calcolati, confrontati con quelli da normativa.

  Di seguito vengono illustrati i risultati delle analisi di risposta sismica locale effettuate per le microzone instabili.

8.5.1. Microzona 2001

Sulla base delle caratteristiche litostratigrafiche e geofisiche del sottosuolo, è stato costruito il modello riportato in tabella 8.5.

Strato	Descrizione	S [m]	ρ [Kg/m³]	Vs [m/s]	Curva decadimento
strato 1	argilla e limo	7.00	1800.00	153.00	Bassa_romagna_0-20LA
strato 2	argilla e limo	3.00	1850.00	160.00	Bassa_romagna_0-20LA
strato 3	argilla e limo	5.00	1850.00	210.00	Bassa_romagna_0-20LA
strato 4	argilla e limo	4.00	1800.00	223.00	Bassa_romagna_0-20LA
strato 5	argilla e limo	2.00	1850.00	240.00	Bassa_romagna_0-20LA
strato 6	sabbia	1.00	1900.00	253.00	Bassa_romagna_sabbia
strato 7	argilla e limo	8.00	1900.00	250.00	Bassa_romagna_20-30LA
strato 8	argilla e limo	18.00	1900.00	270.00	Bassa_romagna_30-50LA
strato 9	argilla e limo	40.00	1950.00	376.00	Darendelli2001-IP15-16atm
strato 10	argilla e limo	57.00	1950.00	478.00	Darendelli2001-IP15-16atm
strato 11	sabbia	3.00	1950.00	478.00	EPRI (93), 500-1000 ft
strato 12	argilla e limo	42.00	2000.00	515.00	Darendelli2001-IP15-16atm
strato 13	sabbia	4.00	2000.00	515.00	EPRI (93), 500-1000 ft
strato 14	argilla e limo	34.00	2000.00	515.00	Darendelli2001-IP15-16atm
strato 15	sabbia	14.00	2000.00	535.00	EPRI (93), 500-1000 ft
strato 16	argilla e limo	37.00	2000.00	568.00	Darendelli2001-IP15-16atm
strato 17	argilla e limo	10.00	2100.00	601.00	Darendelli2001-IP15-16atm
strato 18	sabbia	12.00	2100.00	601.00	EPRI (93), 500-1000 ft
strato 19	argilla e limo	15.00	2100.00	601.00	Darendelli2001-IP15-16atm
strato 20	argilla e limo	21.00	2100.00	615.00	Darendelli2001-IP15-16atm
strato 21	argilla e limo	23.00	2100.00	630.00	Darendelli2001-IP15-16atm
strato 22	sabbia	25.00	2100.00	645.00	EPRI (93), 500-1000 ft
strato 23	argilla e limo	40.00	2100.00	650.00	Darendelli2001-IP15-16atm
bedrock			2200	800	

Tabella 8.5 - Modello sismostratigrafico e caratteristiche meccaniche degli strati della MOPS 2001

L'attribuzione delle velocità delle onde di taglio (Vs) ai singoli sismostrati è avvenuta basandosi su misure dirette di Vs effettuate attraverso prove penetrometriche con cono sismico, E.S.A.C. e attraverso l'interpretazione di misure HVSR. In Figura n. 8.9 è riportato il modello di profilo di Vs utilizzato per la MOPS 2001.

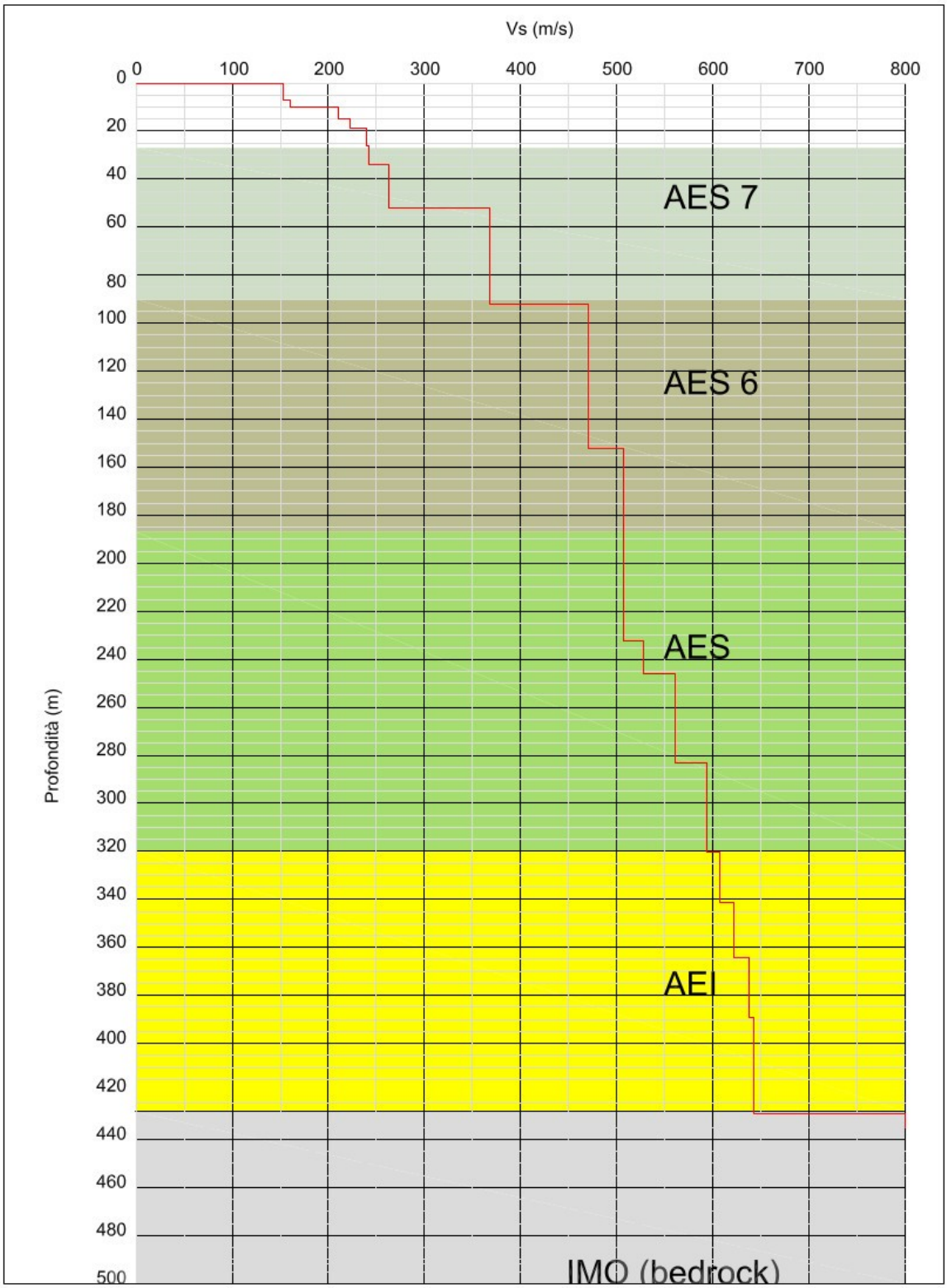

Figura n. 8.9 – Rappresentazione grafica del modello geofisico del sottosuolo della MOPS 2001

La figura n. 8.10 riporta gli accelerogrammi di output della Microzona 2001

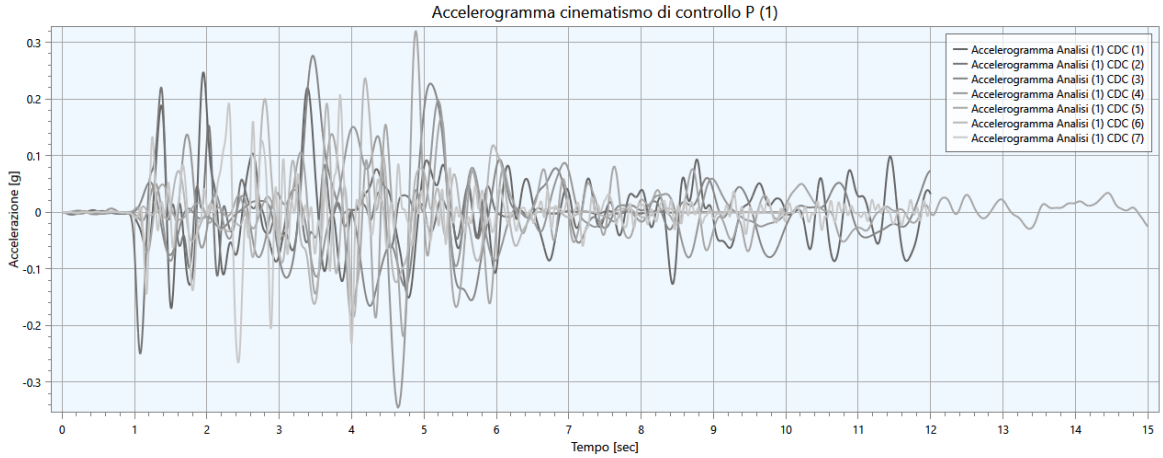

Figura n. 8.10 - Accelerogrammi di output della Microzona 2001.

La figura n. 8.11 contiene il confronto tra lo spettro medio in input (verde) e in output (rosso) in accelerazione per Microzona 2001.

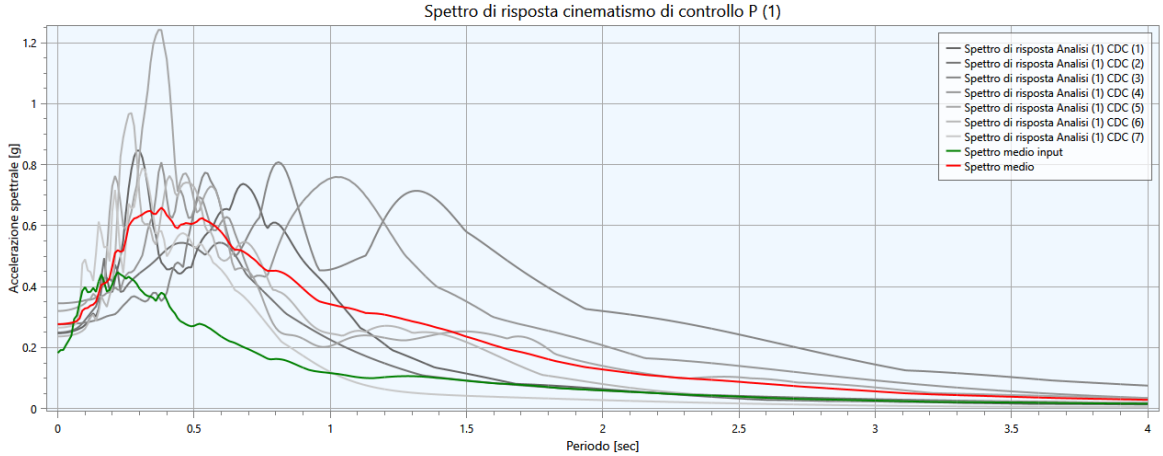

Figura n. 8.11 - Confronto tra gli spettri in accelerazione spettro medio in accelerazione in input (verde) e lo spettro medio in accelerazione in output (rosso) per la microzona 2001.

La tabella n. 8.6 e la figura 8.12 riportano i fattori di amplificazione ottenuti dalla RSL e considerati rappresentativi della Microzona 2001.

Fattore di amplificazione	Valore calcolato da RSL	Valore da abachi RER	Differenza (%)
FPGA	1,47	1,3	11,6
FA 0,1-0,5s	1,49	1,3	12,8
FA 0,4-0,8s	2,42	2,1	13,2
FA 0,7-1,1s	2,86	2,5	12,6
FA 0,5-1,5s	2,71	2,4	11,4
FH 0,1-0,5s	1,39	1,5	-7,9
FH 0,5-1,0s	2,53	2,3	9,1
FH 0,5-1,5s	2,63	2,6	1,1

Tabella 8.6 – Fattori di amplificazione calcolati MOPS 2001

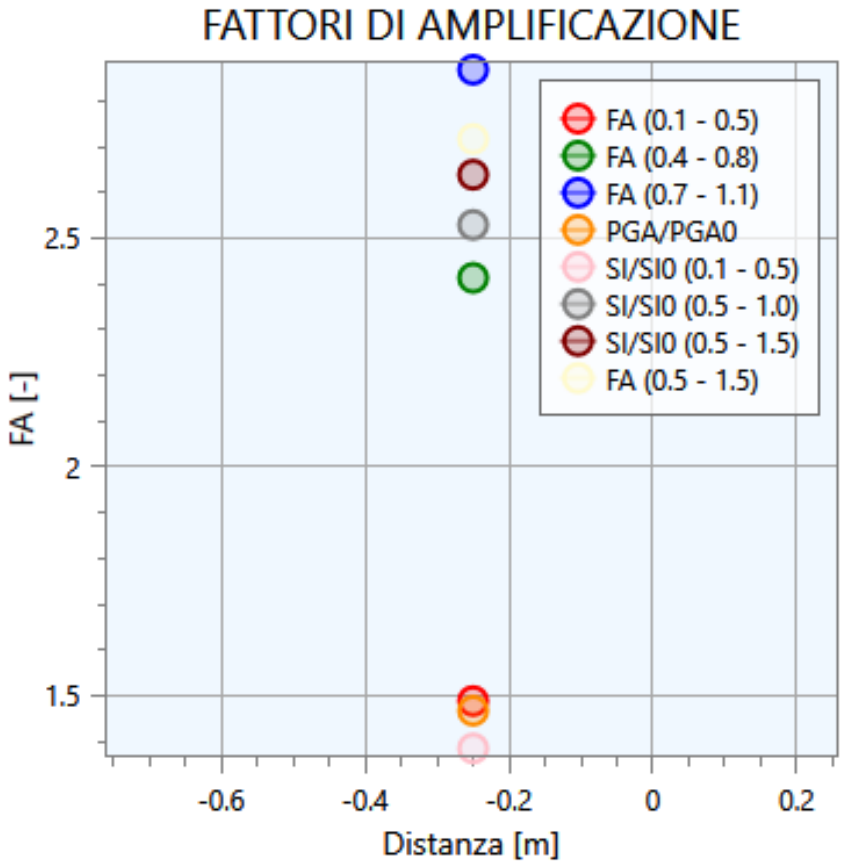

Figura n. 8.12 – Output fattori di amplificazione in termini di accelerazione e velocità per la Microzona 2001

Dal grafico di figura 8.13 è possibile osservare che lo spettro di categoria C delle NTC2018 sottostima quello da RSL tra 0,5 s e 1,7 s.

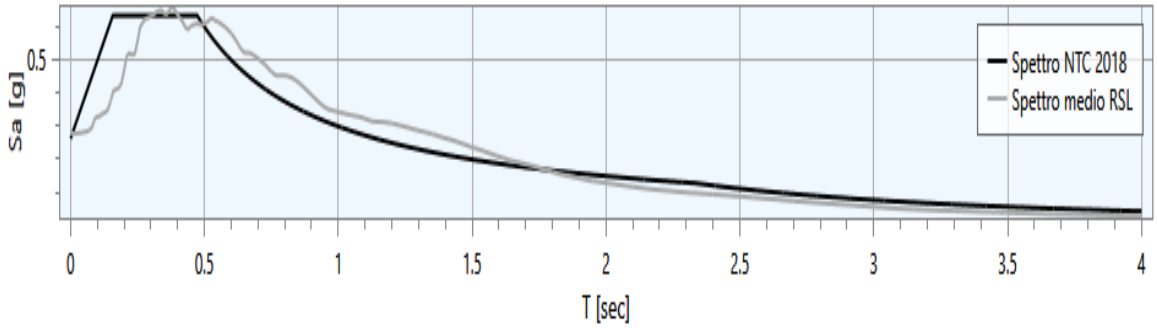

Figura n. 8.13 - Confronto tra lo spettro medio in accelerazione in output della microzona 2001 e lo spettro di normativa NTC2018 per un suolo di categoria C

8.5.2. Microzona 2002

Sulla base delle caratteristiche litostratigrafiche e geofisiche del sottosuolo, è stato costruito il modello riportato in Tab. 8.7.

Strato	Descrizione	S [m]	ρ [Kg/m³]	Vs [m/s]	Curva decadimento
strato 1	sabbia	3.00	1800.00	154.00	Bassa_romagna_0-20LA
strato 2	sabbia	2.00	1850.00	169.00	Bassa_romagna_sabbia
strato 3	sabbia	3.00	1850.00	185.00	Bassa_romagna_0-20LA
strato 4	argilla e limo	2.00	1850.00	199.00	Bassa_romagna_0-20LA
strato 5	argilla e limo	6.00	1900.00	222.00	Bassa_romagna_0-20LA
strato 6	argilla e limo	6.00	1900.00	239.00	Bassa_romagna_20-30LA
strato 7	sabbia	25.00	1900.00	245.00	Bassa_romagna_30-50LA
strato 8	argilla e limo	40.00	1950.00	376.00	Darendelli2001-IP15-16atm
strato 9	argilla e limo	57.00	1950.00	478.00	Darendelli2001-IP15-16atm
strato 10	argilla e limo	3.00	1950.00	478.00	EPRI (93), 500-1000 ft
strato 11	sabbia	42.00	2000.00	515.00	Darendelli2001-IP15-16atm
strato 12	argilla e limo	4.00	2000.00	515.00	EPRI (93), 500-1000 ft
strato 13	sabbia	34.00	2000.00	515.00	Darendelli2001-IP15-16atm
strato 14	argilla e limo	14.00	2000.00	535.00	EPRI (93), 500-1000 ft
strato 15	sabbia	37.00	2000.00	568.00	Darendelli2001-IP15-16atm
strato 16	argilla e limo	10.00	2100.00	601.00	Darendelli2001-IP15-16atm
strato 17	argilla e limo	12.00	2100.00	601.00	EPRI (93), 500-1000 ft
strato 18	sabbia	15.00	2100.00	601.00	Darendelli2001-IP15-16atm
strato 19	argilla e limo	21.00	2100.00	615.00	Darendelli2001-IP15-16atm
strato 20	argilla e limo	23.00	2100.00	630.00	Darendelli2001-IP15-16atm
strato 21	argilla e limo	25.00	2100.00	645.00	EPRI (93), 500-1000 ft
strato 22	sabbia	40.00	2100.00	650.00	Darendelli2001-IP15-16atm
bedrock			2200	800	

Tabella 8.7 - Modello sismostratigrafico e caratteristiche meccaniche degli strati della MOPS 2002

L'attribuzione delle velocità delle onde di taglio (Vs) ai singoli sismostrati è avvenuta basandosi su misure dirette di Vs effettuate attraverso prove penetrometriche con cono sismico e attraverso l'interpretazione di misure HVSR. In Figura n. 8.14 è riportato il modello di profilo di Vs utilizzato per la MOPS 2002

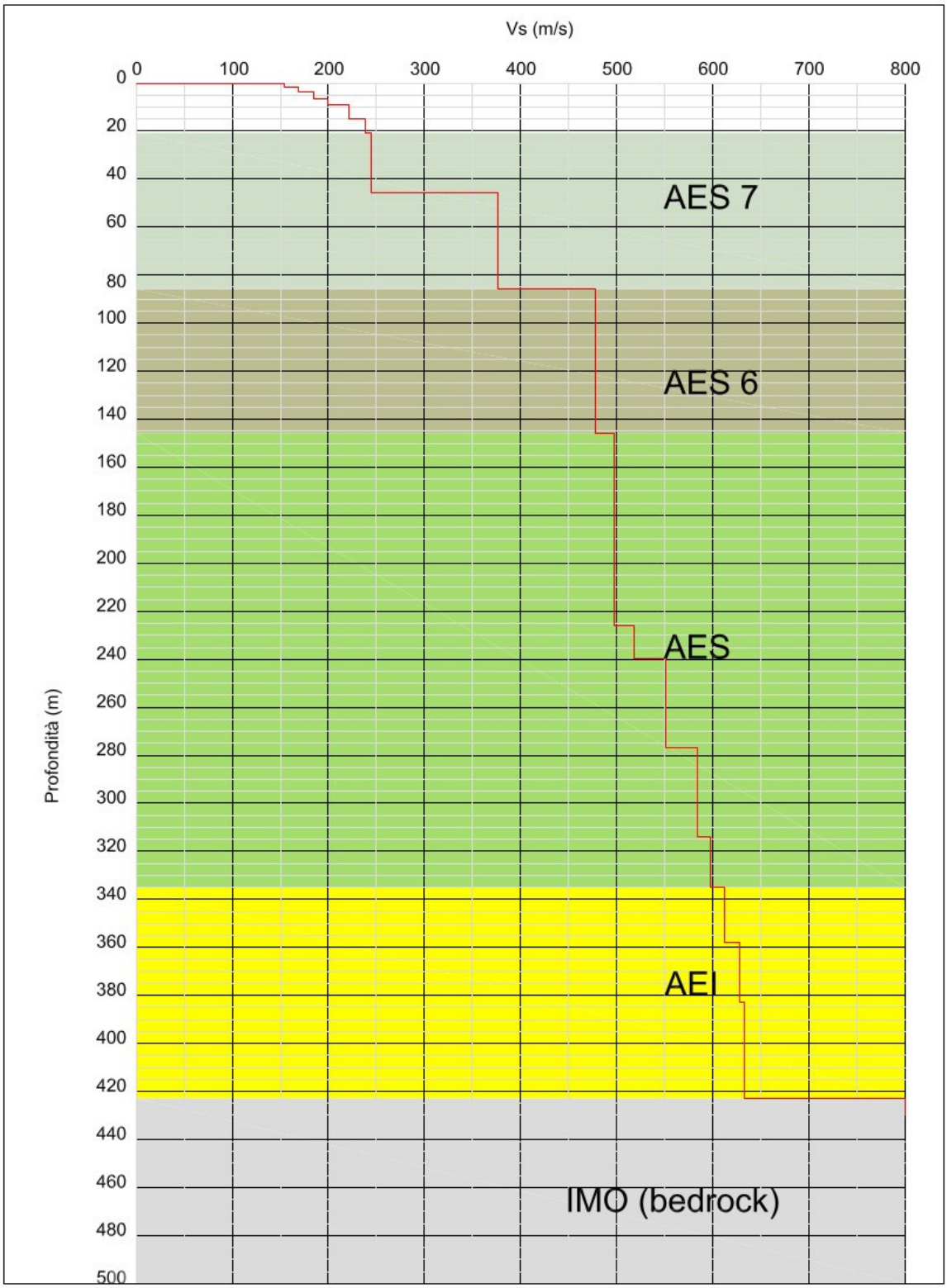

Figura n. 8.14 – Rappresentazione grafica del modello geofisico del sottosuolo della MOPS 2002

La figura n. 8.15 riporta gli accelerogrammi di output della Microzona 2002

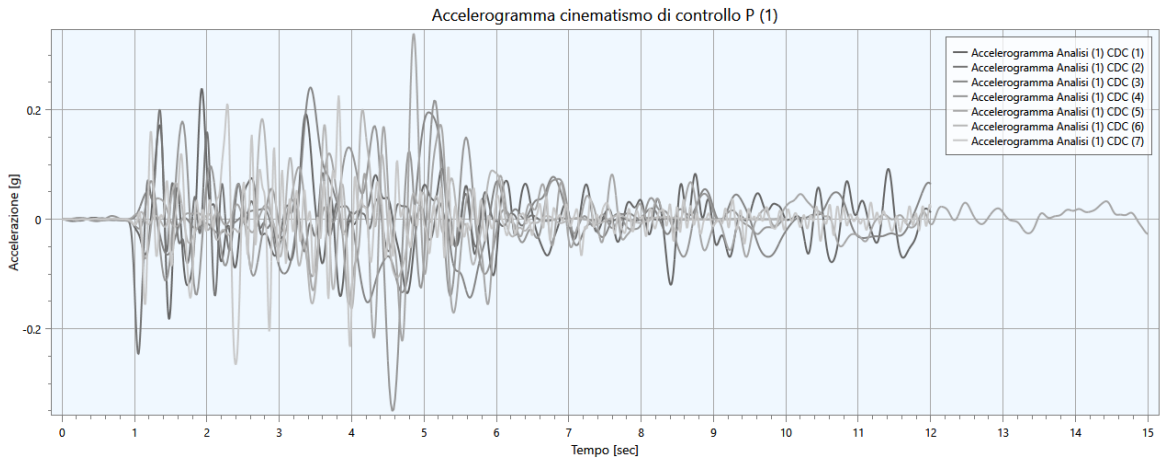

Figura n. 8.15 - Accelerogrammi di output della Microzona 2002

La figura n. 8.16 contiene il confronto tra lo spettro medio in input (verde) e in output (rosso) in accelerazione per Microzona 2002.

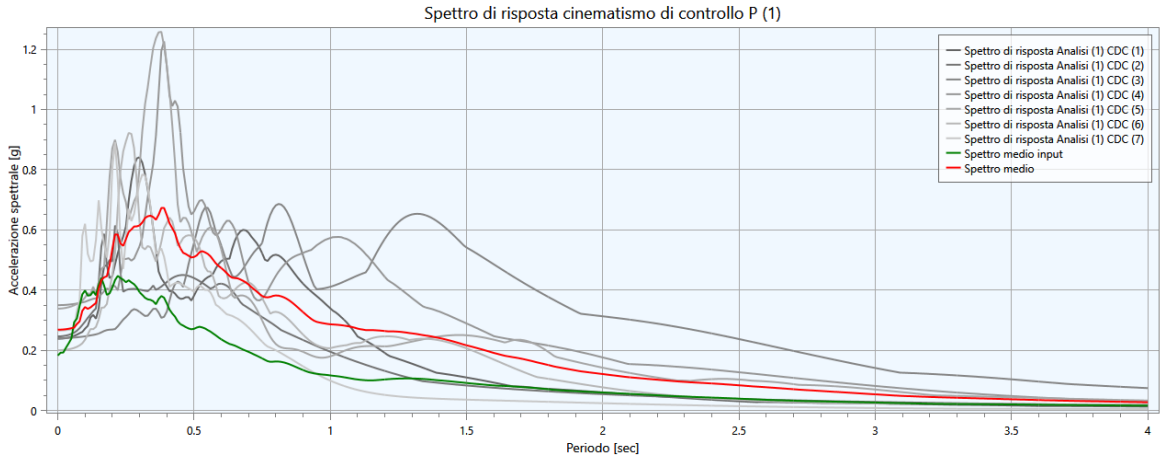

Figura n. 8.16 - Confronto tra gli spettri in accelerazione spettro medio in accelerazione in input (verde) e lo spettro medio in accelerazione in output (rosso) per la microzona 2002

La tabella n. 8.8 e la figura 8.17 riportano i fattori di amplificazione ottenuti dalla RSL e considerati rappresentativi della Microzona 2002

Fattore di amplificazione	Valore calcolato da RSL	Valore da abachi RER	Differenza (%)
FPGA	1,41	1,3	7,8
FA 0,1-0,5s	1,47	1,3	11,5
FA 0,4-0,8s	2,04	2,1	-2,9
FA 0,7-1,1s	2,39	2,5	-4,6
FA 0,5-1,5s	2,29	2,4	-4,8
FH 0,1-0,5s	1,41	1,5	-6,4
FH 0,5-1,0s	2,12	2,3	-8,5
FH 0,5-1,5s	2,26	2,6	-15,0

Tabella 8.8 – Fattori di amplificazione calcolati MOPS 2002

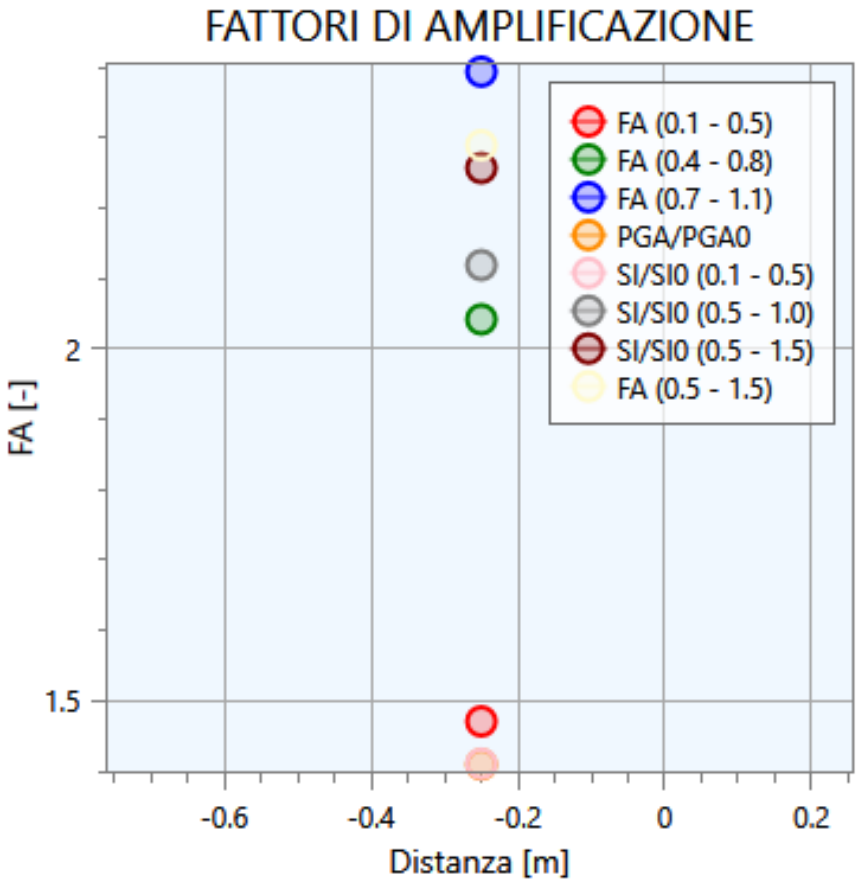

Figura n. 8.17 – Output fattori di amplificazione in termini di accelerazione e velocità per la Microzona 2002

Dal grafico di figura 8.18 è possibile osservare che lo spettro di categoria C delle NTC2018 approssima coerentemente la RSL..

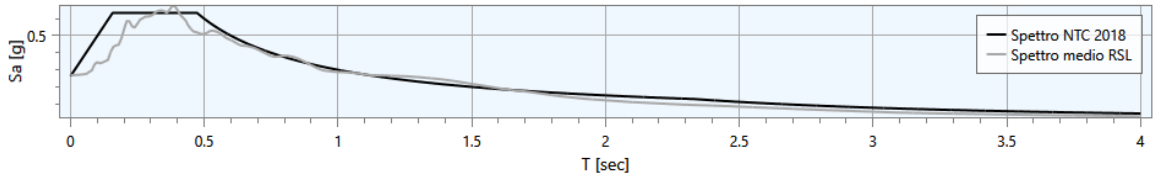

Figura n. 8.18 - Confronto tra lo spettro medio in accelerazione in output della microzona 2002 e lo spettro di normativa NTC2018 per un suolo di categoria C

8.5.3. Microzona 2003

Sulla base delle caratteristiche litostratigrafiche e geofisiche del sottosuolo, è stato costruito il modello riportato in Tab. 8.9.

Strato	Descrizione	S [m]	ρ [Kg/m³]	Vs [m/s]	Curva decadimento
strato 1	sabbia	1.00	1800.00	145.00	Bassa_romagna_sabbia
strato 2	argilla e limo	6.00	1850.00	178.00	Bassa_romagna_0-20LA
strato 3	sabbia	1.00	1850.00	210.00	Bassa_romagna_sabbia
strato 4	argilla e limo	6.00	1850.00	210.00	Bassa_romagna_0-20LA
strato 5	sabbia	8.00	1900.00	246.00	Bassa_romagna_sabbia
strato 6	argilla e limo	2.50	1900.00	246.00	Bassa_romagna_20-30LA
strato 7	sabbia	1.50	1900.00	246.00	Bassa_romagna_sabbia
strato 8	argilla e limo	24.00	1950.00	262.00	Bassa_romagna_30-50LA
strato 9	argilla e limo	45.00	1950.00	376.00	Darendelli2001-IP15-16atm
strato 10	argilla e limo	57.00	1950.00	478.00	Darendelli2001-IP15-16atm
strato 11	sabbia	3.00	2000.00	478.00	EPRI (93), 500-1000 ft
strato 12	argilla e limo	42.00	2000.00	515.00	Darendelli2001-IP15-16atm
strato 13	sabbia	4.00	2000.00	515.00	EPRI (93), 500-1000 ft
strato 14	argilla e limo	34.00	2000.00	515.00	Darendelli2001-IP15-16atm
strato 15	sabbia	14.00	2000.00	535.00	EPRI (93), 500-1000 ft
strato 16	argilla e limo	37.00	2000.00	568.00	Darendelli2001-IP15-16atm
strato 17	argilla e limo	10.00	2100.00	601.00	Darendelli2001-IP15-16atm
strato 18	sabbia	12.00	2100.00	601.00	EPRI (93), 500-1000 ft
strato 19	argilla e limo	15.00	2100.00	601.00	Darendelli2001-IP15-16atm
strato 20	argilla e limo	21.00	2100.00	615.00	Darendelli2001-IP15-16atm
strato 21	argilla e limo	23.00	2100.00	630.00	Darendelli2001-IP15-16atm
strato 22	sabbia	25.00	2100.00	645.00	EPRI (93), 500-1000 ft
strato 23	argilla e limo	35.00	2100.00	650.00	Darendelli2001-IP15-16atm
bedrock			2200	800	

Tabella 8.9 - Modello sismostratigrafico e caratteristiche meccaniche degli strati della MOPS 2003

L'attribuzione delle velocità delle onde di taglio (Vs) ai singoli sismostrati è avvenuta basandosi su misure dirette di Vs effettuate attraverso prove penetrometriche con cono sismico) e attraverso l'interpretazione di misure HVSR. In Figura n. 8.19 è riportato il modello di profilo di Vs utilizzato per la MOPS 2003

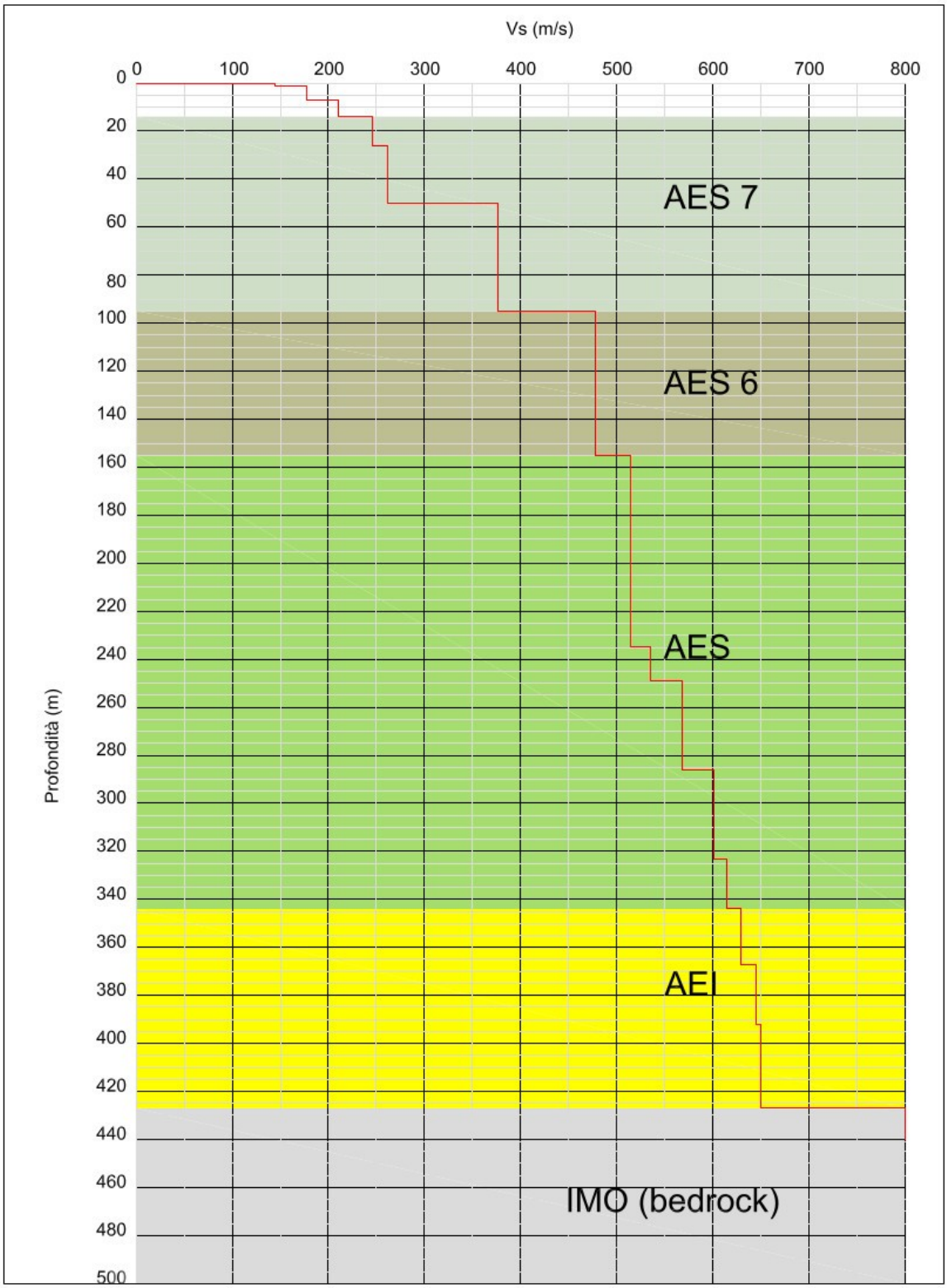

Figura n. 8.19 – Rappresentazione grafica del modello geofisico del sottosuolo della MOPS 2003

La figura n. 8.20 riporta gli accelerogrammi di output della Microzona 2003

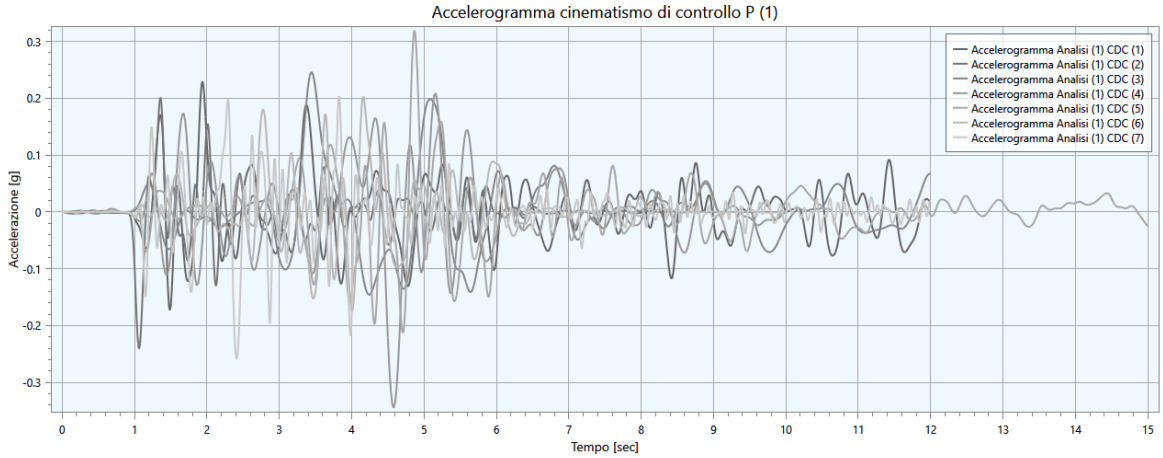

Figura n. 8.20 - Accelerogrammi di output della Microzona 2003.

La figura n. 8.21 contiene il confronto tra lo spettro medio in input (verde) e in output (rosso) in accelerazione per Microzona 2003.

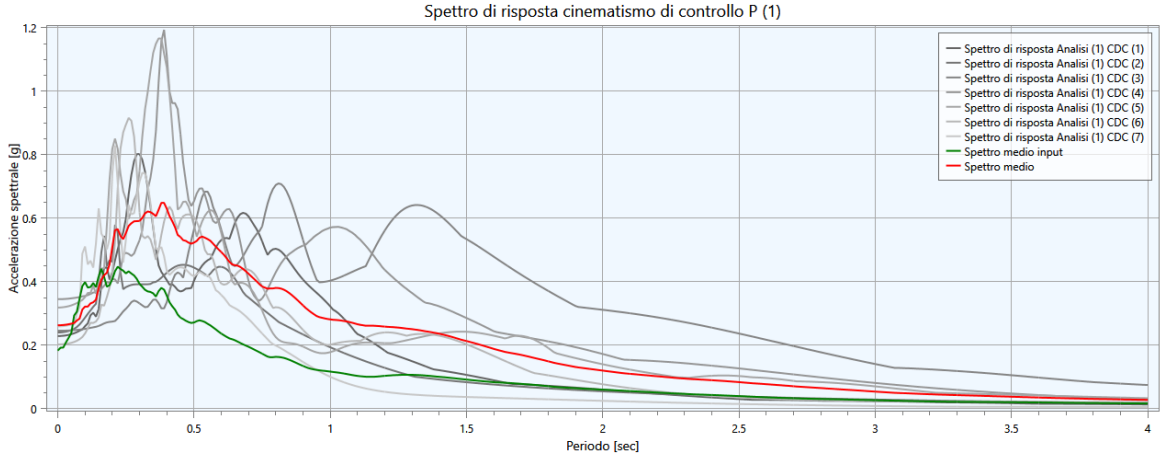

Figura n. 8.21 - Confronto tra gli spettri in accelerazione spettro medio in accelerazione in input (verde) e lo spettro medio in accelerazione in output (rosso) per la microzona 2003

La tabella n. 8.10 e la figura 8.22 riportano i fattori di amplificazione ottenuti dalla RSL e considerati rappresentativi della Microzona 2003.

Fattore di amplificazione	Valore calcolato da RSL	Valore da abachi RER	Differenza (%)
FPGA	1,38	1,3	5,8
FA 0,1-0,5s	1,43	1,3	9,1
FA 0,4-0,8s	2,08	2,1	-1,0
FA 0,7-1,1s	2,39	2,5	-4,6
FA 0,5-1,5s	2,30	2,4	-4,3
FH 0,1-0,5s	1,37	1,5	-9,5
FH 0,5-1,0s	2,15	2,3	-7,0
FH 0,5-1,5s	2,26	2,6	-15,0

Tabella 8.10 – Fattori di amplificazione calcolati MOPS 2003

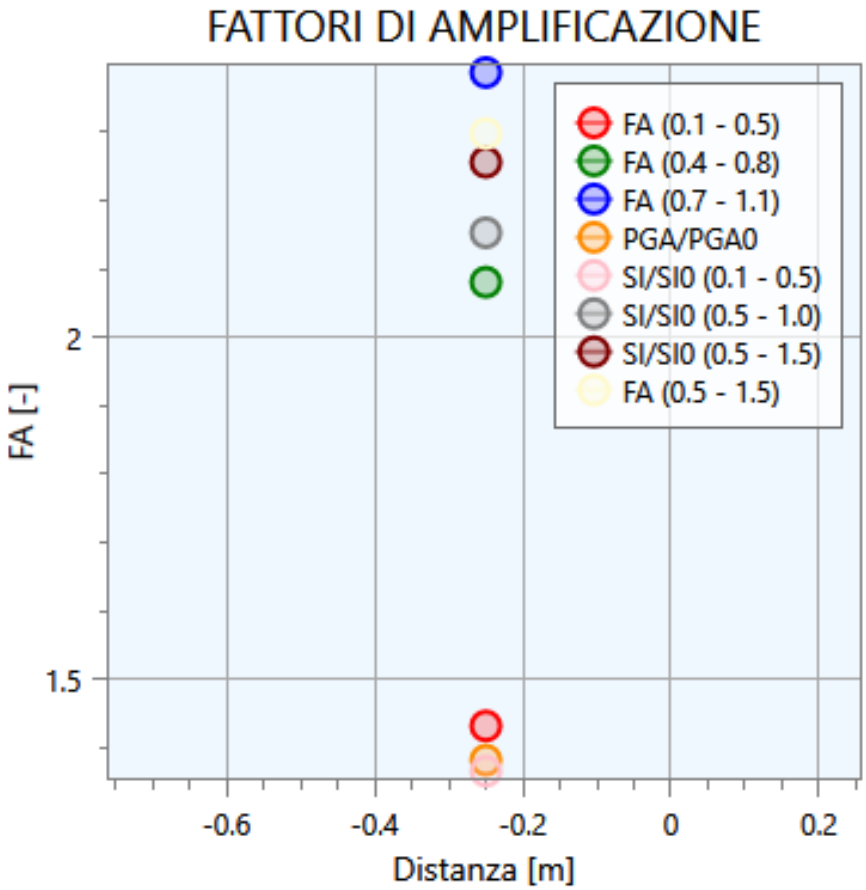

Figura n. 8.22 – Output fattori di amplificazione in termini di accelerazione e velocità per la Microzona 2003

Dal grafico di figura 8.23 è possibile osservare che lo spettro di categoria C delle NTC2018 approssima in maniera coerente quello da risposta sismica locale.

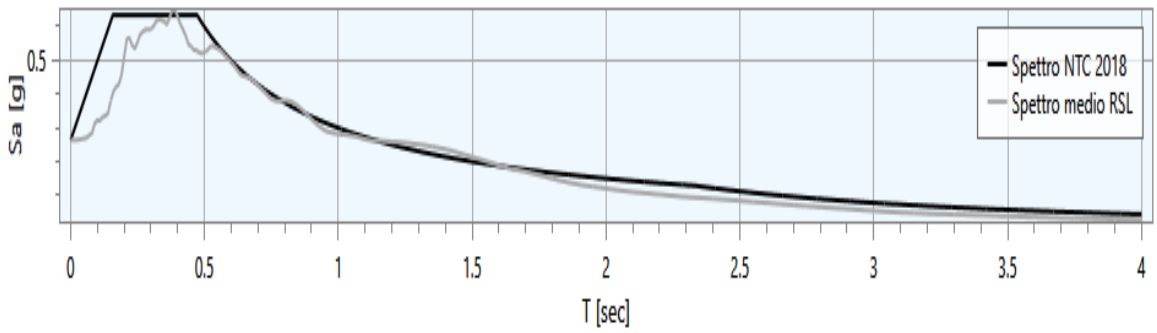

Figura n. 8.23 - Confronto tra lo spettro medio in accelerazione in output della microzona 2003 e lo spettro di normativa NTC2018 per un suolo di categoria C

8.5.4. Microzona 2004

Sulla base delle caratteristiche litostratigrafiche e geofisiche del sottosuolo, è stato costruito il modello riportato in Tab. 8.11.

Strato	Descrizione	S [m]	ρ [Kg/m³]	Vs [m/s]	Curva decadimento
strato 1	sabbia	1.00	1800.00	139.00	Bassa_romagna_sabbia
strato 2	argilla e limo	7.00	1850.00	169.00	Bassa_romagna_0-20LA
strato 3	argilla e limo	0.50	1850.00	190.00	Bassa_romagna_sabbia
strato 4	argilla e limo	4.50	1850.00	215.00	Bassa_romagna_0-20LA
strato 5	sabbia	1.50	1850.00	215.00	Bassa_romagna_sabbia
strato 6	argilla e limo	3.50	1900.00	235.00	Bassa_romagna_0-20LA
strato 7	argilla e limo	0.50	1900.00	235.00	Bassa_romagna_sabbia
strato 8	sabbia	31.50	1950.00	259.00	Bassa_romagna_30-50LA
strato 9	argilla e limo	45.00	1950.00	376.00	Darendelli2001-IP15-16atm
strato 10	sabbia	57.00	1950.00	478.00	Darendelli2001-IP15-16atm
strato 11	argilla e limo	3.00	2000.00	478.00	EPRI (93), 500-1000 ft
strato 12	argilla e limo	42.00	2000.00	515.00	Darendelli2001-IP15-16atm
strato 13	argilla e limo	4.00	2000.00	515.00	EPRI (93), 500-1000 ft
strato 14	sabbia	34.00	2000.00	515.00	Darendelli2001-IP15-16atm
strato 15	argilla e limo	14.00	2000.00	535.00	EPRI (93), 500-1000 ft
strato 16	sabbia	37.00	2000.00	568.00	Darendelli2001-IP15-16atm
strato 17	argilla e limo	10.00	2100.00	601.00	Darendelli2001-IP15-16atm
strato 18	sabbia	12.00	2100.00	601.00	EPRI (93), 500-1000 ft
strato 19	argilla e limo	15.00	2100.00	601.00	Darendelli2001-IP15-16atm
strato 20	argilla e limo	21.00	2100.00	615.00	Darendelli2001-IP15-16atm
strato 21	sabbia	23.00	2100.00	630.00	Darendelli2001-IP15-16atm
strato 22	argilla e limo	25.00	2100.00	645.00	EPRI (93), 500-1000 ft
strato 23	argilla e limo	35.00	2100.00	650.00	Darendelli2001-IP15-16atm
bedrock			2200	800	

Tabella 8.11 - Modello sismostratigrafico e caratteristiche meccaniche degli strati della MOPS 2004

L'attribuzione delle velocità delle onde di taglio (Vs) ai singoli sismostrati è avvenuta basandosi su misure dirette di Vs effettuate attraverso prove penetrometriche con cono sismico e attraverso l'interpretazione di misure HVSR. In Figura n. 8.24 è riportato il modello di profilo di Vs utilizzato per la MOPS 2004

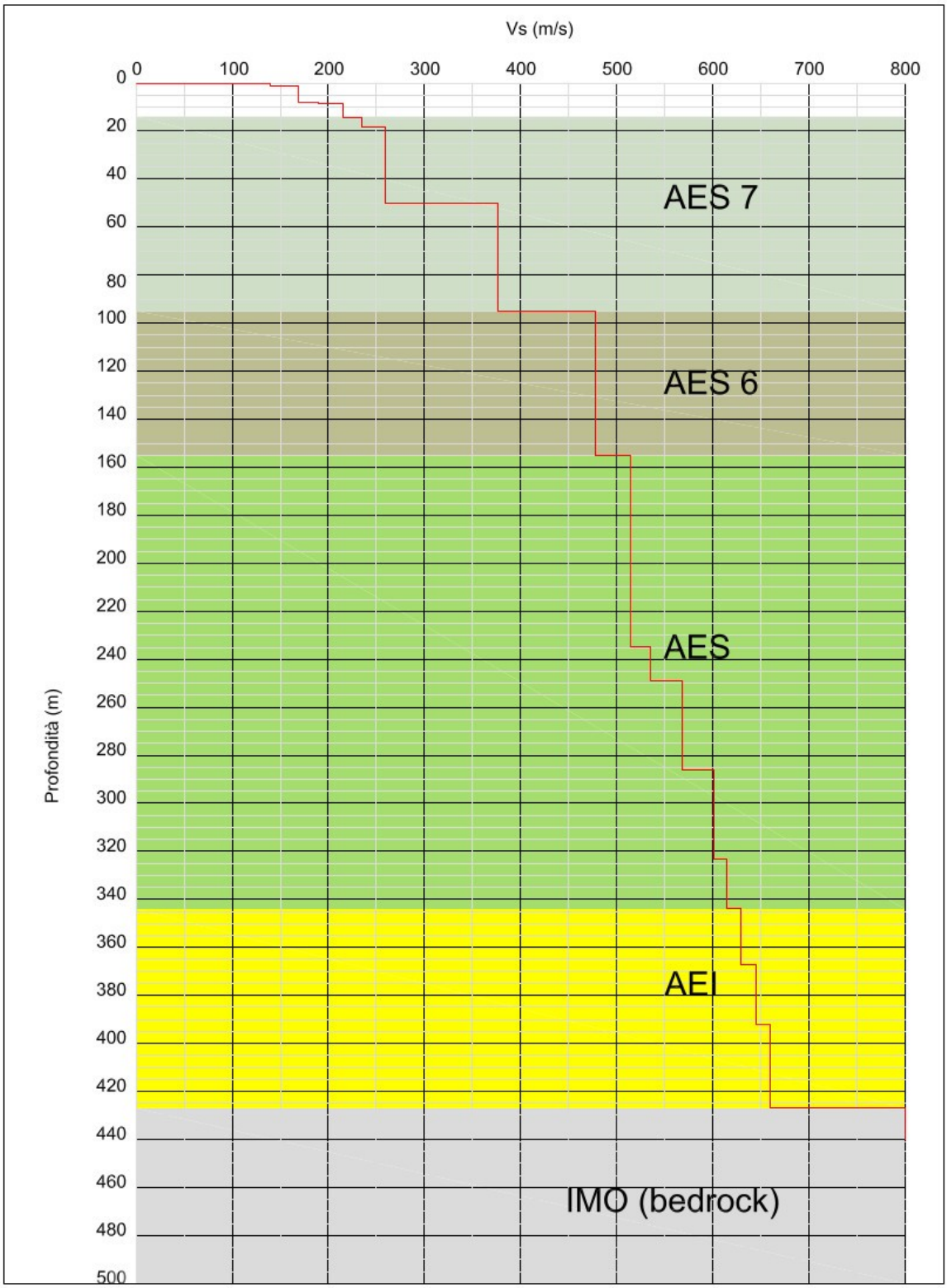

Figura n. 8.24 – Rappresentazione grafica del modello geofisico del sottosuolo della MOPS 2004

La figura n. 8.25 riporta gli accelerogrammi di output della Microzona 2004

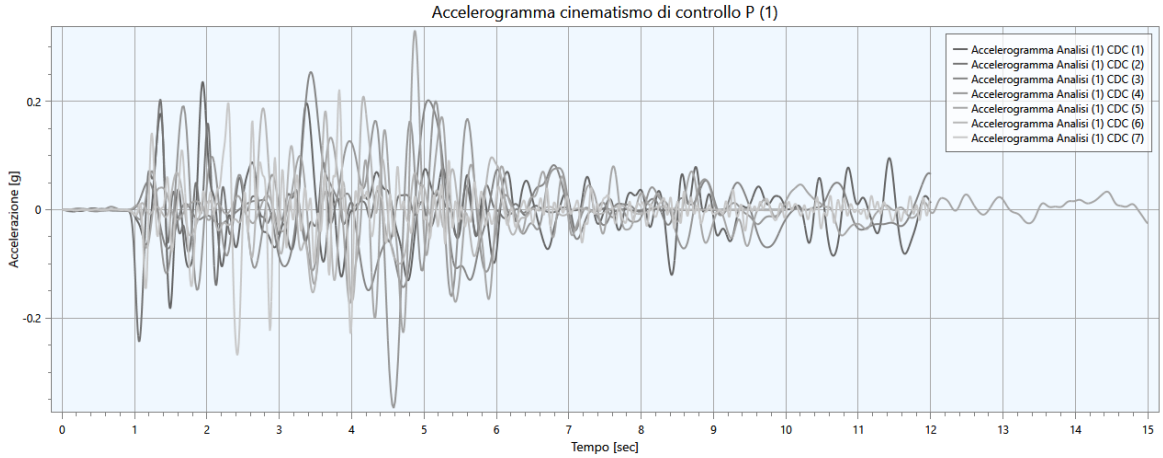

Figura n. 8.25 - Accelerogrammi di output della Microzona 2004

La figura n. 8.26 contiene il confronto tra lo spettro medio in input (verde) e in output (rosso) in accelerazione per Microzona 2004

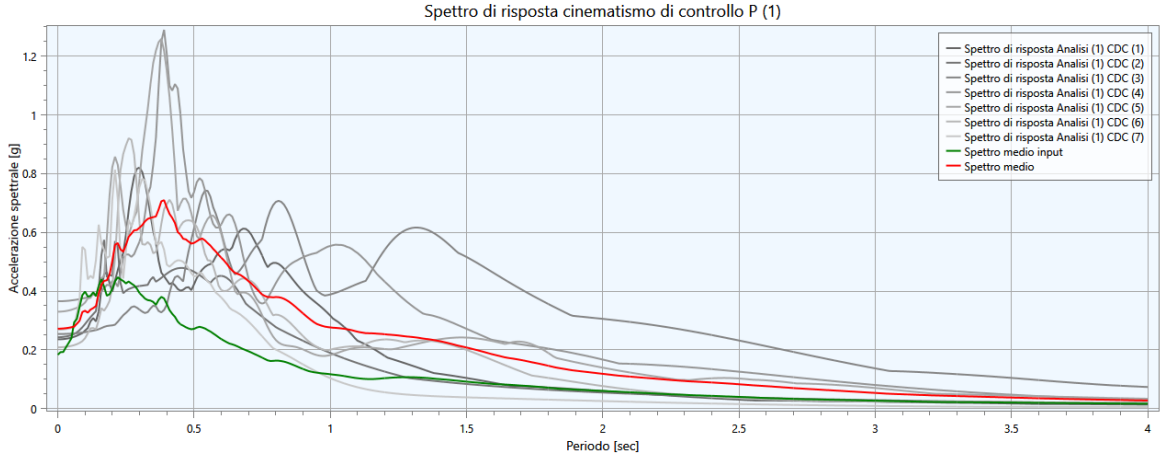

Figura n. 8.26 - Confronto tra gli spettri in accelerazione spettro medio in accelerazione in input (verde) e lo spettro medio in accelerazione in output (rosso) per la microzona 2004

La tabella n. 8.12 e la figura 8.27 riportano i fattori di amplificazione ottenuti dalla RSL e considerati rappresentativi della Microzona 2004.

Fattore di amplificazione	Valore calcolato da RSL	Valore da abachi RER	Differenza (%)
FPGA	1,43	1,3	9,1
FA 0,1-0,5s	1,50	1,3	13,3
FA 0,4-0,8s	2,19	2,1	4,1
FA 0,7-1,1s	2,39	2,5	-4,6
FA 0,5-1,5s	2,32	2,4	-3,4
FH 0,1-0,5s	1,45	1,5	-3,4
FH 0,5-1,0s	2,21	2,3	-4,1
FH 0,5-1,5s	2,28	2,6	-14,0

Tabella 8.12 – Fattori di amplificazione calcolati Microzona 2004

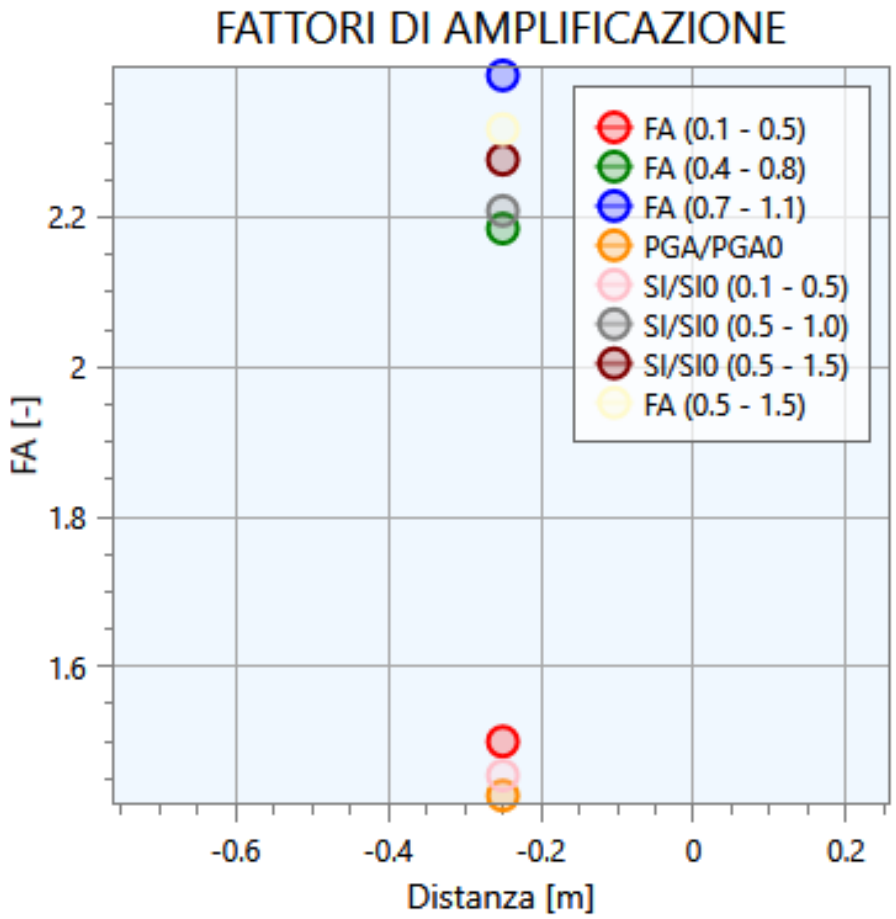

Figura n. 8.27 – Output fattori di amplificazione in termini di accelerazione e velocità per la Microzona 2004

Dal grafico di figura 8.28 è possibile osservare che lo spettro di categoria C delle NTC2018 approssima coerentemente la RSL.

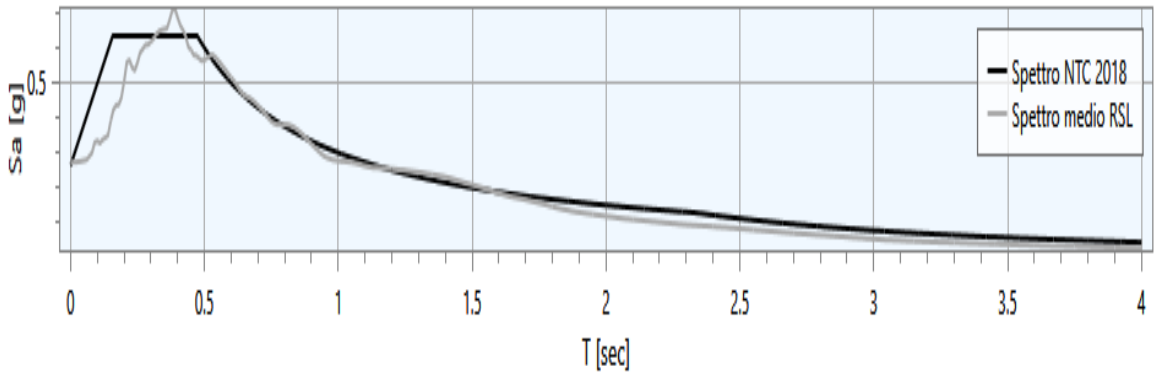

Figura n. 8.28 - Confronto tra lo spettro medio in accelerazione in output della microzona 2004 m e lo spettro di normativa NTC2018 per un suolo di categoria C

8.6. PERICOLOSITÀ SISMICA

L'introduzione di un nuovo parametro denominato H (Hazard), previsto dalle "*Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da amplificazioni*" (Commissione Tecnica per la Microzonazione, 2022), si è reso necessario in quanto i fattori di amplificazione non rappresentano in maniera "completa" la pericolosità sismica reale di un'area e non permettono eventuali confronti tra aree diverse anche nell'ambito di uno stesso Comune, se molto esteso.

Il valore del parametro di pericolosità H, nel presente studio di Livello 3, è stato ricavato direttamente dagli spettri in accelerazione risultanti dalle RSL svolte. Tale parametro, riferito agli intervalli 0.1-0.5 s, 0.4-0.8 s, 0.5-1.5 e 0.7-1.1 s, è stato ottenuto dal rapporto tra l'integrale dello spettro medio di output in accelerazione nell'intervallo di periodo considerato e l'ampiezza dell'intervallo di integrazione. Esso rappresenta, pertanto, l'accelerazione spettrale media in superficie nell'intervallo di periodo considerato (Figura n. 8.29).

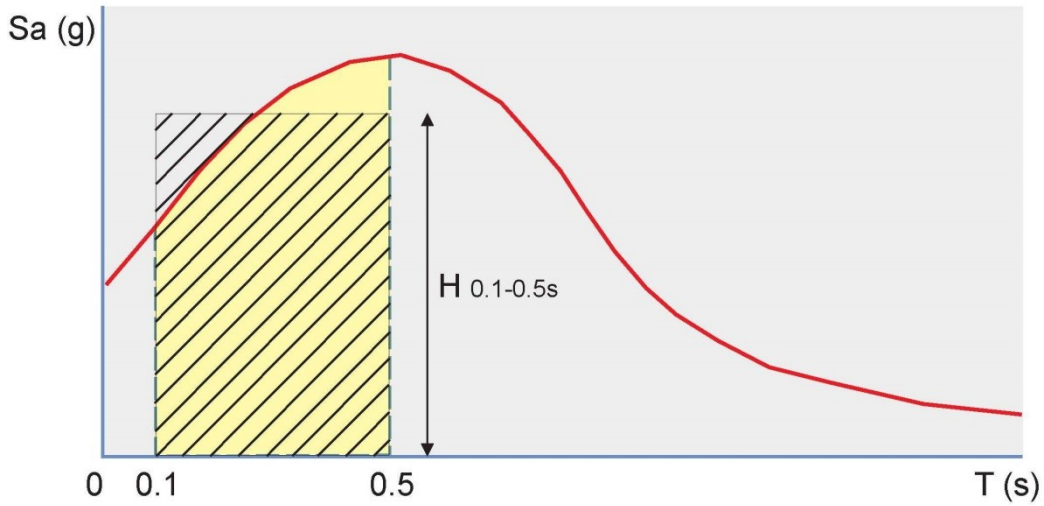

Figura n. 8.29 – Esempio di calcolo di H per un intervallo di periodo compreso tra 0,1 e 0,5 s.

La classificazione dei parametri H è stata proposta dal DPC a scala nazionale ed è rappresentata nella seguente tabella

Intervalli di periodo	Classificazione H_{SM}[g]			
	Basso ($ZS4_{SM}$)	Medio ($ZS3_{SM}$)	Alto ($ZS2_{SM}$)	Molto alto ($ZS1_{SM}$)
$T1_{(0.1-0.5)}$	≤ 0.21	0.22-0.54	0.55-0.85	≥ 0.86
$T2_{(0.4-0.8)}$	≤ 0.14	0.15-0.34	0.35-0.55	≥ 0.56
$T3_{(0.7-1.1)}$	≤ 0.09	0.10-0.22	0.23-0.35	≥ 0.36

Tabella 8.13– Classificazione di H per diversi intervalli di periodo (fonte: Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da amplificazioni)

La Regione Emilia-Romagna ha ulteriormente dettagliato la classificazione della pericolosità, rispettando i limiti DPC proposti, come evidenziato nella seguente tabella:

H_{SM}	≤0,21g	0,22g-0,38g	0,39g-0,54g	0,55g-0,70g	0,71g-0,85g	0,86g-0,99g	≥1g
H_{0408}	≤0,14g	0,15g-0,25g	0,26g-0,34g	0,35g-0,45g	0,46g-0,55g	0,56g-0,65g	≥0,66g
H_{0711} e H_{0515}	≤0,09g	0,10g-0,16g	0,17g-0,22g	0,23g-0,29g	0,30g-0,35g	0,36g-0,45g	≥0,46g

Tabella 8.14 – Classificazione di H per diversi intervalli di periodo ulteriormente dettagliata dalla Regione Emilia-Romagna

Il parametro di pericolosità ottenuto per le diverse microzone analizzate e riferito a differenti intervalli di periodo è riportato nella seguente tabella:

Parametro H	***Valore calcolato da RSL (g)***			
	2001	2002	2003	2004
Hsm	0,56	0,55	0,53	0,56
H 0,4-0,8s	0,55	0,47	0,48	0,51
H 0,7-1,1s	0,38	0,33	0,33	0,33
H 0,5-1,5s	0,37	0,33	0,33	0,33

Tabella 8.15 – Valori del parametro di pericolosità H

Il parametro di pericolosità ”H” ottenuto per le diverse microzone analizzate e riferito a differenti intervalli di periodo, è rappresentato nelle tavole denominate HSM, $H_{0,4-0,8s}$, $H_{0,7-1,1s}$ e $H_{0,5-1,5s}$.

Con riferimento alla classificazione proposta a livello nazionale dal DPC, le microzone presentano una pericolosità sismica generalmente alta per l’intervallo

0,1s<T<0,5s, ad eccezione della microzona 2003 che ricade nella classe media. Per l'intervallo 0,4s<T<0,8s la pericolosità è alta per tutte le microzone, come anche per l'intervallo 0,7s<T<1,1s ad eccezione della microzona 2001 che ricade nella classe a pericolosità molto alta.

9. VERIFICA DELLA PERICOLOSITÀ SISMICA DI LIQUEFAZIONE

9.1. PREMESSA

Le norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche stabiliscono che se nel sottosuolo delle opere in progetto e nelle loro adiacenze, entro una profondità massima di 15/20 metri circa dal piano di campagna, sono presenti strati importanti di sabbie o sabbie limose sottofalda, dovranno essere eseguite indagini specifiche, con relative verifiche, per valutare il pericolo di liquefazione. Questo fenomeno si verifica nei sedimenti sabbiosi saturi, che, durante o dopo una sollecitazione di tipo ciclico, subiscono una drastica riduzione della resistenza al taglio.

Poiché nella successione stratigrafica dell'area, oggetto degli approfondimenti di terzo livello, sono presenti livelli sabbiosi sottofalda, è stata eseguita, come sarà esposto in seguito, una specifica analisi di dettaglio della suscettività alla liquefazione. Il relativo calcolo è stato effettuato per ciascuna delle verticali di indagine disponibili. In totale sono state verificate 21 prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono (CPTU).

9.2. CALCOLO DELL'INDICE DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE (LPI)

La valutazione della pericolosità sismica di liquefazione della zona in esame è stata effettuata considerando una magnitudo del sisma pari a 6,14 (Zonazione sismogenetica ZS9). I calcoli effettuati, esposti dettagliatamente nello specifico rapporto allegato, sono stati eseguiti, per ciascuna penetrometria considerata col metodo di **Boulanger & Idriss** (**2014**), utilizzando il programma **CLiq v.3.5.2.8.** - CPT Liquefaction Assessment Software della GeoLogismiki, Geotechnical Engineering Software.

Secondo le normative europea e italiana è suscettibile di liquefazione un terreno in cui lo sforzo di taglio generato dal terremoto supera l'80% dello sforzo critico che ha provocato liquefazione durante terremoti passati e quindi deve essere FS $\leq$ **1,25**.

Le analisi sono state eseguite considerando: i dati sul sottosuolo forniti dalle penetrometrie, spinte fino a 15/20 metri di profondità, il livello della falda prudenzialmente considerato durante la simulazione del terremoto a **1,00** metri sotto il piano di campagna, un'accelerazione di progetto [prodotto dell'accelerazione massima al bedrock attesa (ag) e il fattore di amplificazione (F_{PGA}) caratteristico della zona di riferimento, determinato dalla Risposta Sismica Locale] variabile da 0,25g a 0,27g.

La resistenza del deposito alla liquefazione è stata valutata in termini di fattore di resistenza alla liquefazione (FS_L) con la seguente relazione:

$$FS_L = \frac{CRR}{CSR}$$

Dove CRR (Cyclic Resistance Ratio) indica la resistenza del terreno agli sforzi di taglio ciclico e CSR (Cyclic Stress Ratio) la sollecitazione di taglio massima indotta dal sisma. La metodologia utilizzata è riportata in appendice alla presente relazione.

Una volta determinato il fattore di resistenza alla liquefazione (F_s), è stato calcolato l'indice del potenziale di liquefazione (I_L) per ciascuna delle verticali considerate, mediante il quale è possibile definire il pericolo di liquefazione dei depositi considerati.

L'indice del potenziale di liquefazione è stato definito con la seguente relazione proposta da Iwasaki et al. (1982):

$$I_L = \int_0^{20} F(z) \cdot w(z) \cdot dx$$

Dove:
F(z) è una funzione del fattore di sicurezza che per

$FS_L > 1 \rightarrow F(z)=0$

$FS_L \leq 1 \rightarrow F(z)=1- FS_L$

w(z) = 10-0,5·z (con z profondità in metri)

9.2.1 Analisi (LPI)

I risultati delle verifiche alla liquefazione effettuate sono riportati nella seguente tabella 9.2.1.

TABELLA N. 9.2.1 - INDICE DI LIQUEFAZIONE GLOBALE DEI TERRENI IN ESAME

ID_SPU	Fattore di amplificazione (F_{PGA})	Accelerazione massima al bedrock attesa (ag)	Accelerazione di progetto	Falda (m)	Falda duranta il sisma (m)	LPI B&I 2014	LPI Robertson (NCEER 2001)
039013P75	1,38	0,183	0,25	2,5	1	10,155	5,7
039013P113	1,38	0,183	0,25	2,5	1	14,422	11,023
039013P114	1,38	0,183	0,25	2,5	1	14,774	8,252
039013P116	1,38	0,183	0,25	2,5	1	14,916	8,858
039013P117	1,38	0,183	0,25	2,5	1	9,321	8,256
039013P129	1,38	0,183	0,25	2,5	1	5,409	3,565
039013P131	1,38	0,183	0,25	2,5	1	7,142	4,059
039013P130	1,41	0,183	0,26	2,5	1	8,977	7,46
039013P8	1,43	0,183	0,26	2,5	1	1,445	1,084
039013P24	1,43	0,183	0,26	2,5	1	3,844	3,343
039013P110	1,43	0,183	0,26	2,5	1	5,085	3,445
039013P112	1,43	0,183	0,26	2,5	1	21,835	19,247
039013P120	1,43	0,183	0,26	2,5	1	5,508	3,851
039013P115	1,43	0,183	0,26	2,5	1	4,198	2,374
039013P118	1,43	0,183	0,26	2,5	1	1,353	0,948
039013P119	1,43	0,183	0,26	2,5	1	11,431	8,932
039013P132	1,43	0,183	0,26	2,5	1	4,295	3,407
039013P133	1,43	0,183	0,26	2,5	1	10,717	7,934
039013P134	1,43	0,183	0,26	2,5	1	11,554	9,377
039013P135	1,43	0,183	0,26	2,5	1	2,67	2,233
039013P76	1,47	0,183	0,27	2,5	1	0,448	0,177

La valutazione del pericolo di liquefazione, effettuata con riferimento all'indice di liquefazione (IL), come precisato nella tabella n. 9.2.2, porta a definire questo fenomeno non probabile per 7 verticali, probabile per 13 e certo per 1.

TABELLA N. 9.2.2 - VALUTAZIONE DEL PERICOLO DI LIQUEFAZIONE

VALORI DI I_L	PERICOLO DI LIQUEFAZIONE
$I_L = 0$	Assente
$0 < I_L \leq 5$	Non probabile
$5 < I_L \leq 15$	Probabile
$15 < I_L$	Certo

Utilizzando le recenti classi di pericolosità di liquefazione secondo Sonmez (2003), indicate nella tabella 9.2.3, la pericolosità risulta bassa per 3 verticali, moderata per 4, alta per 13 e molto alta per 1.

TABELLA N. 9.2.3 - VALUTAZIONE DEL PERICOLO DI LIQUEFAZIONE SECONDO SONMEZ (2003)

VALORI DI I_L	PERICOLO DI LIQUEFAZIONE
$I_L = 0$	Nulla
$0 < I_L \leq 2$	Bassa
$2 < I_L \leq 5$	Moderata
$5 < I_L \leq 15$	Alta
$15 < I_L$	Molto alta

Nella figura n. 9.2.1 sono evidenti gli indici di liquefazione calcolati (B&I 2014).

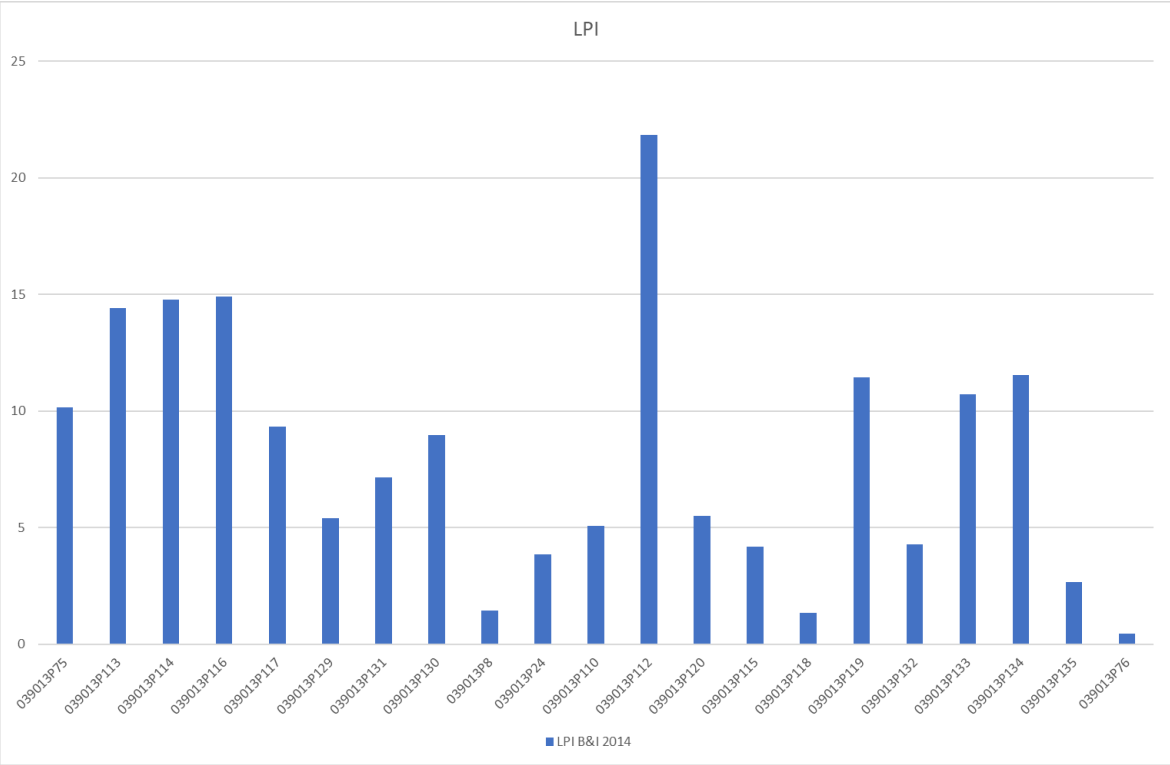

Figura n. 9.2.1 - Indici di liquefazione calcolati (B&I 2014).

La figura n. 9.2.2 mostra il raffronto fra gli indici di liquefazione calcolati con il metodo di Boulanger & Idriss (2014) e quelli calcolati con il metodo di Robertson (NCEER 2001). Si può notare che i due metodi forniscono, in termini relativi, le stesse indicazioni. Il metodo di **Boulanger & Idriss** (**2014**) risulta quello più cautelativo.

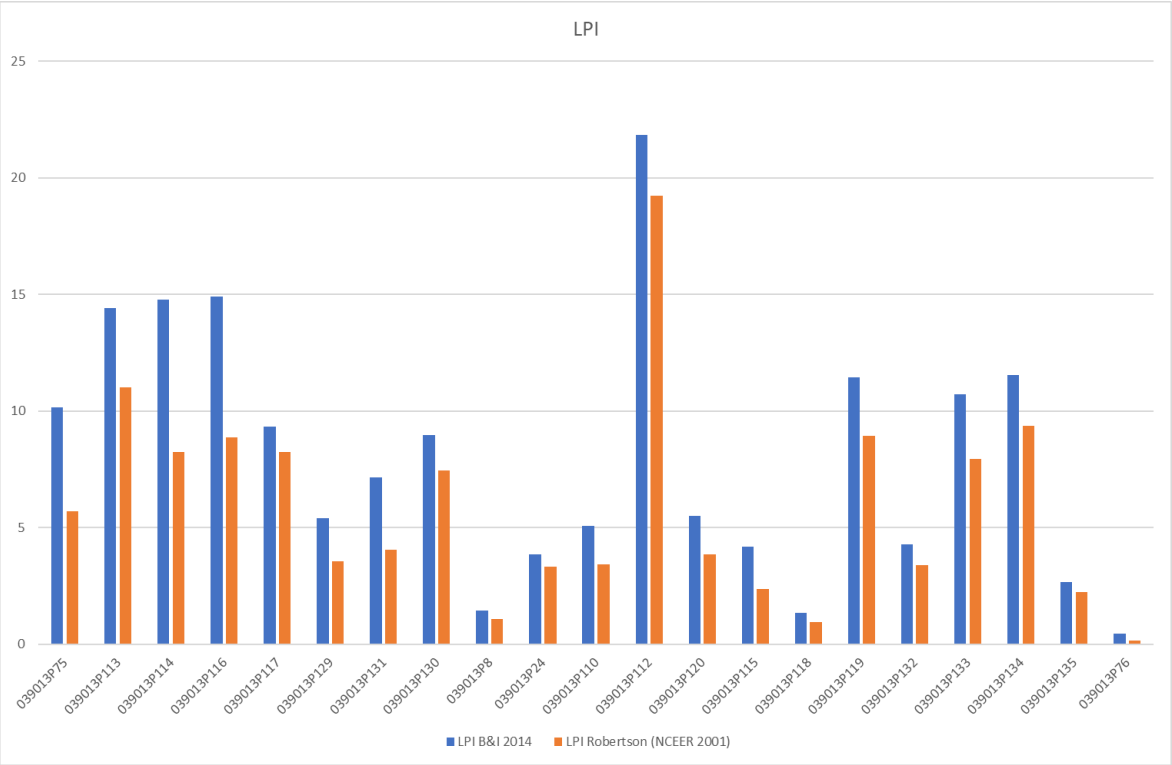

Figura n. 9.2.2 - Raffronto fra gli indici di liquefazione calcolati con il metodo di Boulanger & Idriss (2014) e quelli calcolati con il metodo di Robertson (NCEER 2001).

9.3. CALCOLO DEI CEDIMENTI PERMANENTI POST-SISMICI

La stima dei cedimenti permanenti post-sismici nei terreni granulari saturi liquefacibili dell'area in esame è stata effettuata, a titolo puramente orientativo, utilizzando il programma **CLiq v.3.5.2.8.** - CPT Liquefaction Assessment Software della GeoLogismiki, Geotechnical Engineering Software.

9.3.1 Analisi (Cedimenti)

I risultati ottenuti (B&I 2014), con riferimento a ciascuna penetrometria considerata, sono riportanti nella tabella n. 9.3.1.

TABELLA N. 9.3.1 - CEDIMENTI PERMANENTI POST-SISMICI

ID_SPU	Cedimenti (cm)
039013P75	28,45
039013P113	35,589
039013P114	24,439
039013P116	34,852
039013P117	25,974
039013P129	21,551

039013P131	28,745
039013P130	7,724
039013P8	2,474
039013P24	5,728
039013P110	9,179
039013P112	24,207
039013P120	15,294
039013P115	8,999
039013P118	9,79
039013P119	22,306
039013P132	10,042
039013P133	25,596
039013P134	23,791
039013P135	3,956
039013P76	6,304

Nella figura n. 9.3.1 sono evidenziati i cedimenti verticali calcolati (B&I 2014).

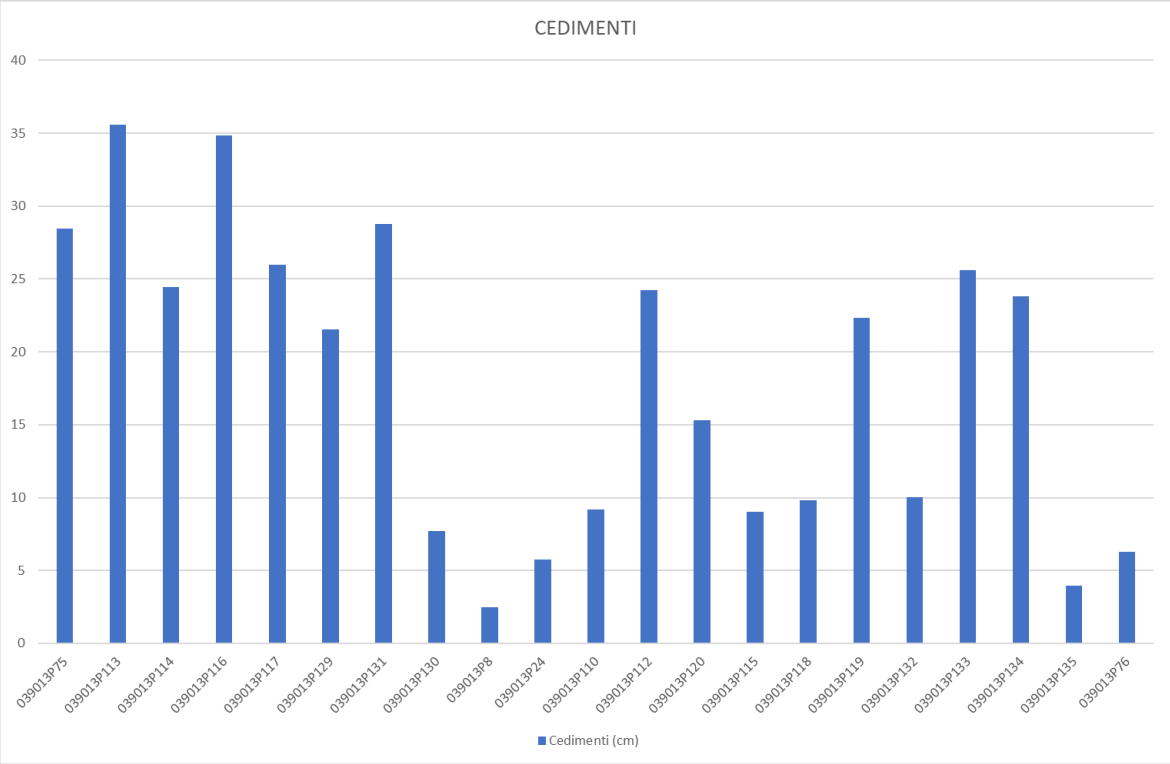

Figura n. 9.3.1 - Cedimenti verticali calcolati.

9.4. LIQUEFACTION SEVERITY NUMBER (LSN)

Come ulteriore indice globale del rischio di liquefazione è stato recentemente introdotto (ed è stato utilizzato anche in questo studio) dai ricercatori Neo-Zelandesi il Liquefaction Severity Number (LSN; Tonkin and Taylor, 2013, Van Ballegooy et al., 2014) messo a punto a seguito dei cospicui fenomeni di liquefazione verificatisi

nella regione di Canterbury in Nuova Zelanda durante la sequenza sismica 2010-2011.

Il Liquefaction Severity Number (LSN) è definito dalla seguente relazione:

$$LSN = 1000 \cdot \int \frac{\varepsilon_v}{z} \cdot dz$$

dove ε_v rappresenta la deformazione volumetrica post-liquefazione (Zhang et al., 2002, figura n. 9.4.1) e z è la profondità dal piano campagna espressa in metri.

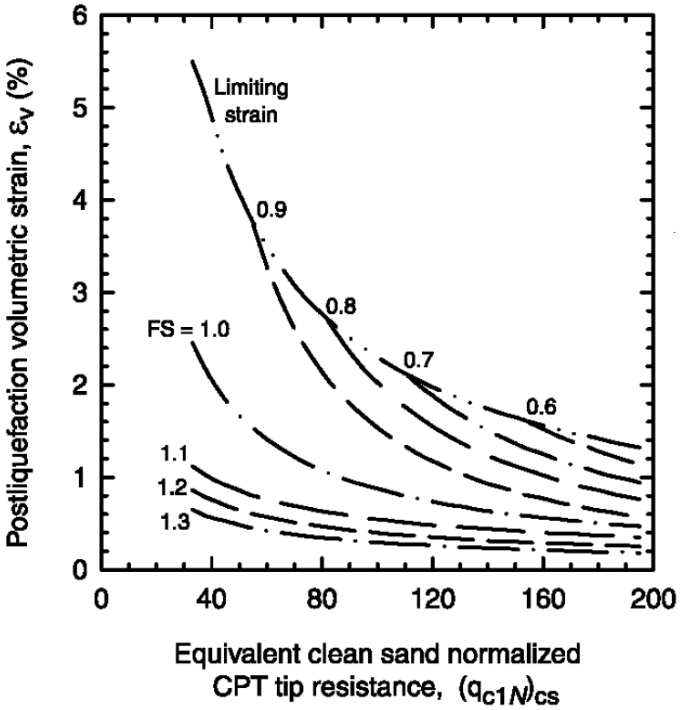

Figura n. 9.4.1 - Grafico per la valutazione della deformazione volumetrica post-liquefazione (Zhang et al., 2002)

9.4.1 Analisi (LSN)

Nella figura n. 9.4.2 sono evidenti i valori dell'indice globale LSN calcolati nel presente studio con il programma CLiq v.3.0.3.2. - CPT Liquefaction Assessment Software della GeoLogismiki, Geotechnical Engineering Software, utilizzando il metodo di Boulanger & Idriss (2014).

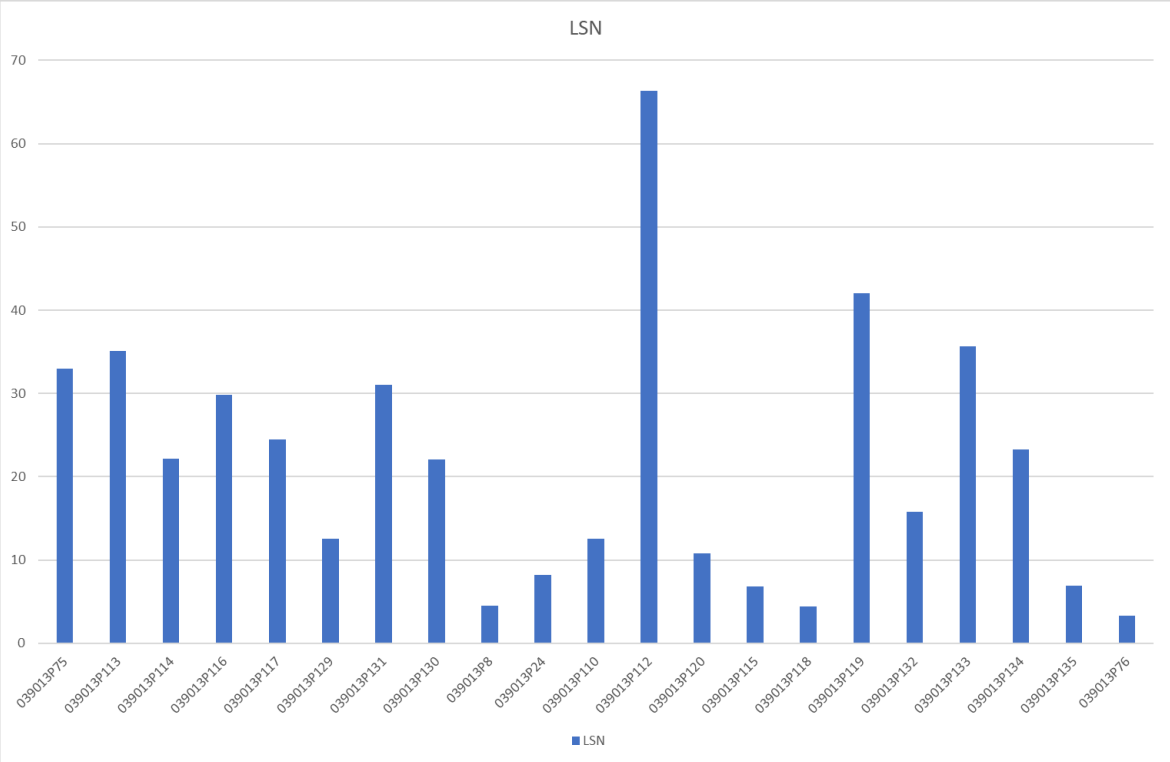

Figura n. 9.4.2 - Valori dell'indice globale LSN calcolati nel presente studio.

La valutazione del pericolo di liquefazione, effettuata con riferimento all'indice di liquefazione (LSN), come precisato nella tabella n. 9.4.1, porta a definire i potenziali effetti indotti dalla liquefazione come:

- da nulli a lievi per 6 verticali;
- modesti per 4 verticali;
- moderati per 5 verticali;
- da moderati a severi per 4 verticali;
- evidenti per 1 verticali;
- notevoli per 1 verticale.

TABELLA N. 9.4.1 - SCALA DEI POTENZIALI EFFETTI INDOTTI DALLA LIQUEFAZIONE IN ACCORDO CON L'INDICE GLOBALE LSN (TONKIN E TAYLOR, 2013)

LSN	Potenziali effetti indotti dalla liquefazione
0< LSN ≤ 10	Manifestazioni del fenomeno della liquefazione da nulle a lievi. Effetti trascurabili
10< LSN ≤ 20	Manifestazioni del fenomeno della liquefazione modeste. Pochi vulcanelli di sabbia
20< LSN ≤ 30	Manifestazioni del fenomeno della liquefazione moderate. Qualche vulcanello di sabbia e qualche danno strutturale
30< LSN ≤ 40	Manifestazioni del fenomeno della liquefazione da moderate a severe. I cedimenti indotti possono causare danni strutturali
40< LSN ≤ 50	Evidenti manifestazioni del fenomeno della liquefazione. Ondulazioni e fratture in superficie. Significativi cedimenti assoluti e differenziali delle strutture
>50	Danni notevoli, estese manifestazioni del fenomeno in superficie. Notevoli cedimenti assoluti e differenziali delle strutture. Danni ai sottoservizi

9.5. INDICE DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE CON LA FUNZIONE DI ISHIHARA (LPI_{ISH})

È stata, inoltre, compiuta un'analisi utilizzando la funzione di Ishihara evidente nella figura n. 9.5.1.

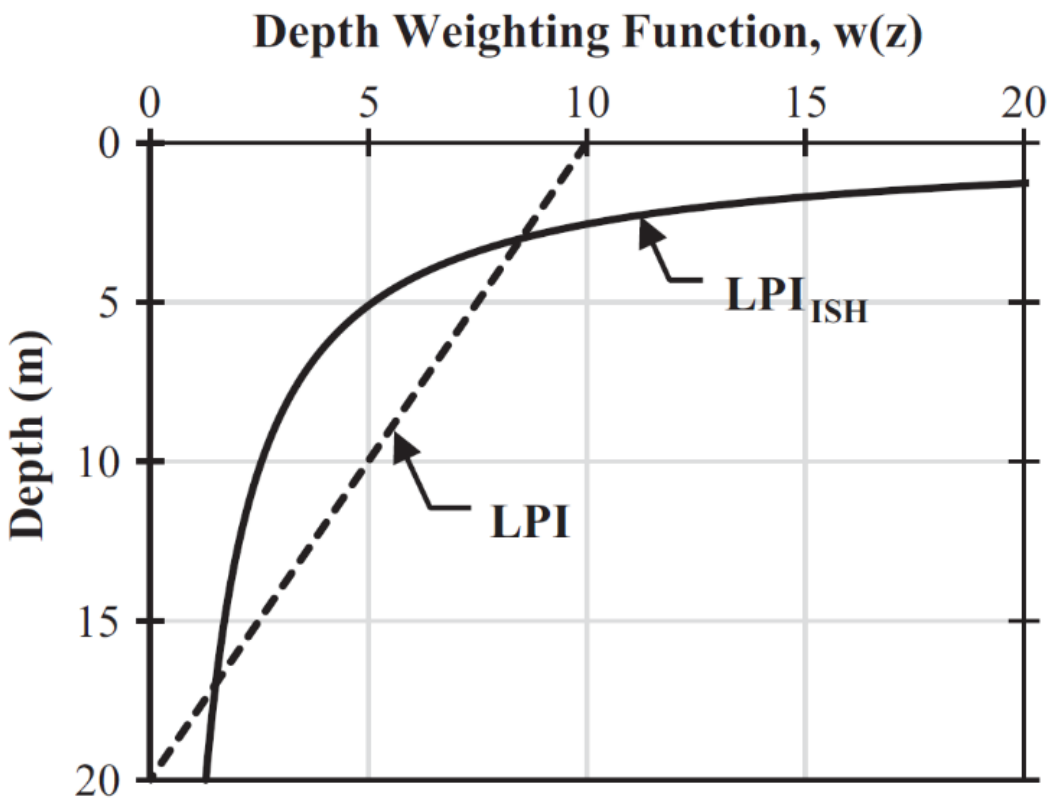

Figura n. 9.5.1 - Funzione di Ishihara utilizzata per il calcolo degli indici del potenziale di liquefazione (LPI_{ISH})

Ishihara ha riconosciuto l'influenza di uno strato non liquefacibile superficiale presente al tetto di quelli liquefacibili. Ha osservato che la presenza di questo strato attenua le manifestazioni superficiali dovute alla liquefazione e che gli effetti della liquefazione superficiale variano al variare dello spessore dello strato non liquefacibile.

Questa metodologia di calcolo, descritta da Maurer et al. (2015) in "Moving towards an improved index for assessing liquefaction hazard: Lessons from historical data", ha fornito gli Indici del Potenziale di Liquefazione di Ishihara (LPI_{ISH}) evidenti nei prossimi paragrafi.

9.5.1 Analisi (LPI_{ISH})

L'analisi realizzata utilizzando il metodo di Boulanger & Idriss (2014) ha fornito gli Indici del Potenziale di Liquefazione di Ishihara (LPI_{ISH}) evidenti nella figura n. 9.5.2.

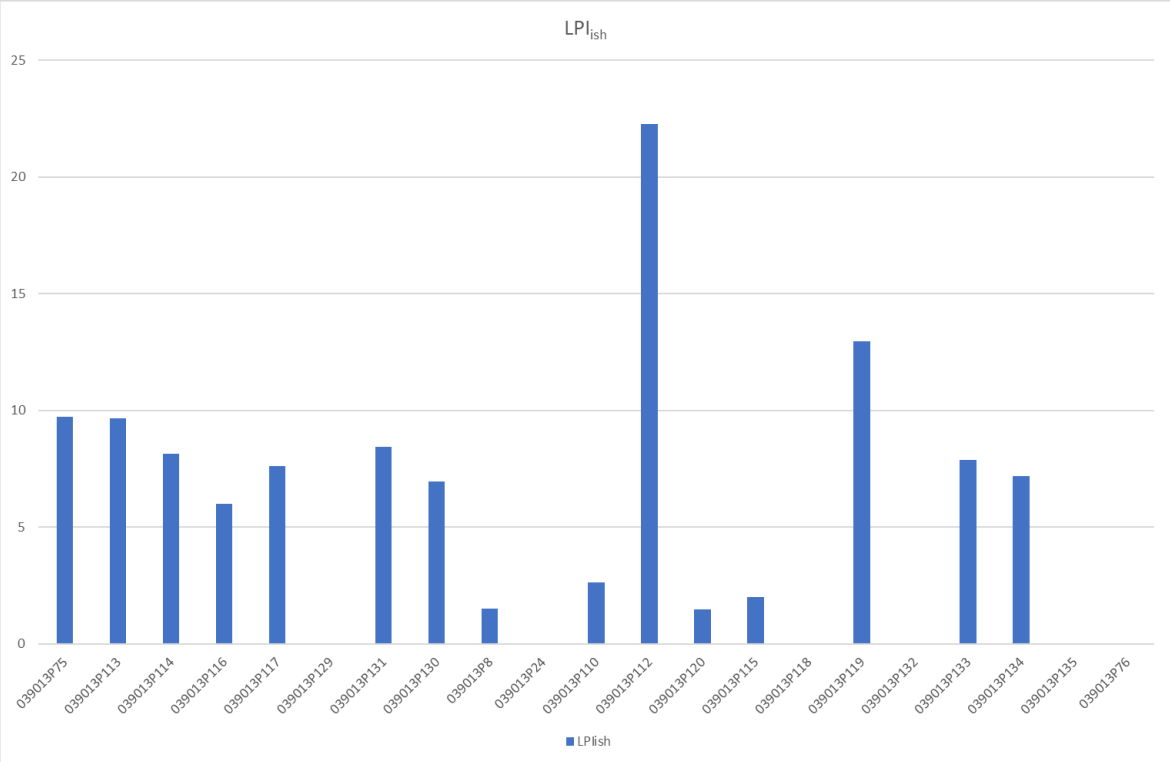

Figura n. 9.5.2 - Indici del Potenziale di Liquefazione calcolati con il metodo di Ishihara (LPI_{ISH}).

Utilizzando la classificazione presente nella tabella n. 9.5.1 si evince che non sono previsti danni da liquefazione per 10 verticali. Per 10 verticali sono previsti danni moderati e per 1 danni importanti.

TABELLA N. 9.5.1 - VALUTAZIONE DEL RISCHIO DI LIQUEFAZIONE SECONDO MAURER ET AL. (2015)

LPI_{ISH} <5	**Danni da liquefazione non previsti**
5<LPI_{ISH} <15	Danni da liquefazione moderati
LPI_{ISH} >15	Danni da liquefazione importanti

10. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Nel presente studio di Microzonazione Sismica di III livello, concernente il Comune di Massa Lombarda, 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. Nelle zone di attenzione per instabilità per liquefazione del terreno in condizioni sismiche è stata, pertanto, predisposta ed eseguita un'attenta campagna di rilievi integrativi e di controllo.

L'insieme di tutti i dati acquisiti ha consentito un approfondito studio del fenomeno della liquefazione dei terreni nella zona considerata.

La microzonazione sismica delle aree potenzialmente liquefacibili è stata definita col metodo di Boulanger & Idriss 2014, considerando sia le elaborazioni LPI (liquefaction potential index) sia LSN (Liquefaction Severity Number).

Le elaborazioni in termini di LPI e LSN forniscono indicazioni sovrapponibili, in termini relativi, in merito alla maggiore o minore pericolosità dell'area in studio.

In sintesi, visti i valori che si ottengono con i diversi approcci e la situazione evidenziata dal loro confronto, si può affermare che la classificazione del territorio in esame secondo lo studio del pericolo di liquefazione si presenta fondata ($5<IL\leq15$) per varie porzioni del territorio comunale indagato.

Nelle seguenti tavole allegate sono riportate le zone di attenzione per instabilità per liquefazioni, unitamente alle verticali di verifica, con indicato il valore di IL (Boulanger & Idriss - 2014):

- Carta di microzonazione sismica - FPGA in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $FA_{0,1 - 0,5\ s}$ in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $FA_{0,4 - 0,8\ s}$ in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $FA_{0,7 - 1,1\ s}$ in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $FA_{0,5 - 1,5\ s}$ in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $FH_{0,1 - 0,5\ s}$ in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $FH_{0,5 - 1,0\ s}$ in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $FH_{0,5 - 1,5\ s}$ in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - H_{sm} in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $H_{0,4 - 0,8\ s}$ in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $H_{0,7 - 1,1\ s}$ in scala 1:5.000
- Carta di microzonazione sismica - $H_{0,5 - 1,5\ s}$ in scala 1:5.000

Il presente studio evidenzia l'importanza della messa a punto del database geognostico, su cui basare le analisi di pericolosità, che contemplino anche il fenomeno della liquefazione sismica. Infatti, in seguito al processamento delle 21 prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono (CPTU), è stato possibile caratterizzare la suscettibilità dell'area, calcolare diversi indicatori di pericolosità da liquefazione e studiarne la distribuzione spaziale descritta attraverso mappe, realizzate su piattaforma GIS mediante interpolazione geostatistica di risultati puntuali.

Forlì, 28 dicembre 2024