PROTEZIONE CIVILE
Presidenza del Consiglio dei Ministri
Dipartimento della Protezione Civile

Regione Emilia-Romagna

CONFERENZA DELLE REGIONI E DELLE PROVINCE AUTONOME

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

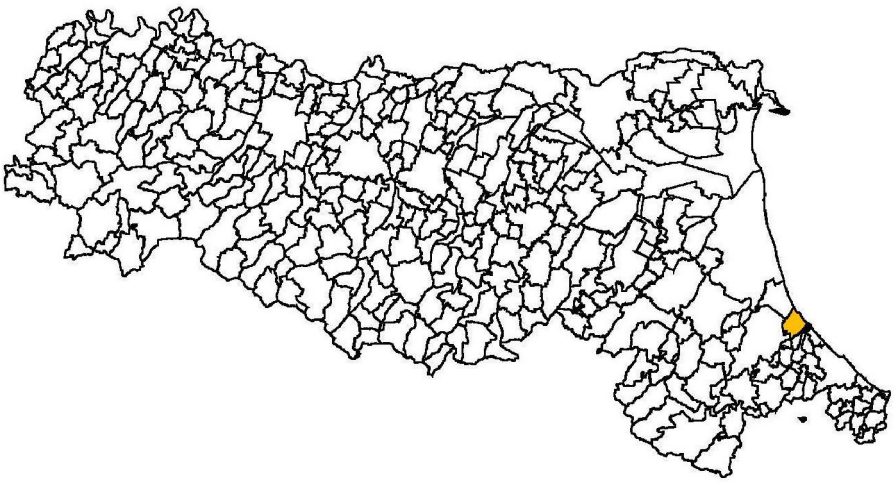
MICROZONAZIONE SISMICA

Relazione illustrativa

Livello 3

Regione Emilia-Romagna

Comune di Cesenatico



Regione	Soggetto realizzatore	Data
Emilia-Romagna	Soggetto incaricato: Dott. Geol. Aldo Antoniazzi Collaboratori: Dott. Geol. Alberto Domenico Antoniazzi Dott. Geol. Marco Baldi Dott. Geol. Stefano Castagnetti Dott. Geol. Maurizio Moroni Dott. Geol. Francesco Stragapede Dott. Geol. Giovanni Leonasi Dott. Luca Castellucci	Ottobre 2023

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 5
2.1. Inquadramento geografico 5
2.2. Inquadramento geologico 6
2.3. Inquadramento tettonico 9
2.4. Caratteristiche sismotettoniche 10
2.5. Storia sismica 13
2.6. Classificazione sismica 17
3. DATI GEOTECNICI E GEOFISICI 19
3.1. Acquisizione ed elaborazione dati 19
3.2. Pozzi, sondaggi e penetrometrie 20
3.3. Prove geofisiche 20
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 38
7.4. Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica 43
7.5. Carta delle velocità delle onde di taglio S 45
7.6. Carte di microzonazione sismica 48
8. ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE 50
8.1. Area considerata 50
8.2. Metodologia 50
8.3. Modello geofisico del sottosuolo 50
8.3.1. Litologia 51
8.3.2. Determinazione della Vs e del bedrock sismico 51
8.3.3. Curve di variazione dello smorzamento (D) e della rigidezza (G/G0) 53
8.3.4. Descrizione del modello 54
8.3.5. Azioni sismiche in ingresso 55
8.4. Procedura di analisi RSL 55
8.4.1. Metodo lineare equivalente 55
8.4.2. Soluzione alla singola iterazione mediante FEM 57
8.4.3. Procedimento iterativo 59
8.4.4. Interpretazione dei risultati 59
8.5. Analisi dei risultati 59
8.5.1. Accelerogrammi di output - Microzona 2002 61
8.6. Pericolosità sismica 63
9. VERIFICA DELLA PERICOLOSITÀ SISMICA DI LIQUEFAZIONE 65
9.1. Premessa 65
9.2. Calcolo dell'indice del potenziale di liquefazione (LPI) 65
9.2.1 Analisi (LPI) 66
9.3. Calcolo dei cedimenti permanenti post-sismici 70
9.3.1 Analisi 70
9.4. Liquefaction Severity Number (LSN) 72
9.4.1 Analisi (LSN) 73
9.5. Indice del potenziale di liquefazione con la funzione di Ishihara (LPI_{ISH}) 75
9.5.1 Analisi (LPI_{ISH}) 75
10. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE 78

RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO

Dott. Ing. Chiara Benaglia
Dirigente dell'Ufficio Pianificazione Territoriale Comune di Cesenatico

GRUPPO DI LAVORO

Soggetto Incaricato

GEOLOGO DOTT. ALDO ANTONIAZZI
Studio di Geologia Tecnica e Ambientale

Professionisti	Professione	Principali competenze
Dott. Alberto Domenico Antoniazzi	Geologo	Pianificazione territoriale, geopedologia ed evoluzione costiera
Dott. Aldo Antoniazzi (Coordinatore)	Geologo	Pianificazione territoriale, idrogeologia, meccanica delle terre e rocce e Protezione Civile
Dott. Marco Baldi	Geologo	Pianificazione territoriale, Microzonazione Sismica, sistemi informativi territoriali (GIS) e telerilevamento
Dott. Stefano Castagnetti	Geologo	Pianificazione territoriale, Microzonazione Sismica, Protezione Civile e CLE
Dott. Maurizio Moroni	Geologo	Esplorazione del sottosuolo e geotecnica
Dott. Francesco Stragapede	Geologo	Geofisica applicata alla pianificazione territoriale e progettazione ed analisi Microzonazione Sismica

Collaboratori e specialisti

Dott. Geol. Giovanni Leonasi
Dott. Luca Castellucci

Esecuzione indagini

Dott. Geol. Maurizio Moroni (indagini geognostiche)
Dott. Geol. Francesco Stragapede (indagini geofisiche)

Fonte dati

Uffici Tecnici Comunali - Comune di Cesenatico
Provincia di Forlì-Cesena
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 1:5.000
- Carta geologico-tecnica in scala 1:10.000
- Carta delle frequenze naturali dei terreni in scala 1:10.000
- Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica in scala 1:10.000
- Carta delle velocità delle onde di taglio S in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FPGA in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FA $_{0,1 - 0,5\ s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FA $_{0,4 - 0,8\ s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FA $_{0,7 - 1,1\ s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FA $_{0,5 - 1,5\ s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FH $_{0,1 - 0,5\ s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FH $_{0,5 - 1,0\ s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FH $_{0,5 - 1,5\ s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - H_{sm} in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - H $_{0,4 - 0,8\ s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - H $_{0,7 - 1,1\ s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - H $_{0,5 - 1,5\ s}$ in scala 1:10.000

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 Cesenatico (Provincia di Forlì-Cesena), effettuato su incarico di cui al Registro Scritture Private al N. 59 in data 10/05/2022 (CUP: D22C21002240009, CIG: Z4B35942ED) e finanziato con contributi derivanti dall'OCDPC n° 780/2021 "Attuazione dell'articolo 11 del decreto-legge 28 aprile 2009, n. 39, convertito, con modificazioni, dalla legge 24 giugno 2009, n. 77, rifinanziato dalla legge 30 dicembre 2018, n. 145." e dalla DGR n° 1885/2021.

Il Comune di Cesenatico è dotato di uno studio di Microzonazione Sismica di Livello 2 con locali approfondimenti di terzo realizzato nel dicembre 2014 dallo scrivente professionista. Questo studio viene finanziato come stabilito dall'Ordinanza Presidenza Consiglio Ministri 20 febbraio 2013 n. 52 "Contributi per gli interventi di prevenzione del rischio sismico per l'annualità 2012" (G.U. n° 50 del 20.2.2013) ed è stato validato dalla riunione della Commissione Tecnica per il monitoraggio degli studi di microzonazione sismica del 23 novembre 2015 (Regione Emilia-Romagna, prot. n. PG.2015.870211 del 14/12/2015).

Il presente studio di Livello 3 è stato condotto a partire dallo studio di Livello 2 con locali approfondimenti di terzo citato in precedenza, 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 Cesenatico appartiene alla Regione Emilia-Romagna, ricade nella Provincia di Forlì-Cesena (FC) ed è adiacente ad un tratto della costa adriatica romagnola, interposto tra Ravenna e Rimini (Figura n. 2.1). Si estende per circa 7,4 chilometri dalla località Tagliata, fino al torrente Rigossa.

Il territorio di Cesenatico è di bassa pianura, raggiunge infatti la quota massima di 20 metri sul livello marino nei pressi di Bagnarola. La sua superficie, pari a 45,13 chilometri quadrati, si estende nell'entroterra fino alla distanza massima di 6,8 chilometri dalla linea di spiaggia.

Il Comune di Cesenatico confina a nord ovest con il Comune di Cervia (Provincia di Ravenna), a sud ovest col Comune di Cesena, a sud col Comune di Gambettola, a sud est col Comune di Gatteo e, infine, a nord-est col Mare Adriatico.

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

Nella figura n. 2.2 è rappresentata la posizione del Comune di Cesenatico nell'ambito della Provincia di Forlì-Cesena.

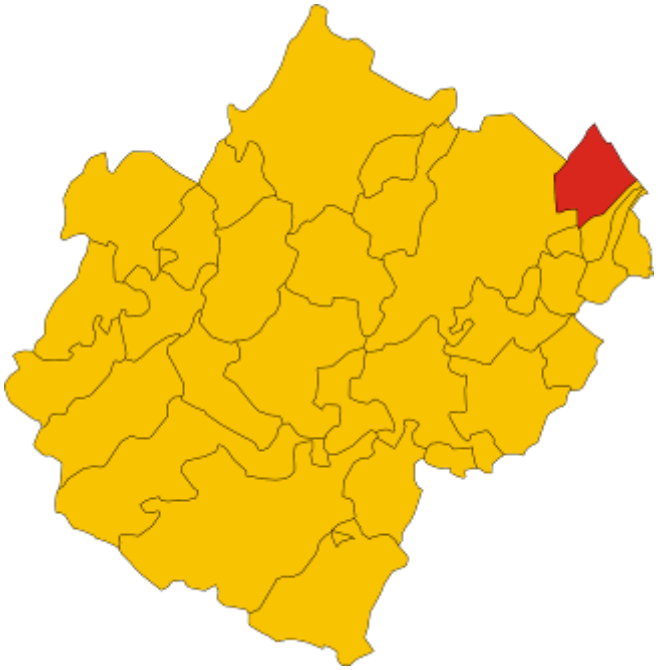


Figura n. 2.2 - Inquadramento del Comune di Cesenatico (area in rosso) nell'ambito della Provincia di Forlì-Cesena.

2.2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Il territorio del Comune di Cesenatico è situato nel margine sudorientale della Pianura Padana (Pianura romagnola): una vasta area pianeggiante, dovuta essenzialmente al deposito di sedimenti alluvionali, più o meno rimaneggiati dai flutti marini nei settori costieri.

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

- alle sabbie di cordone litorale di pertinenza dell'Unità di Modena (AES_{8a}) estese a fascia lungo la costa,
- ai depositi alluvionali del Subsintema di Ravenna (AES_8) o dell'Unità di Modena (AES_{8a}) concernenti il restante territorio comunale.

Nel sottosuolo di Cesenatico la base dei depositi quaternari è situata ad una profondità dell'ordine di 1.500 metri rispetto al piano di campagna. La carta dell'imbasamento del Quaternario nella valle padana[1] mostra, infatti, che tale base scende progressivamente fino ad oltre 2.000 metri, procedendo dal riminese verso la foce del fiume Savio (figura n. 2.4).

I sedimenti alluvionali rappresentano solo la parte superiore di questa potente coltre sedimentaria. I pozzi, che l'hanno esplorata alla ricerca di falde acquifere artesiane con risorse idropotabili, hanno rinvenuto acque dolci fino a profondità dell'ordine di 180 metri al di sotto del piano di campagna.

[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.

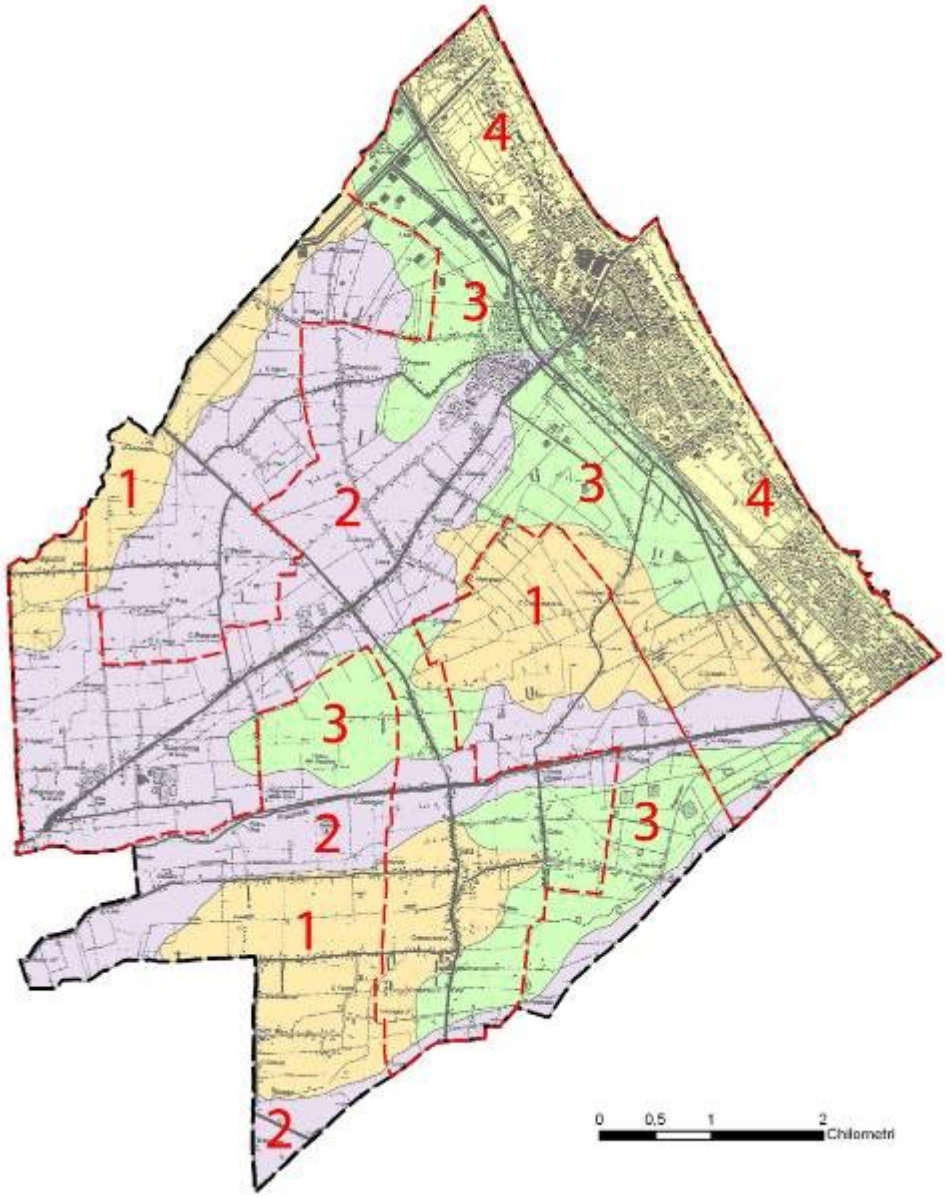


Figura n. 2.3 - Lineamenti geologici del Comune di Cesenatico. Legenda: 1) Subsintema di Ravenna - Sintema emiliano-romagnolo superiore (AES8). Deposito di tracimazioni fluviali indifferenziate. Piana alluvionale - Pleistocene superiore - Olocene. 2) Subsintema di Ravenna - Unità di Modena - Sintema emiliano-romagnolo superiore (AES8a). Deposito di canale, argine e rotta fluviale. Piana alluvionale. Olocene. 3) Subsintema di Ravenna - Unità di Modena - Sintema emiliano-romagnolo superiore (AES8a). Deposito di piana inondabile in area interfluviale. Piana alluvionale. Olocene. 4) Subsintema di Ravenna - Unità di Modena - Sintema emiliano-romagnolo superiore (AES8a). Deposito di cordone litorale. Piana costiera, fronte deltizia e piana di sabbia. Olocene. L'area tratteggiata in rosso è oggetto di microzonazione sismica.

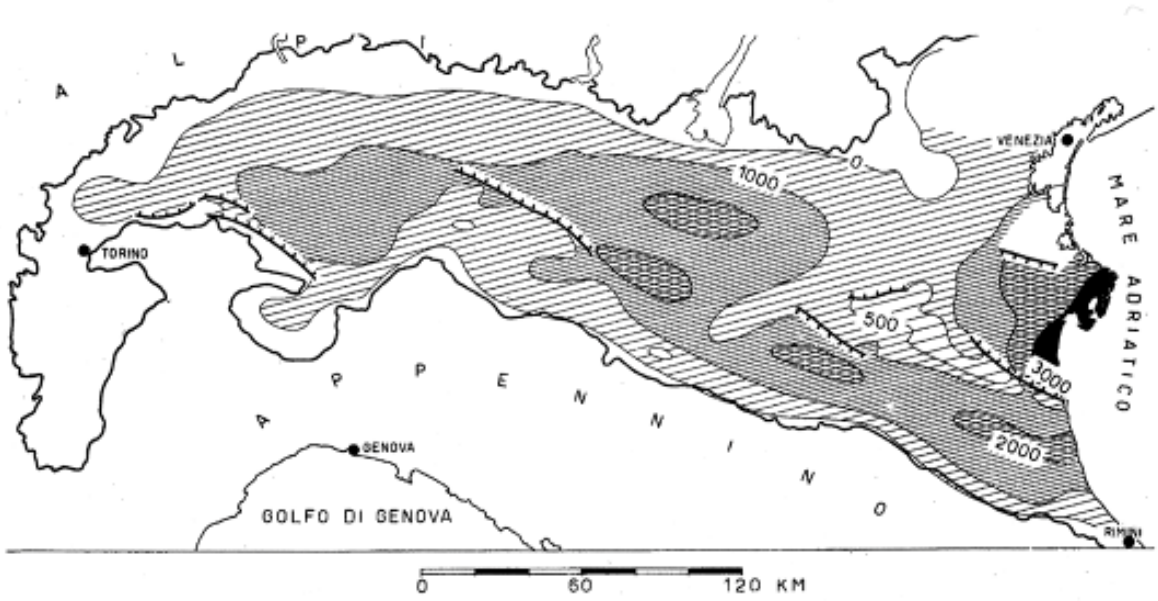


Figura n. 2.4 - Carta della base del Quaternario nella Valle Padana (Da Lucchetti L., 1959).

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.

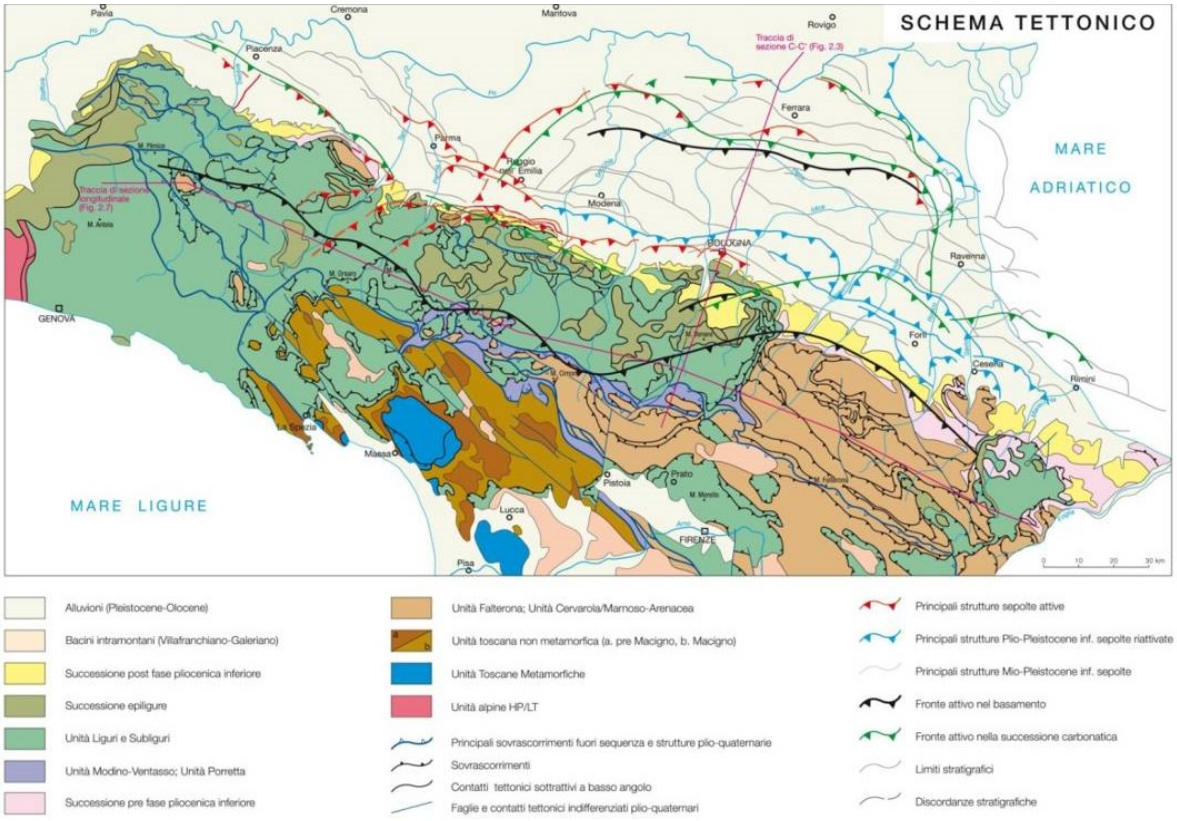


Figura n. 2.5 - Schema tettonico dell'Emilia-Romagna.

Una sintesi schematica della situazione del sottosuolo, indicativamente valida anche per quanto concerne il territorio del Comune di Cesenatico, 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].

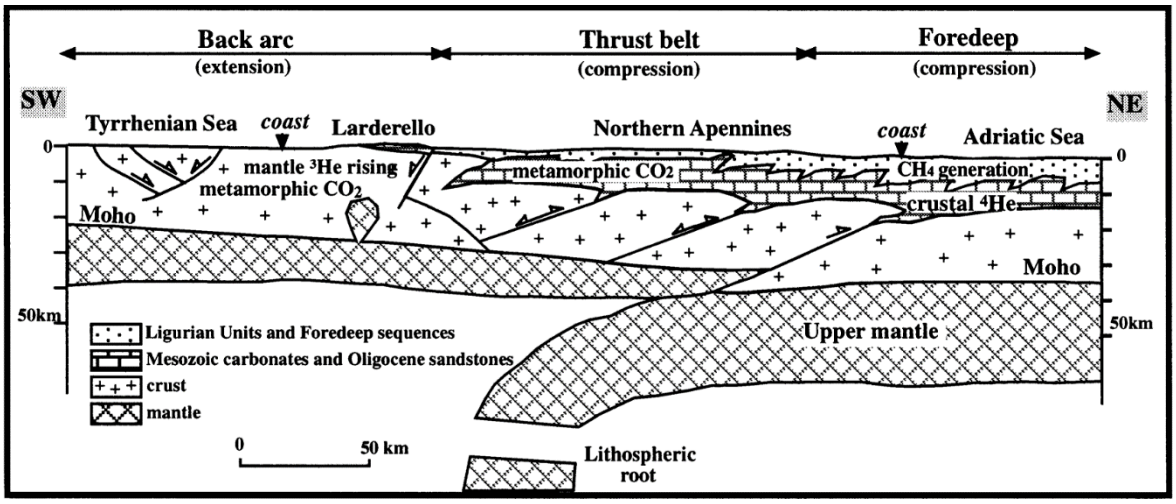


Figura n. 2.6 - Sezione geologica schematica attraverso l'Appennino Settentrionale, estesa dal Tirreno all'Adriatico e dalla superficie al Mantello superiore (da A. MINISSALE E ALTRI, 2.000).

2.3. INQUADRAMENTO TETTONICO

Il territorio del Comune di Cesenatico 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 dalle Note illustrative del foglio Forlì-Cervia della Carta geologica d'Italia in scala 1:50.000 (2005).

[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.

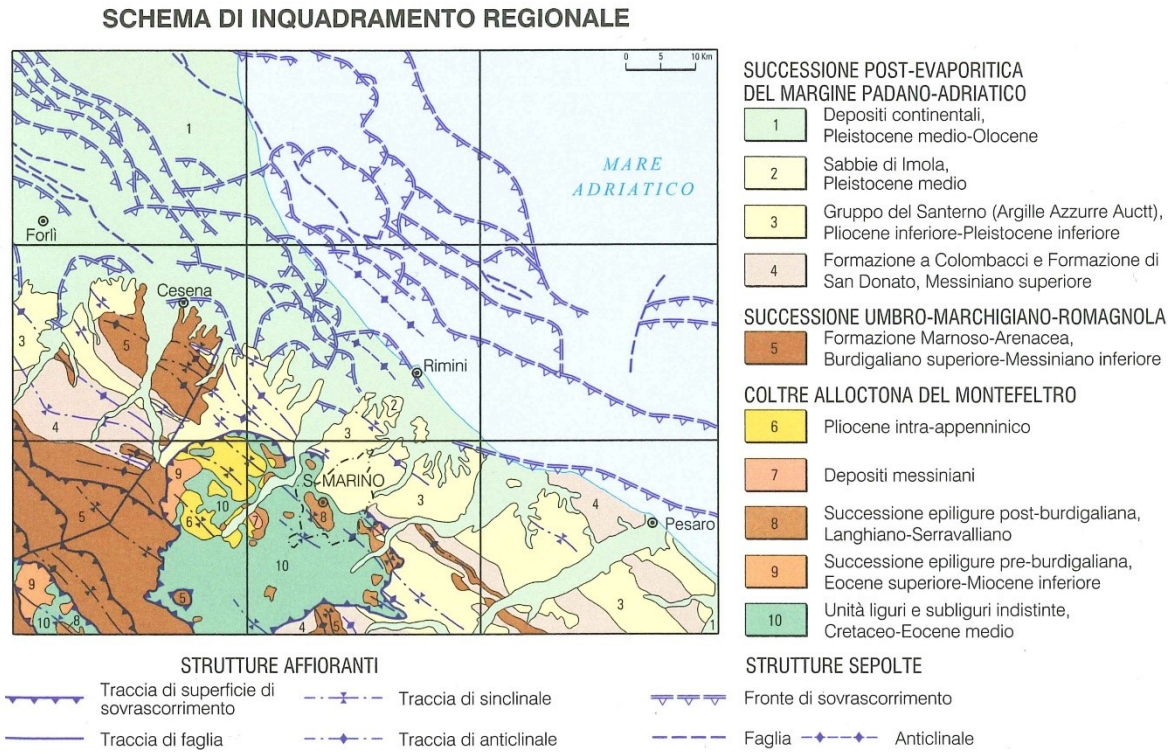


Figura n. 2.7 - Schema tettonico particolareggiato del territorio ove ricade il Comune di Cesenatico.

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 ed i limitrofi depositi marini litoranei da un cospicuo affossamento strutturale.

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.

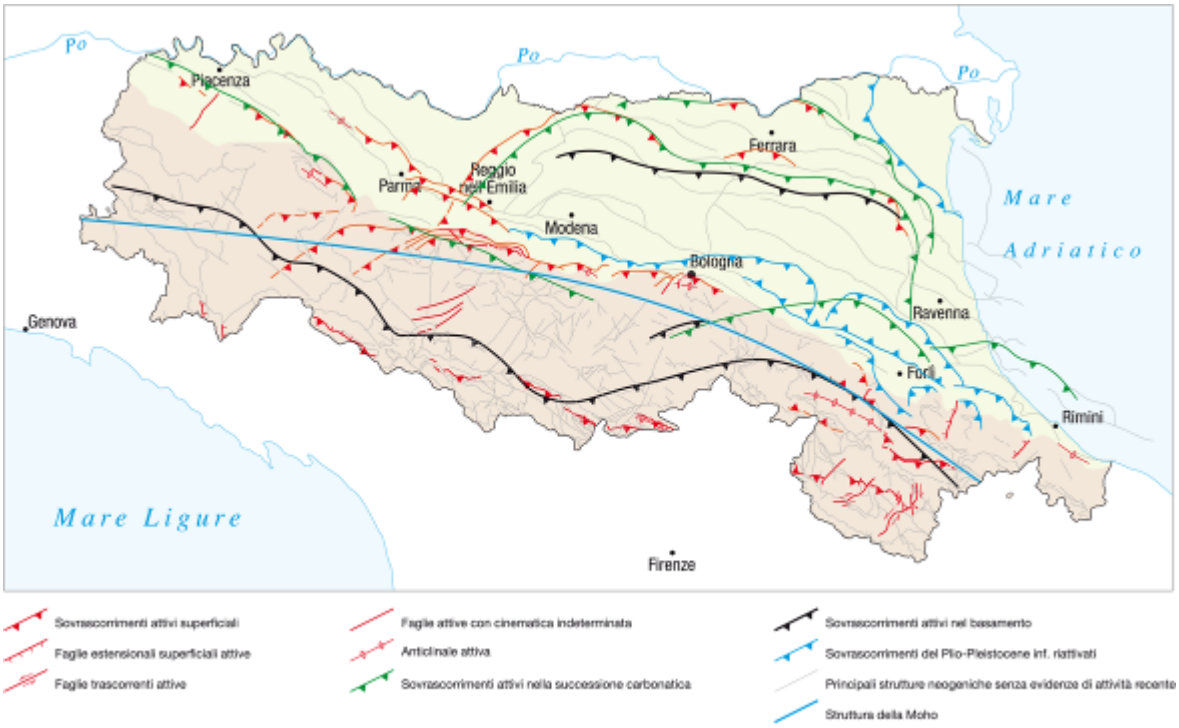


Figura n. 2.8 - Principali strutture attive in Emilia-Romagna.

Le sorgenti sismogenetiche e le faglie potenzialmente attive e capaci, interessanti specificatamente il territorio comunale di Cesenatico, 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 Cesenatico figurano le seguenti sorgenti sismogenetiche composite:

- ITCS039: Riminese onshore con Mw max (magnitudo momento massima) 5,9;
- ITCS030: Riminese offshore con Mw max (magnitudo momento massima) 6,1;
- ITCS011: Ascensione-Armaia con Mw max (magnitudo momento massima) 6,0;
- ITCS001: Castel San Pietro Terme-Meldola 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.***

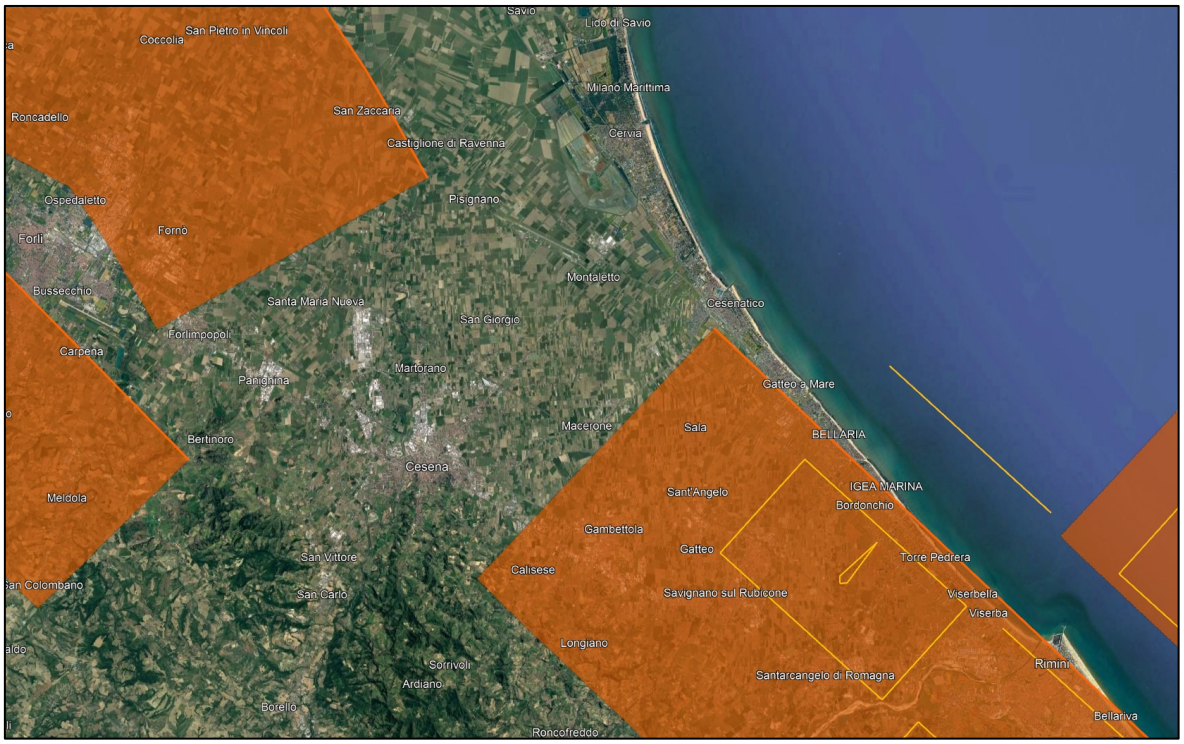


Figura n. 2.9 - Ubicazione delle sorgenti sismogenetiche del DISS (Versione 3.2.1) nella zona di pertinenza del Comune di Cesenatico.

Nella Zonazione sismogenetica ZS9 dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia[5], il territorio comunale di Cesenatico (figura n. 2.10) ricade nella zona "Rimini-Ancona 917" con Mw max (magnitudo momento massima) di 6,14.

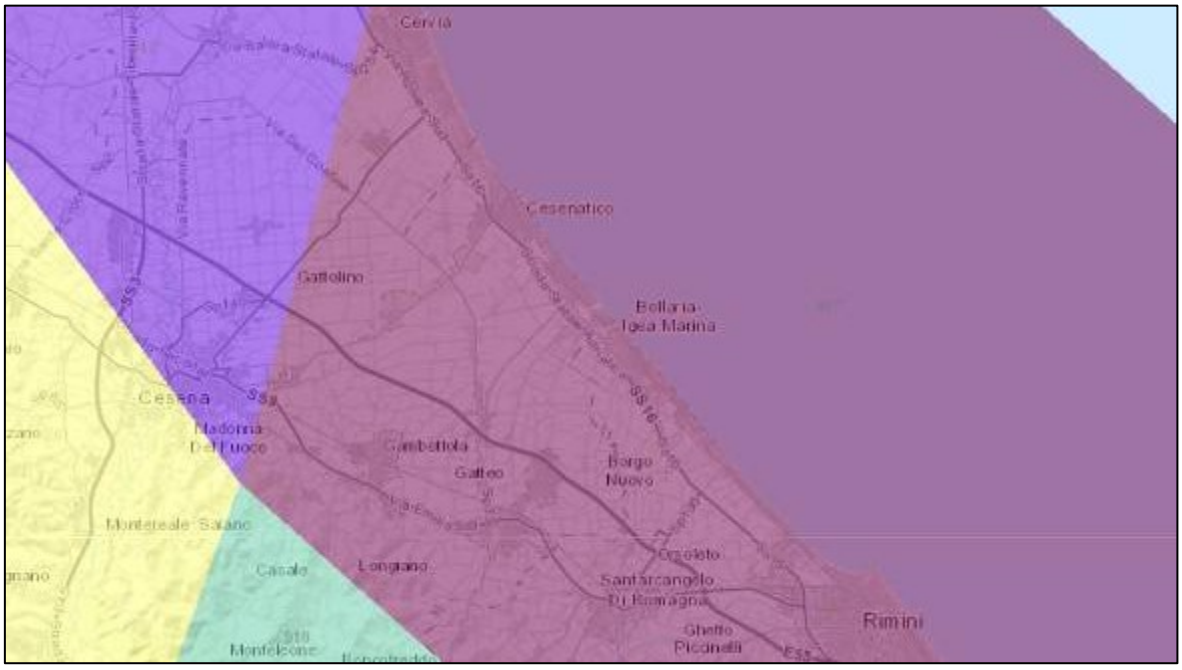


Figura n. 2.10 - Zonazione sismogenetica ZS9 del Comune di Cesenatico (zona "Rimini-Ancona 917").

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

2.5. STORIA SISMICA

La storia sismica del Comune di Cesenatico è stata desunta dal Database Macrosismico Italiano (edizione 2015, versione 2,0)[6]. Nella tabella n. 2.1 sono riportati gli eventi di maggiore intensità verificatisi a Cesenatico, 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 CESENATICO

Effetti	In occasione del terremoto del:				
Intensità [MCS]	**Data Year Mo Da Ho Mi Se**	**Area epicentrale**	**NMDP**	**Io**	**Mw**
7	1672 04 14 15 45	Riminese	92	8	5,59
8	1875 03 17 23 51	Costa romagnola	144	8	5,74
NF	1895 03 23	Comacchio	33	6	4,65
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
6	1911 03 20 15 47	Forlivese	25	6	5,09
2-3	1913 07 21 22 35	Appennino romagnolo	43	5-6	4,79
3	1914 10 27 09 22	Lucchesia	660	7	5,63
3-4	1915 01 13 06 52 43.00	Marsica	1041	11	7,08
5	1915 01 13 19 30	Cesenate	5	5	4,38
6	1916 05 17 12 50	Riminese	132	8	5,82
5	1916 06 16 01 27	Riminese	17	6	4,82
5	1916 08 16 07 06 14.00	Riminese	257	8	5,82
4	1918 11 10 15 12 28.00	Appennino forlivese	187	9	5,96
4	1919 06 29 15 06 13.00	Mugello	565	10	6,38
3	1929 04 10 05 44	Bolognese	87	6	5,05
3	1930 10 30 07 13	Senigallia	268	8	5,83
3	1952 07 04 20 35 12.00	Appennino forlivese	64	7	4,94
3-4	1953 12 14 07 11 06.00	Appennino forlivese	48	5-6	4,7
2	1956 05 26 18 40	Appennino forlivese	76	7	4,99
2	1956 06 03 01 45 57.00	Appennino forlivese	62	6	4,51
3	1961 05 08 22 45 51.00	Forlivese	40	5	4,37
2	1984 04 29 05 02 59.00	Umbria settentrionale	709	7	5,62
2	1986 12 06 17 07 19.77	Ferrarese	604	6	4,43
NF	1987 07 05 13 12 37.46	Montefeltro	90	6	4,44
3-4	1993 11 07 23 21 11.72	Cesenate	36	4-5	3,95
4-5	1993 11 09 13 46 24.39	Cesenate	28	4-5	3,93
NF	1995 12 27 23 44 27.69	Forlivese	37	5	3,97
5	1997 09 26 09 40 26.60	Appennino umbro-marchigiano	869	8-9	5,97
2-3	2000 05 06 22 07 03.78	Faentino	85	5	4,08
4-5	2000 05 08 12 29 56.20	Faentino	126	5	4,67

[6] HTTPS://EMIDIUS.MI.INGV.IT/CPTI15-DBMI15_V2.0/DESCRIPTION_CPTI15.HTM

Effetti	In occasione del terremoto del:				
Intensità [MCS]	**Data Year Mo Da Ho Mi Se**	**Area epicentrale**	**NMDP**	**Io**	**Mw**
2	2000 05 10 16 52 11.60	Faentino	151	5-6	4,82
3	2001 11 26 00 56 55.46	Casentino	211	5-6	4,63
NF	2002 11 02 10 57 44.89	Ferrarese	79	4	4,21
3	2003 09 14 21 42 53.18	Appennino bolognese	133	6	5,24
NF	2005 07 15 15 17 18.00	Forlivese	173	4-5	4,29
NF	2006 10 21 07 04 10.01	Anconetano	287	5	4,21
5	2016 08 24 01 36 32.00	Monti della Laga	221	10	6,18

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

I maggiori terremoti locali, com'è evidente nella figura n. 2.11, si sono verificati nel 1672 e nel 1875.

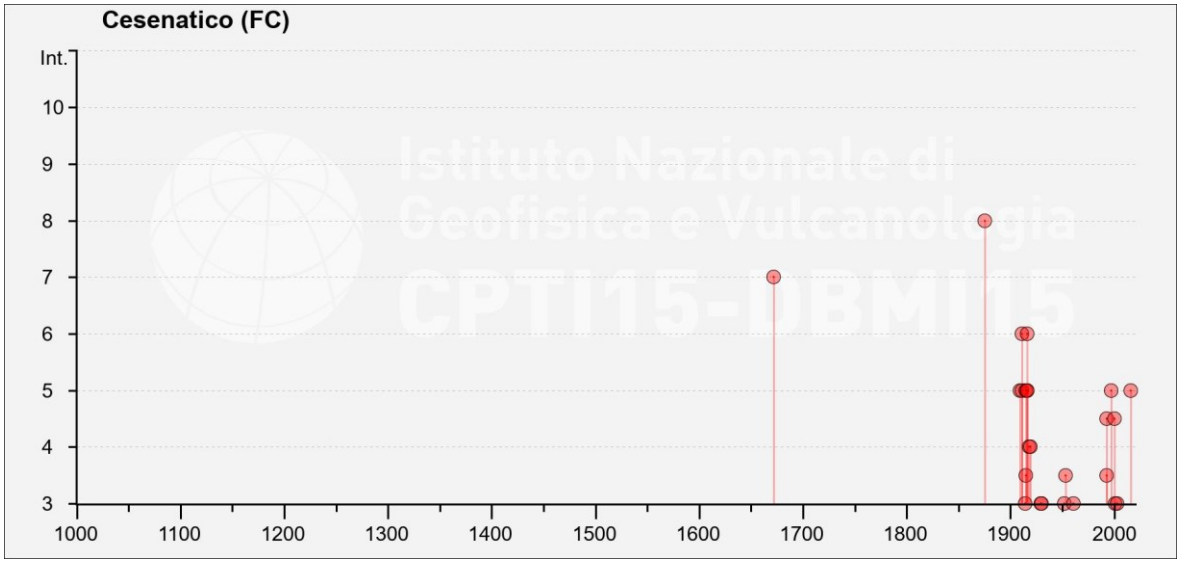


Figura n. 2.11 - I maggiori terremoti storici che hanno colpito Cesenatico.

Il terremoto del 17 marzo 1875, con epicentro a nord di Rimini, provocò gravi danni a Cervia, Cesenatico e Rimini dove venne danneggiato seriamente il Tempio Malatestiano causando una vittima. Avvertito da Belluno a Roma provocò lesioni negli edifici lungo la costa da Pesaro a Ravenna. Si verificarono fenomeni di liquefazione. Venne seguito da un leggero tsunami che invase le spiagge di Rimini, Cervia e Cesenatico. Nel porto di Ancona furono riscontrate sensibili oscillazioni del mare.

Mario Baratta afferma che, in seguito a questo terremoto, a Cesenatico, a Cervia e a Rimini caddero moltissimi comignoli, precipitarono delle volte ed alcuni muri, si aprirono delle fenditure nelle case ecc. I maggiori danni avvennero nelle prime due località[7].

Nel già citato DISS dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia è menzionato anche il terremoto di Rimini del 25 dicembre 1786, risentito anche da Cesenatico, com'è evidente nella relativa carta delle isosisme (figura n. 2.12), in cui le diverse parti colorate dal rosso al verde, corrispondono a parti del territorio colpite da effetti di severità decrescente. Di questo sisma è caratteristica la distribuzione dei maggiori effetti secondo una direzione parallela alla costa.

[7] BARATTA M.: *I terremoti* d'Italia, Forni, ristampa anastatica dell'edizione di Torino, 1901, Sala Bolognese, 1979, p. 466.

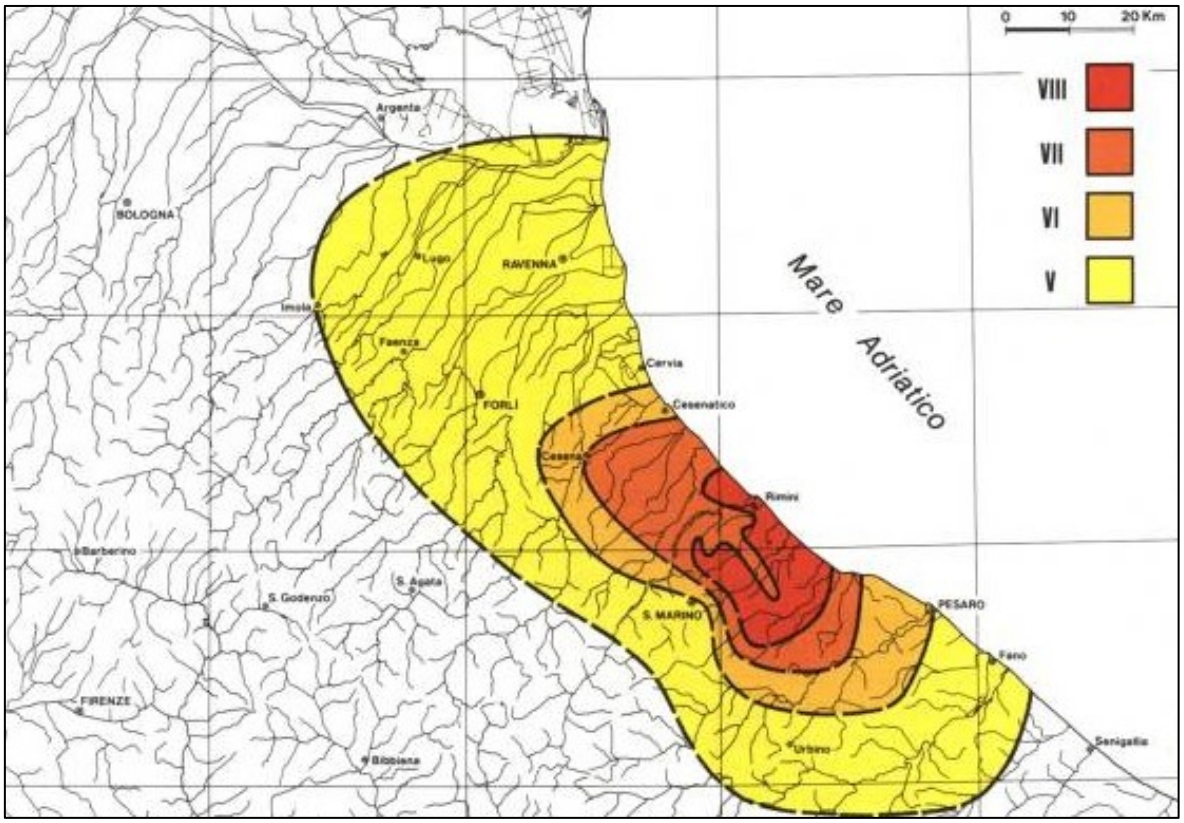


Figura n. 2.12 - Carta delle isosisme del terremoto di Rimini del 25 dicembre 1786.

Nella figura n. 2.13, è riportata la magnitudo e la profondità dei terremoti verificatisi nella zona di pertinenza di Cesenatico dall'inizio del 1900 ad oggi, entro il raggio di 20 chilometri[8]. Come si può notare dalla figura la profondità degli ipocentri è quasi sempre superficiale.

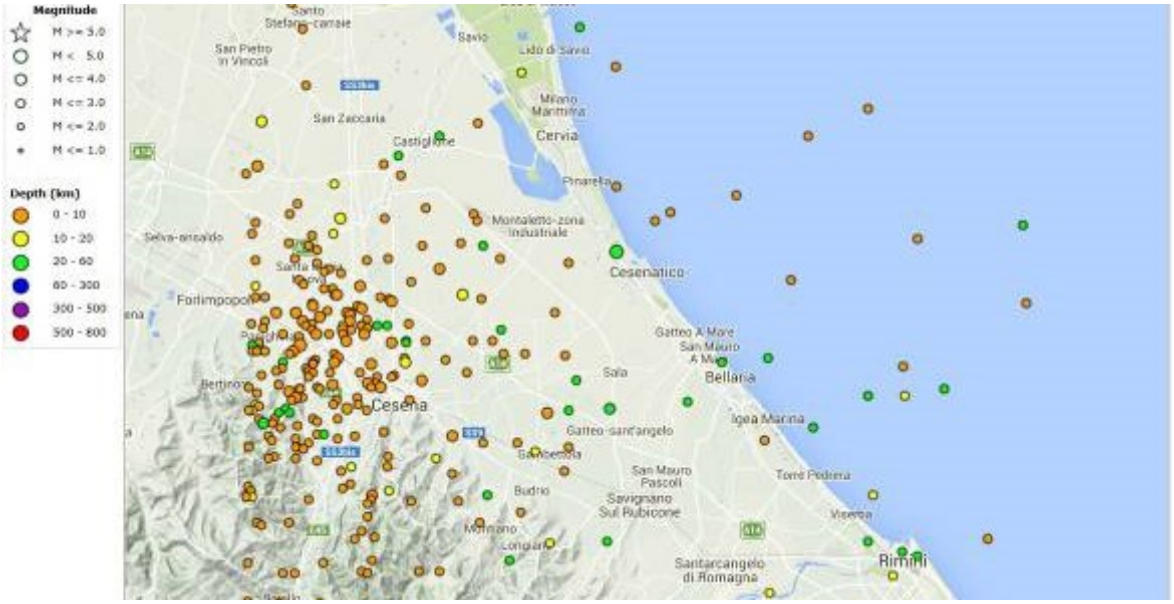


Figura n. 2.13 - Magnitudo e profondità dei sismi verificatisi nella zona di pertinenza di Cesenatico dall'inizio del 1900 ad oggi.

[8] ISIDe Italian Seismological Instrumental and parametric database: http://iside.rm.ingv.it

Dalla sezione “Effetti sull’ambiente naturale” del nuovo Catalogo CFTI5Med[9] si evince che il terremoto che colpì la Romagna sud-orientale il 7 marzo 1875 ebbe i suoi massimi effetti a Rimini, Cesenatico e Cervia.

La documentazione storica a nostra disposizione attesta che questo terremoto causò un maremoto, la fuoriuscita di acqua, sabbia o fanghi dal suolo (liquefazione), la frattura del terreno, nonché l'insorgenza di fenditure e spaccature, accompagnate da evidenti fenomeni luminosi. Si veda in proposito la figura n. 2.14.

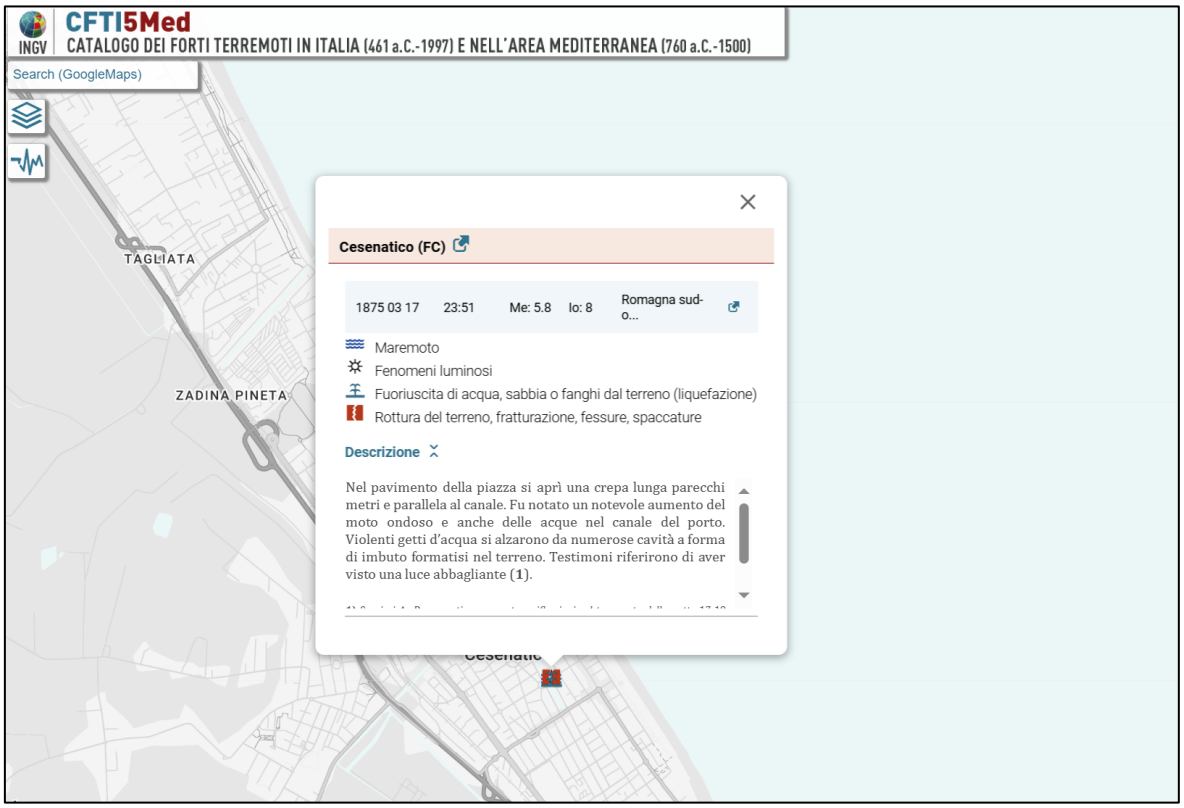


Figura n. 2.14 - Terremoto del 7 marzo 1875. Effetti sull’ambiente naturale di Cesenatico.

In particolare, la pubblicazione di Serpieri A[10] indica che “Nel pavimento della piazza si aprì una crepa lunga parecchi metri e parallela al canale. Fu notato un notevole aumento del moto ondoso e anche delle acque nel canale del porto. Violenti getti d’acqua si alzarono da numerose cavità a forma di imbuto formatisi nel terreno. Testimoni riferirono di aver visto una luce abbagliante”.

2.6. CLASSIFICAZIONE SISMICA

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

[9] Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Comastri A., Tarabusi G., Sgattoni G., Valensise G. (2018) - CFTI5Med, Catalogo dei Forti Terremoti in Italia (461 a.C.-1997) e nell’area Mediterranea (760 a.C.-1500). Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). https://doi.org/10.6092/ingv.it-cfti5
Guidoboni E., Ferrari G., Tarabusi G., Sgattoni G., Comastri A., Mariotti D., Ciuccarelli C., Bianchi M.G., Valensise G. (2019), CFTI5Med, the new release of the catalogue of strong earthquakes in Italy and in the Mediterranean area, Scientific Data 6, Article number: 80 (2019). https://doi.org/10.1038/s41597-019-0091-9

[10] Serpieri A., Documenti, nuove note e riflessioni sul terremoto della notte 17-18 marzo 1875, in "Supplemento alla Meteorologia Italiana", a.1875, fasc.4, pp.3-51. Roma

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. 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, evidente nella figura n. 2.15, il territorio comunale di Cesenatico appartiene alla zona 2.

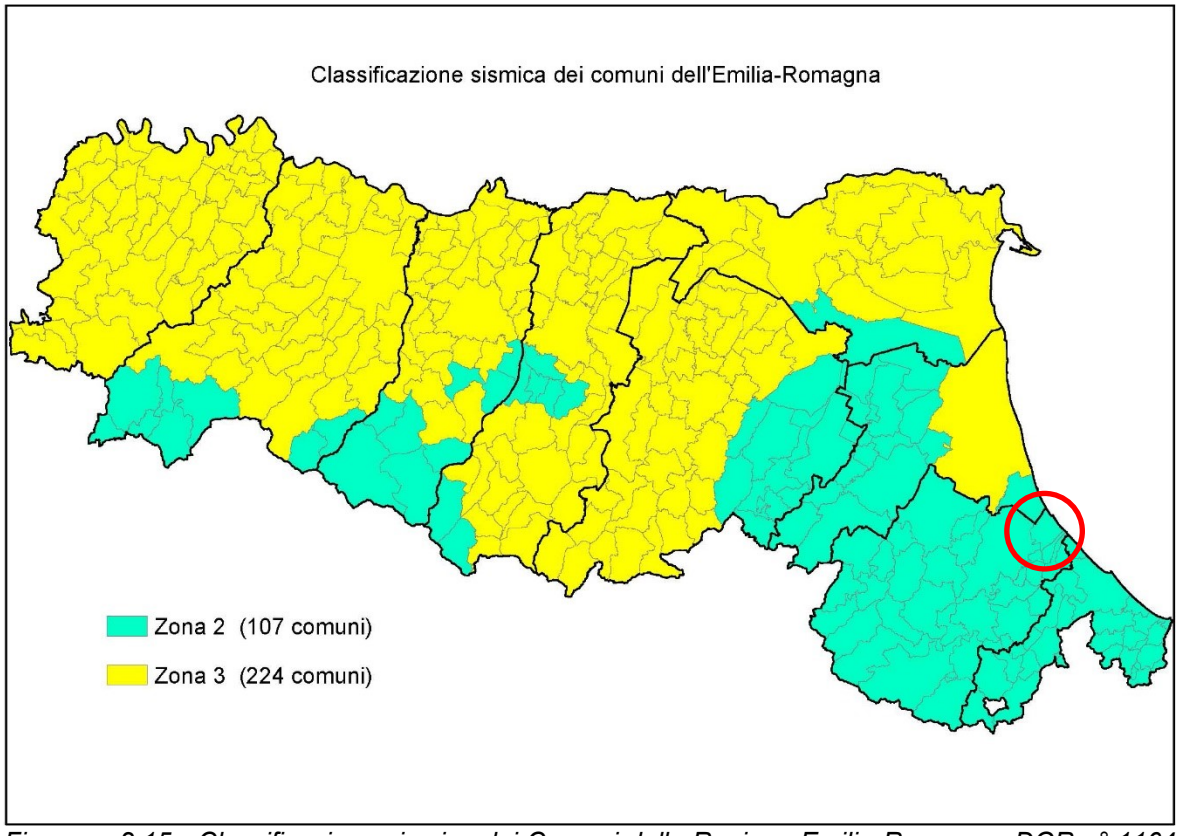


Figura n. 2.15 - Classificazione sismica dei Comuni della Regione Emilia-Romagna. DGR n° 1164 del 23.07.2018 "Aggiornamento della classificazione sismica di prima applicazione dei comuni dell'Emilia-Romagna".

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 Cesenatico, la Provincia di Forlì-Cesena, il Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli 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 1.091 dati geotecnici e geofisici acquisiti (sondaggi, pozzi per acqua ed idrocarburi, penetrometrie e prove geofisiche), 928 provengono dagli archivi degli Enti. In particolare, 728 del Comune di Cesenatico, 168 dalla Regione Emilia-Romagna e 32 dalla Provincia di Forlì-Cesena, 112 sono stati ottenuti da prove in sito effettuate nell'ambito della precedente indagine e 51 da prove aggiunte nel presente studio. Si veda in proposito la tabella n. 3.1.

TABELLA N. 3.1 - PROVE IN SITO ACQUISITE O REALIZZATE

Prova in sito	Archivio			Prove realizzate nel 2014	Prove aggiunte nel presente studio	Totale
	RER	Provincia	Comune			
Sondaggi a carotaggio continuo	14	2	36		4	**56**
Sondaggi a distruzione di nucleo			2			**2**
Sondaggi con piezometro			4			**4**
Pozzi per idrocarburi	1					**1**
Pozzi per acqua	97		31			**128**
Microtremori (HVSR)		13	110	86	12	**221**
Prove penetrometriche dinamiche pesanti (DP)			4			**4**
Prove penetrometriche dinamiche leggere (DL)		6	52			**58**
Prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU)	16		14	10	25	**65**
Prove penetrometriche statiche con punta elettrica (CPTE)			4			**4**
Prove penetrometriche statiche con punta meccanica (CPT)	40	11	441			**492**
Prove penetrometriche con cono sismico (SCPTU)					1	**1**
MASW			24	16	2	**42**
REMI			3		5	**8**
Sismica a rifrazione			3			**3**
ESAC					2	**2**
Totale	**168**	**32**	**728**	**112**	**51**	**1091**

Particolarmente fruttuosa, anche se impegnativa, si è rivelata la ricerca effettuata presso l'archivio del Comune di Cesenatico ove è stato possibile esaminare numerosissime relazioni geologiche, prodotte a corredo di progetti edilizi e di opere pubbliche, e trarre copia, con l'autorizzazione comunale, 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 Cesenatico, 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
- sondaggi a distruzione di nucleo
- sondaggi con piezometro
- pozzi per idrocarburi
- pozzi per acqua
- prove penetrometriche dinamiche pesanti (DP)
- prove penetrometriche dinamiche leggere (DL)
- 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 60 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 221, di cui appositamente eseguite in questa sede 86 (2014).
- Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW), prove complessive 42, di cui appositamente eseguite in questa sede 16 (2014).
- Refractor Microtremor (REMI), prove complessive 8, di cui nessuna eseguita in questa sede (2014).
- Sismica a rifrazione, prove complessive 3, di cui nessuna eseguita in questa sede (2014).
- ESAC, prove complessive 2, di cui nessuna eseguita in questa sede (2014).

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 velocimetri orientati, con frequenza di 0,5 Hz, operando con una frequenza di campionamento di 400 Hz (specifiche degli indirizzi e criteri della microzonazione sismica) e impiegando un digitalizzatore SR04 a 24 bit, prodotti da SARA Electronic Instruments S.r.l.

Le **indagini microsismiche MASW,** attuate nell'ambito del presente studio, sono state realizzate con un sismografo "DOREMI" della SARA Electronic Instruments S.r.l., secondo una direttrice geofonica della lunghezza di 50 metri ed utilizzando una frequenza di campionamento di 5.000 Hz e una registrazione magnetica degli eventi per un intervallo di 2000 ms.

I dati registrati sono stati poi elaborati e restituiti graficamente con le usuali procedure.

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 seguente parte della presente relazione la descrizione della situazione delle varie parti del Comune di Cesenatico, 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 Cesenatico, 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 Cesenatico (figura n. 2.3) affiora il Subsintema di Ravenna (AES_8) del Pleistocene superiore - Olocene, che rappresenta la parte sommitale del Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore e comprende terreni di pertinenza del:

1) Subsintema di Ravenna (AES_8). Depositi di tracimazioni fluviali indifferenziate e di piana alluvionale del Pleistocene superiore - Olocene;
2) Subsintema di Ravenna - Unità di Modena (AES_{8a}). Depositi di canale, argine e rotta fluviale. Piana alluvionale dell'Olocene;
3) Subsintema di Ravenna - Unità di Modena (AES_{8a}). Deposito di piana inondabile in area interfluviale e di piana alluvionale dell'Olocene;
4) Subsintema di Ravenna - Unità di Modena (AES_{8a}). Depositi di cordone litorale, di piana costiera, fronte deltizia e piana di sabbia 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 Brazzano (AES6) ecc.

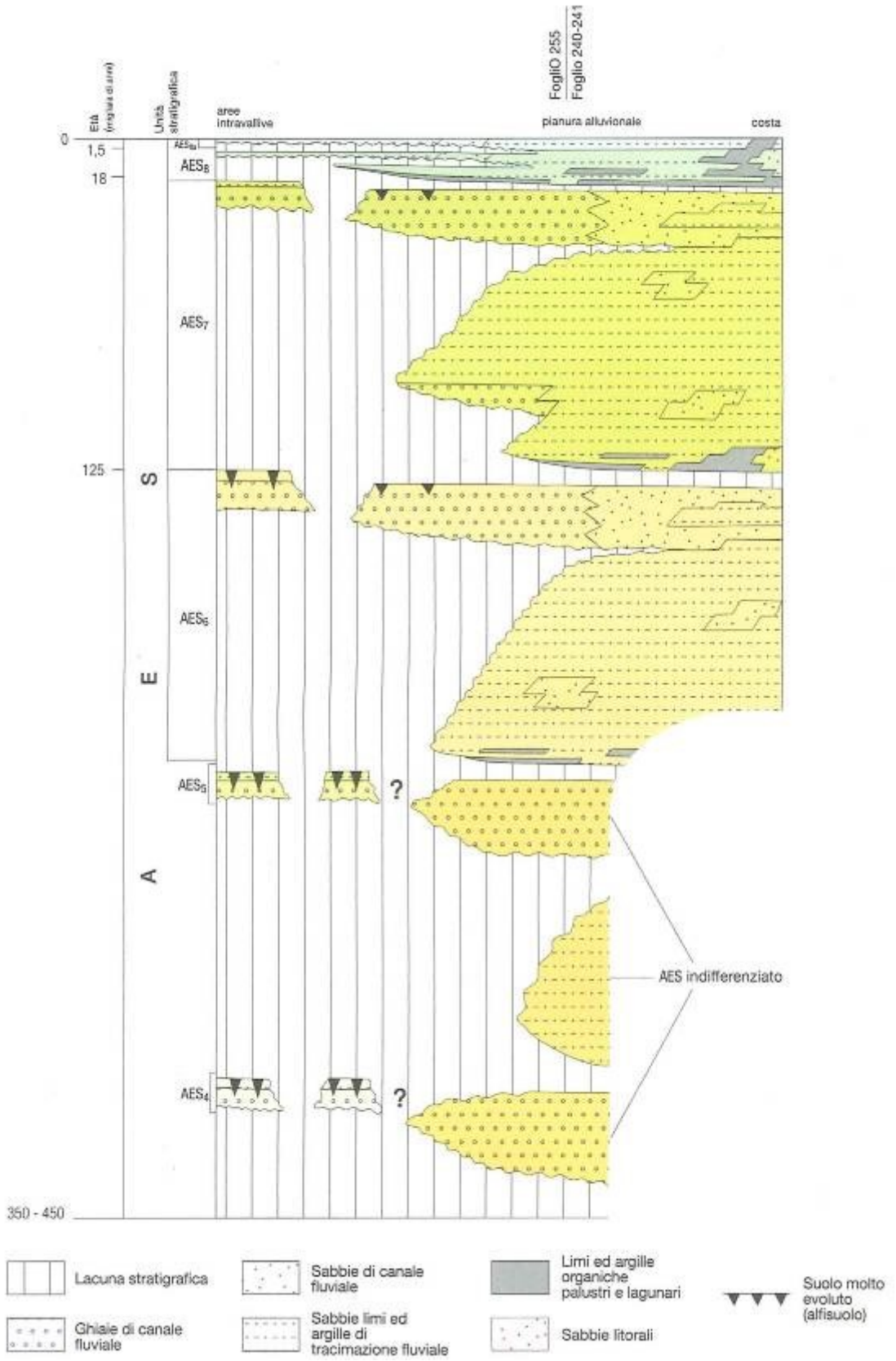


Figura n. 4.1 - Schema cronostratigrafico del sintema emiliano-romagnolo superiore (AES).

I rilievi dei microtremori, effettuati in questa sede, mostrano che nel sottosuolo del Comune di Cesenatico è generalmente presente un solo picco rappresentativo caratterizzato da una frequenza piuttosto bassa connessa a una discontinuità profonda.

Nell'assetto litostratigrafico locale il *bedrock* sismico risulta pertanto posizionabile ad una profondità dal piano di campagna decisamente superiore a 100 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).

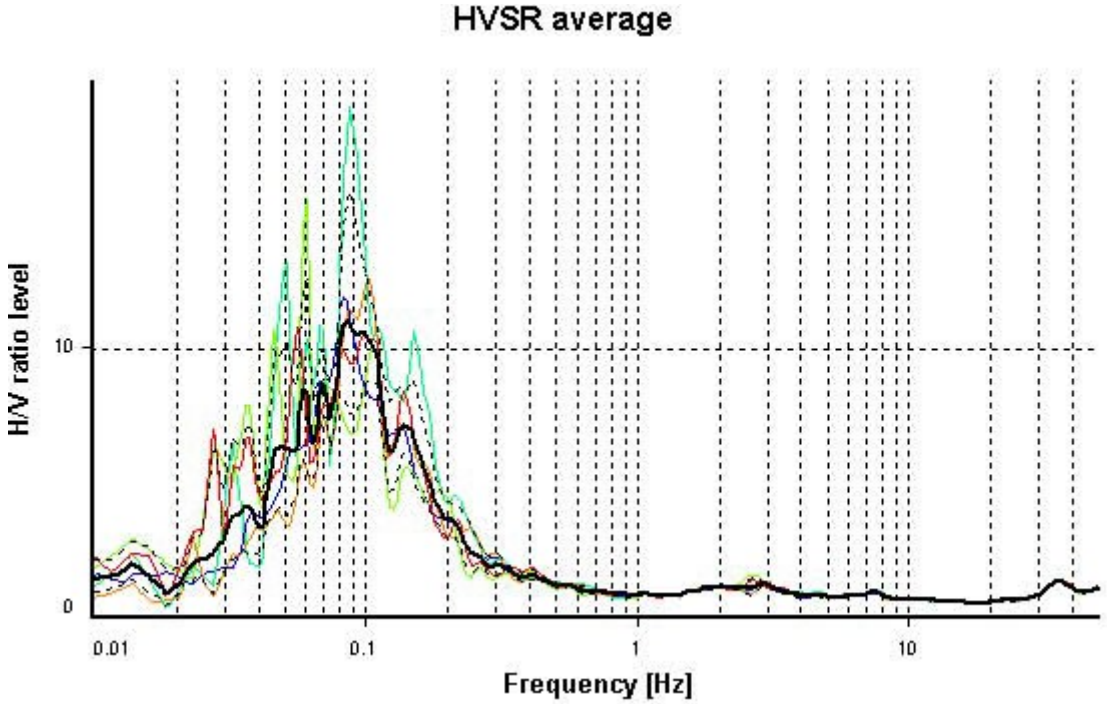


Figura n. 5.1 - Esempio di diagramma ottenuto da una prova HVSR eseguita a Cesenatico.

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 le misure 040008P964HVSR965, 040008P952HVSR953,

040008P950HVSR951, 040008P923HVSR924 e 040008P917HVSR918 non rispettano il secondo criterio.

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 soddisfano almeno 5 su 6 criteri. Solo due casi (040008P932HVSR933 e 040008P920HVSR921) non 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.

L'**indagine microsismica MASW** è stata eseguita con un sismografo "DOREMI" della SARA Electronic Instruments S.r.l. È stata utilizzata una frequenza di campionamento di 5.000 Hz e una registrazione magnetica degli eventi per un intervallo di 2000 ms. Alla strumentazione sismografica sono stati connessi sensori geofonici verticali da 4,5 Hz, posti alla distanza reciproca di 1 metro. Il rilievo è stato condotto operando energizzazioni per l'acquisizione dei dati agli estremi delle stese geofoniche della lunghezza complessiva di 50 metri, restituendo i risultati su verticali rappresentative del sito.

La tecnica di investigazione ed elaborazione MASW 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 MASW, 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, $\mathbf{V_i}$ e' la velocità delle onde S dell'orizzonte iesimo di spessore h.

I valori ottenuti sono riportati nella specifica documentazione allegata "Indagini penetrometriche e geofisiche realizzate in questo studio".

6. METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI

6.1. PRIMA FASE DEL LAVORO

Nella prima fase di lavoro, considerando l'intero territorio del Comune di Cesenatico, 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 1:5.000) -** 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 1:10.000) -** 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 (Servizio Geologico Sismico e dei Suoli 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 1:10.000) -** La carta presenta l'ubicazione dei punti ove sono state eseguite le indagini di sismica passiva (misure HVSR) con l'indicazione del valore F_0 del picco significativo, corrispondente alla frequenza di risonanza fondamentale (*frequenza principale*). A fianco di ciascuno di questi simboli è riportata la frequenza relativa al primo picco significativo (in rosso). Nel caso sia presente, è indicata anche la frequenza (in blu) di un secondo picco (*frequenza secondaria*);
- **Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (scala 1:10.000) -** 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 1:10.000. In questa carta è precisata l'ubicazione degli stendimenti per determinazioni MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), concernenti il territorio in esame, con precisato il rispettivo valore di Vs_{30}.

6.3. TERZA FASE DEL LAVORO

Nella terza ed ultima fase di lavoro si è, infine, proceduto con la riproposizione di un'analisi semplificata nelle aree sottoposte a microzonazione sismica di Livello 2 ed un'analisi approfondita per gli areali sottoposti a microzonazione sismica di Livello 3.

La microzonazione sismica di Livello 3 è stata sviluppata sulla zona di attenzione per liquefazione - Zona 2 (ZALQ1).

In questa fase è stata, pertanto, sviluppata l'analisi approfondita che ha portato alla determinazione dello spettro di risposta in superficie e dei fattori di amplificazione che hanno permesso di realizzare la verifica alla liquefazione. In questa sede sono stati prodotti i seguenti elaborati:

- Carta di microzonazione sismica - FPGA in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FA $_{0,1 - 0,5\ s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FA $_{0,4 - 0,8\ s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FA $_{0,7 - 1,1\ s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FA $_{0,5 - 1,5\ s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FH $_{0,1 - 0,5\ s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FH $_{0,5 - 1,0\ s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FH $_{0,5 - 1,5\ s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - H_{sm} in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - H $_{0,4 - 0,8\ s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - H $_{0,7 - 1,1\ s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - H $_{0,5 - 1,5\ s}$ in scala 1:10.000

7. ELABORATI CARTOGRAFICI

7.1. CARTA DELLE INDAGINI

Nella Carta delle indagini in scala 1:5.000, composta da n. 4 tavole, concernente il territorio comunale di Cesenatico è riportata l'ubicazione di tutte indagini in sito acquisite o realizzate nell'ambito della presente ricerca. Nella relativa legenda esse sono così distinte:

- Sondaggio a carotaggio continuo
- Sondaggio a distruzione di nucleo
- Sondaggio con piezometro
- Prova penetrometrica statica con punta meccanica (CPT)
- Prova penetrometrica statica con punta elettrica (CPE)
- Prova penetrometrica statica con piezocono (CPU)
- Prova penetrometrica con cono sismico (SCPU)
- Prova penetrometrica dinamica pesante (DP)
- Prova penetrometrica dinamica leggera (DL)
- Pozzo per acqua
- Pozzo per idrocarburi
- Stazione microtremore a stazione singola (HVSR)
- ESAC
- Stratigrafia zona MS (teorica)
- MASW
- Prova REfraction MIcrotremors
- Profilo sismico a rifrazione

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 1:10.000 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 Cesenatico, già descritto, ed è stato funzionale anche alla realizzazione della Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (scala 1:10.000).

Nelle figure n. 7.1, 7.2, 7.3, 7.4 e 7.5 sono riportate alcune sezioni geologiche, idonee a precisare ulteriormente il modello geologico locale, ricavate dal sito del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna. La loro individuazione è evidente nella carta geologico-tecnica in scala 1:10.000.

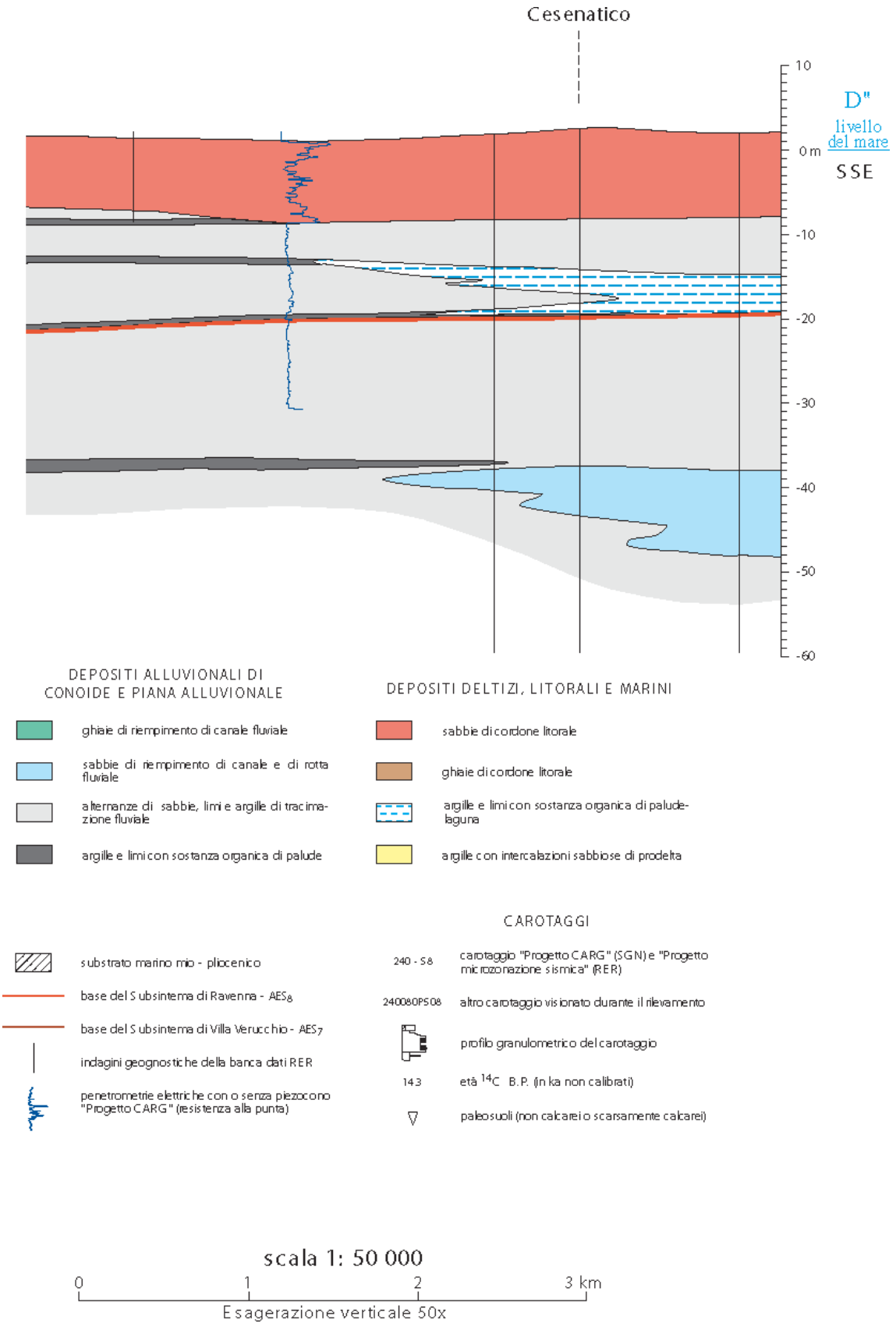


Figura n. 7.1 - Sezione 020 sviluppata parallelamente alla costa da Cesenatico verso Cervia (ID_el = 5).

SEZIONE COSTIERA

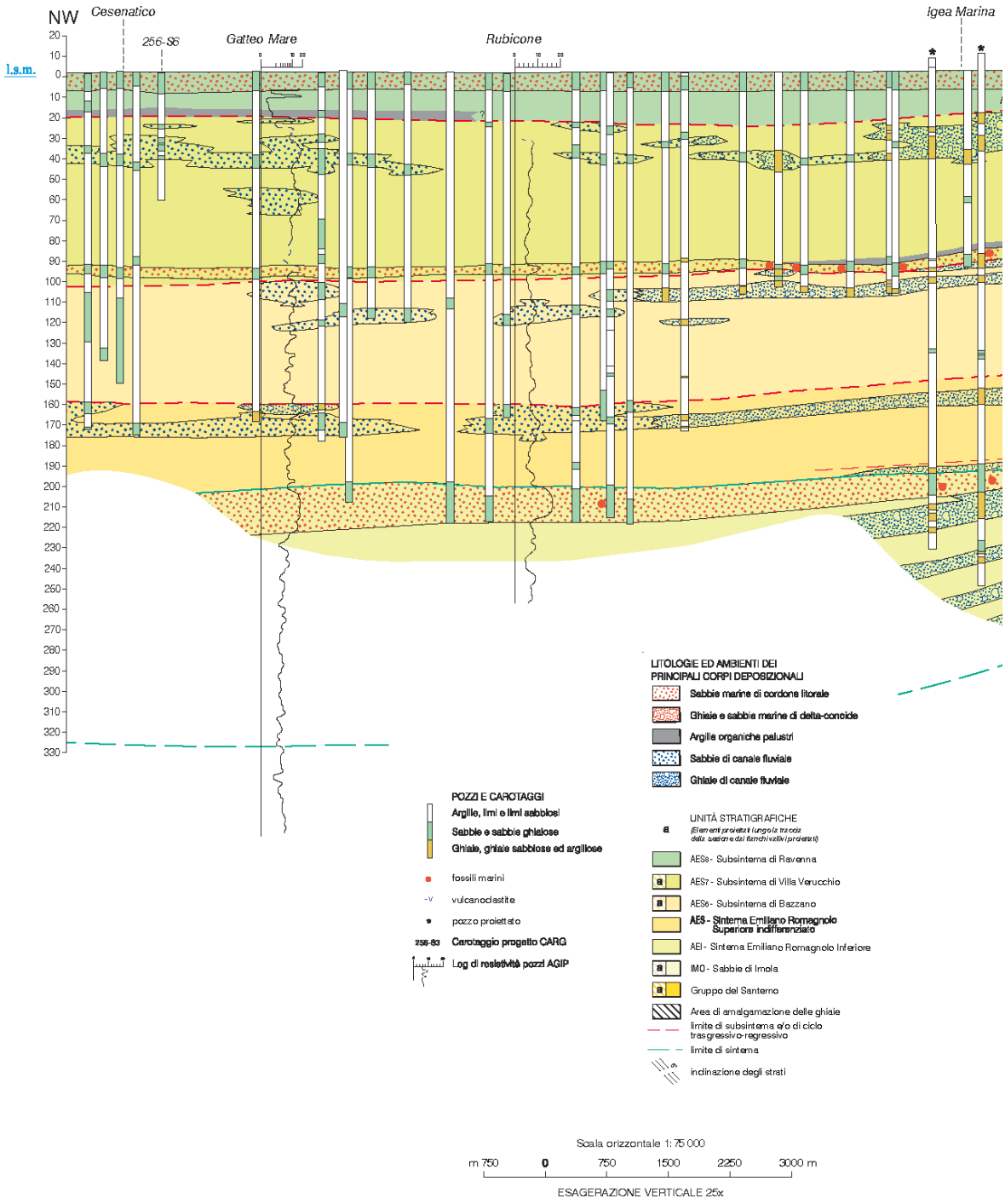


Figura n. 7.2 - Sezione 059 sviluppata parallelamente alla costa da Cesenatico verso Rimini (ID_el = 3).

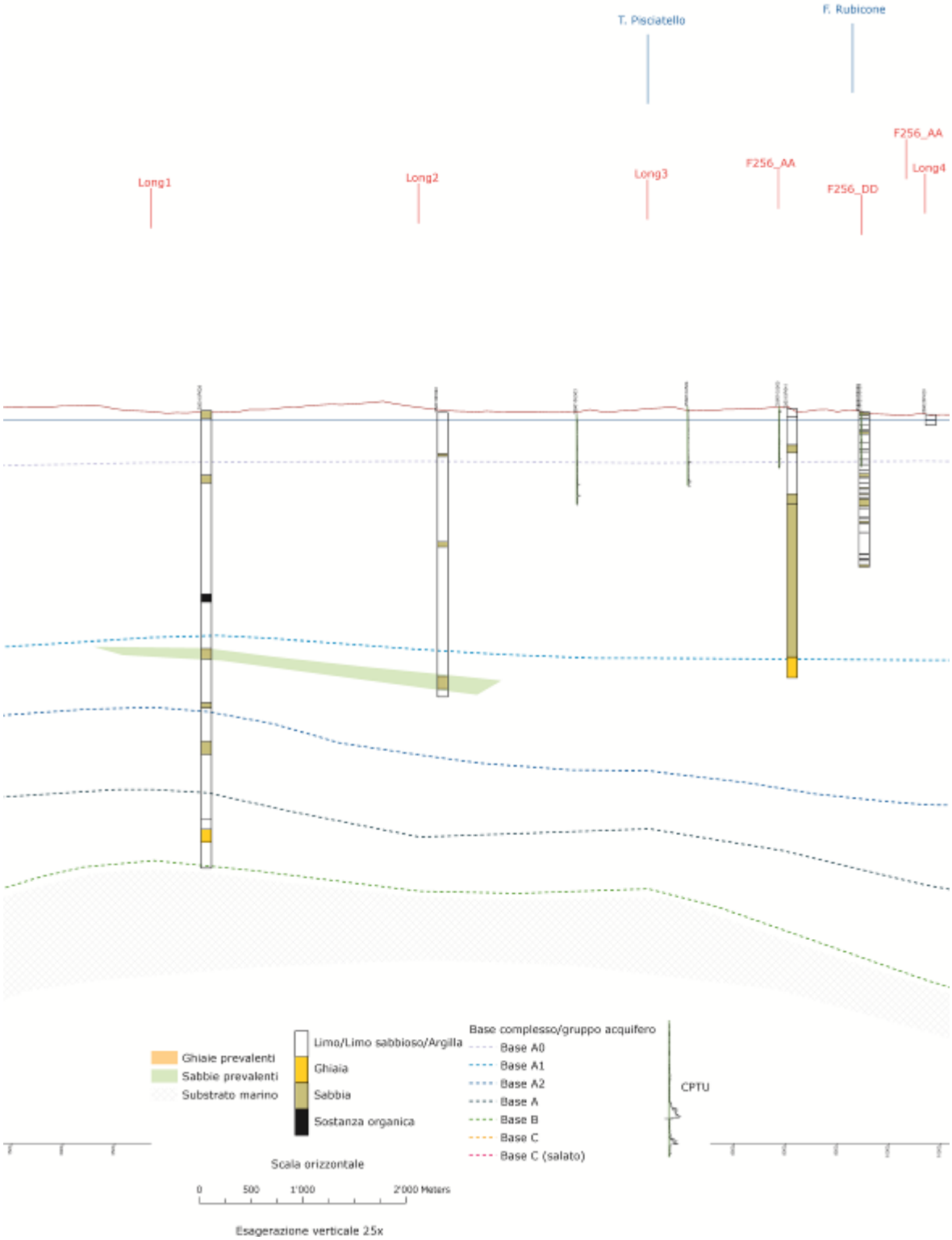


Figura n. 7.3 - Sezione 145 sviluppata parallelamente alla costa passante nei pressi di Borella (ID_el = 2).

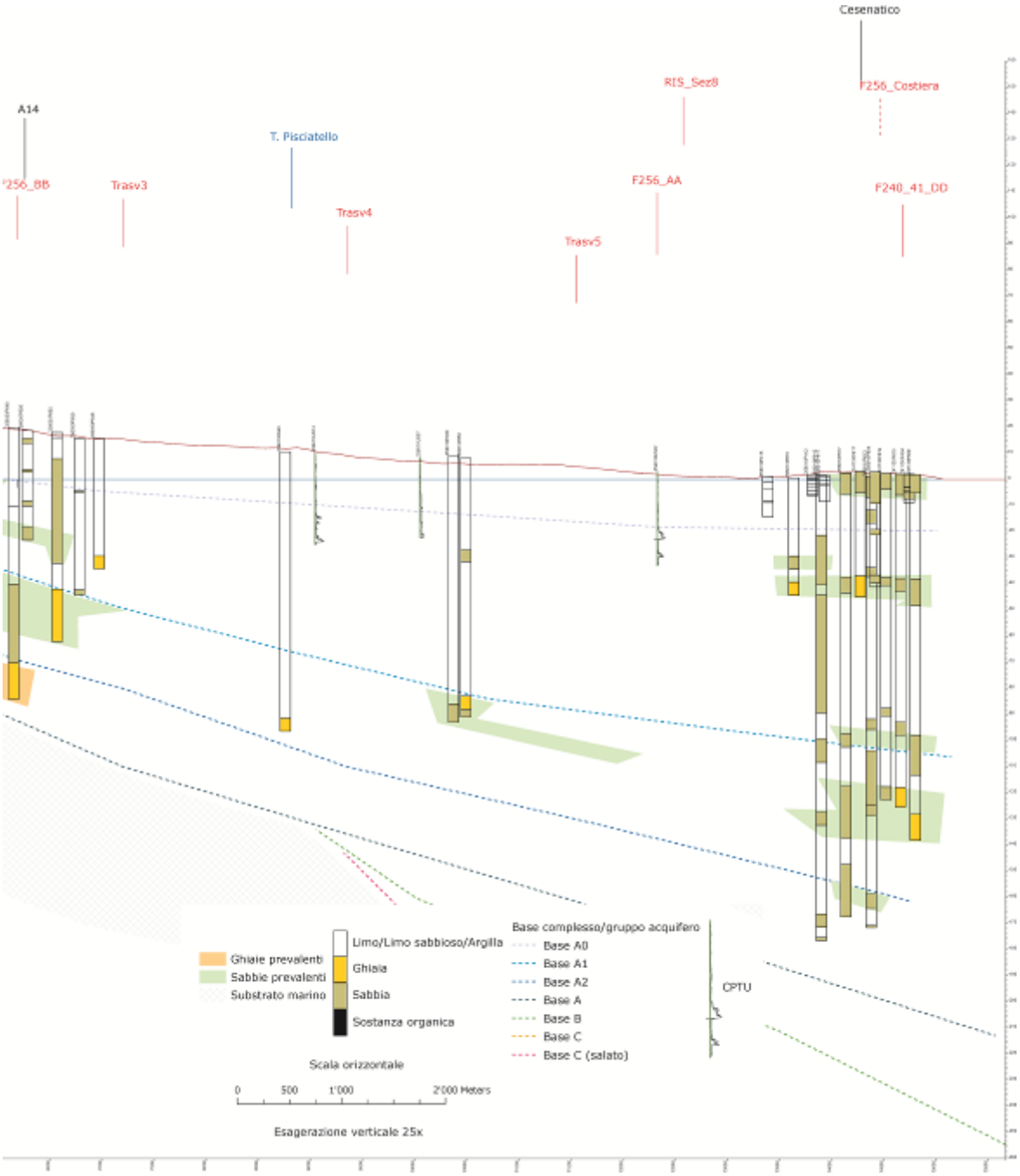


Figura n. 7.4 - Sezione 137 sviluppata perpendicolarmente alla costa passante da Cesenatico (ID_el = 1).

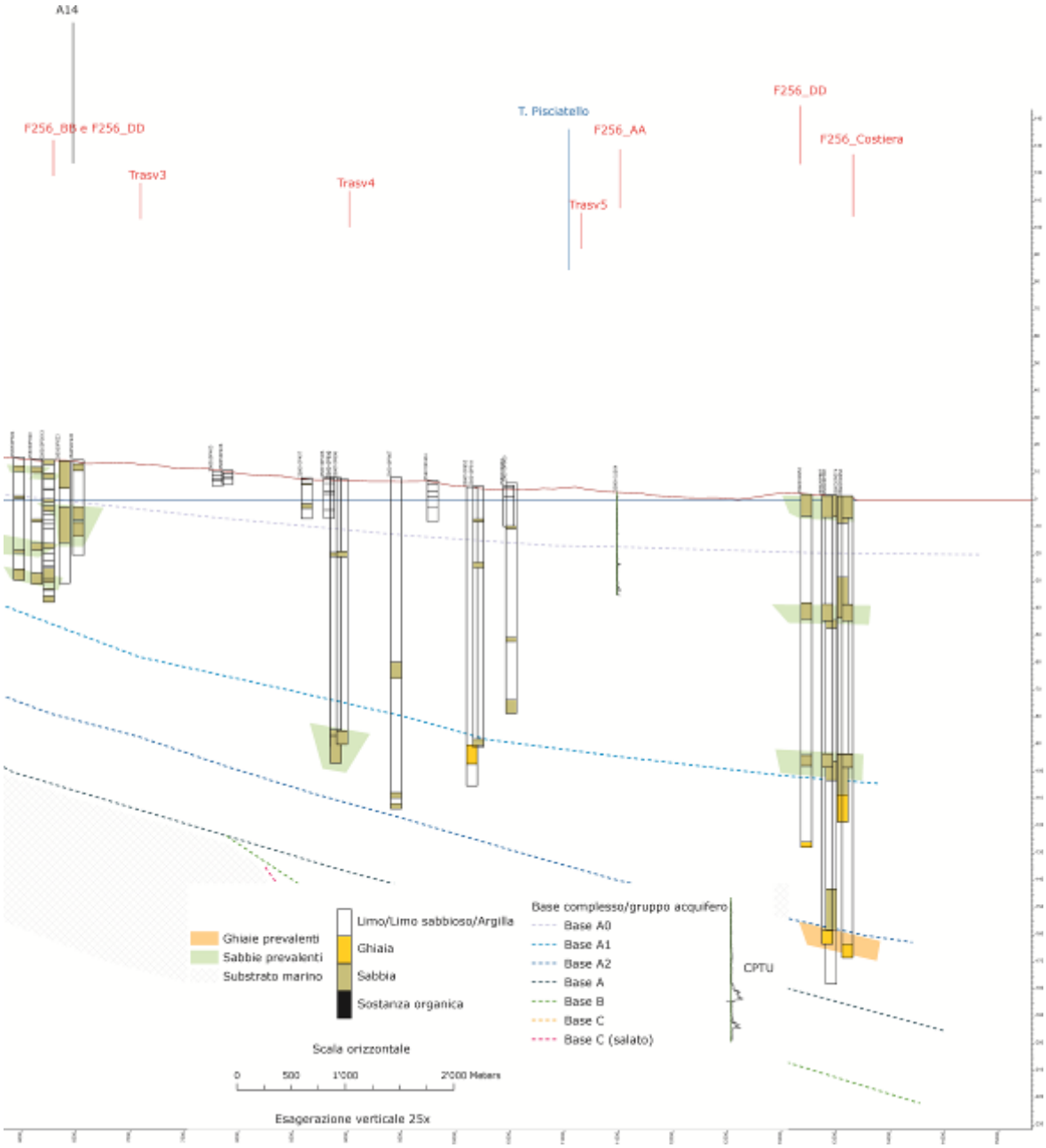


Figura n. 7.5 - Sezione 138 sviluppata perpendicolarmente alla costa passante da Valverde (ID_el = 4).

Dall'esame delle sezioni, riportate nelle figure n. 7.1, 7.2, 7.3, 7.4 e 7.5 risulta che nel sottosuolo del Comune di Cesenatico, com'è evidente in particolare nella sezione riportata nella figura n. 7.2, 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, che si accentua procedendo dal riminese verso Cesenatico. 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 Cesenatico profondità dell'ordine di 320-330 metri rispetto alla superficie. Nella zona in esame sono però meno note che nel riminese le distinzioni litologiche. Inoltre, nel riminese è certo il loro appoggio sulle Sabbie di Imola (IMO).

Con simili caratteristiche del sottosuolo, è facile comprendere come nel territorio del Comune di Cesenatico 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 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 3, sono state distinte, in base alle caratteristiche tessiturali, le seguenti unità di terreni di copertura:

- ***SMcl*** *- Sabbie limose, miscele di sabbia e limo di cordone litoraneo*: unità cartografata nel settore costiero, caratterizzato dalla presenza di depositi sabbiosi nel primo sottosuolo.
- ***SCcl*** *- Sabbie argillose, miscela di sabbia e argilla di cordone litoraneo*: unità cartografata nel settore costiero, caratterizzato dalla presenza di depositi sabbiosi nel primo sottosuolo più sottili rispetto alla precedente.
- ***CLpi*** *- Argille inorganiche di media-bassa plasticità, argille ghiaiose o sabbiose, argille limose, argille magre di piana inondabile*: unità nella quale sono state inserite tutte le aree dove, il primo sottosuolo, è costituito da depositi prevalentemente fini.

Le seguenti figure (7.6, 7.7 e 7.8) mostrano le stratigrafie tipo delle unità indicate in precedenza:

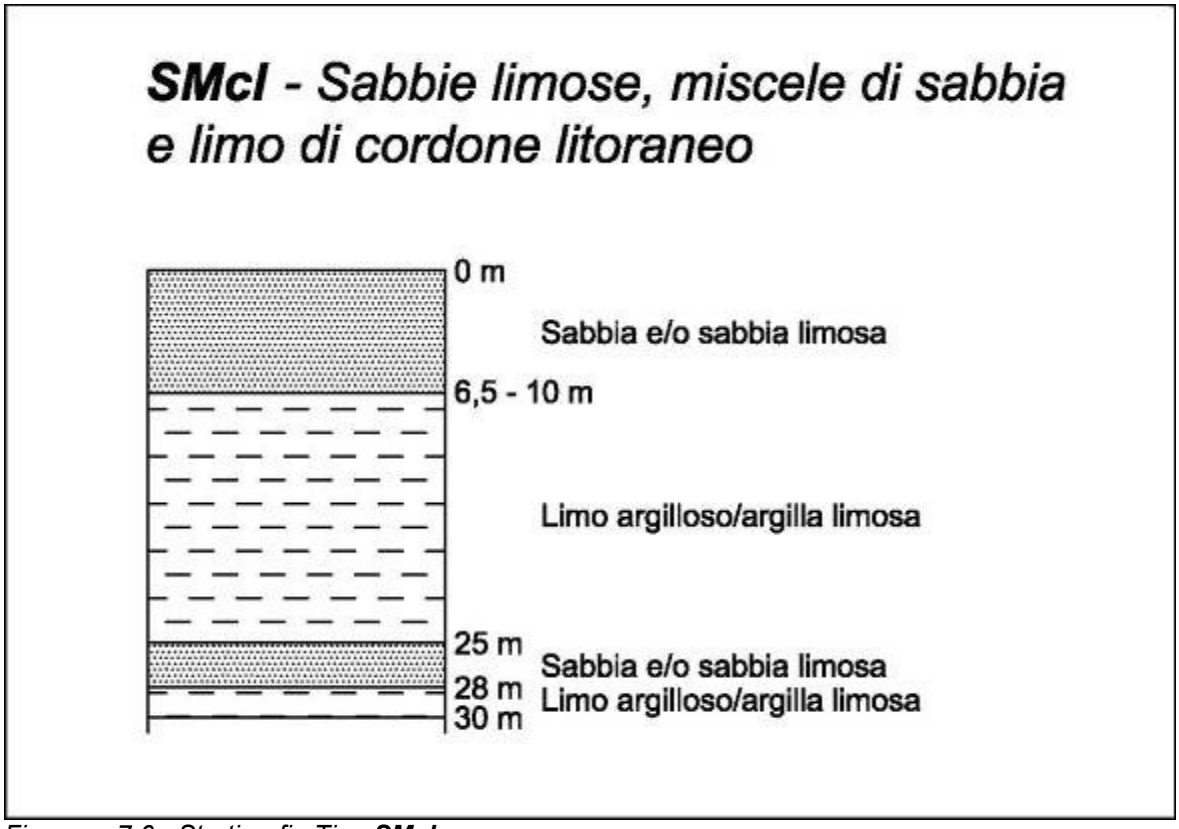


*Figura n. 7.6 - Stratigrafia Tipo **SMcl.***

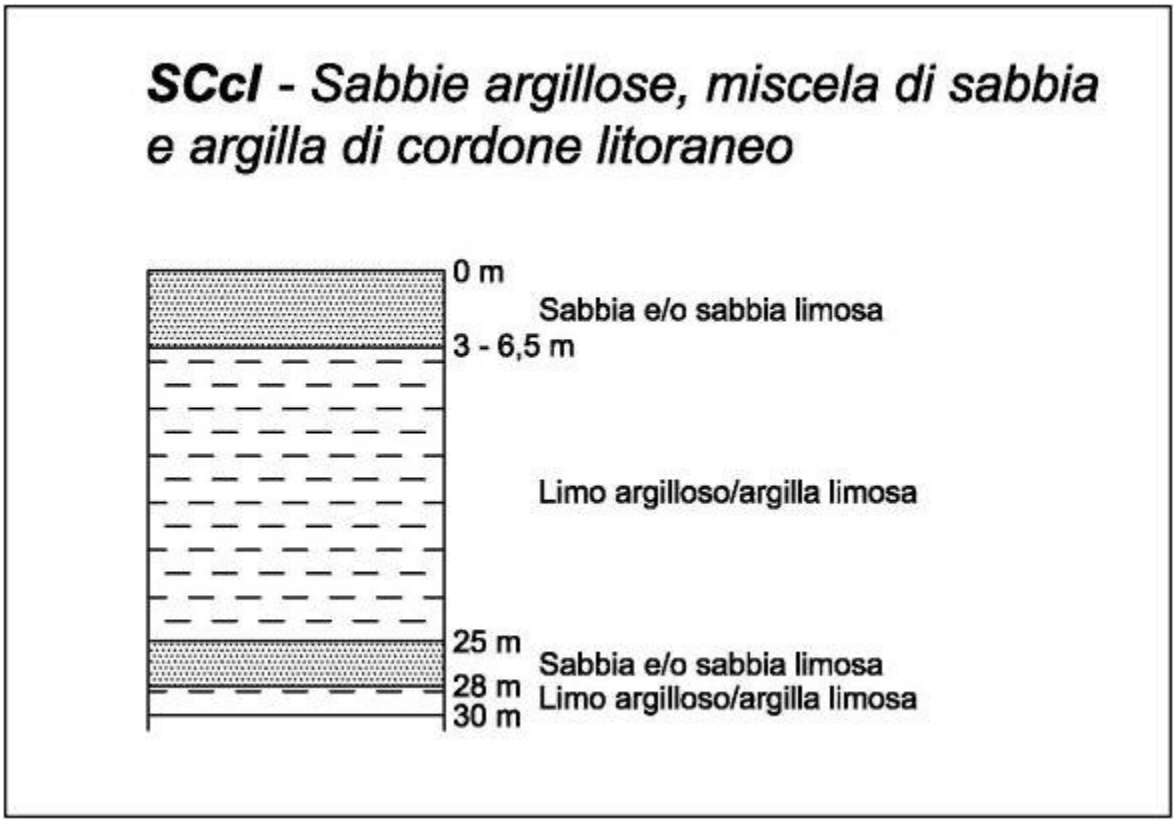


*Figura n. 7.7 - Stratigrafia Tipo **SCcl.***

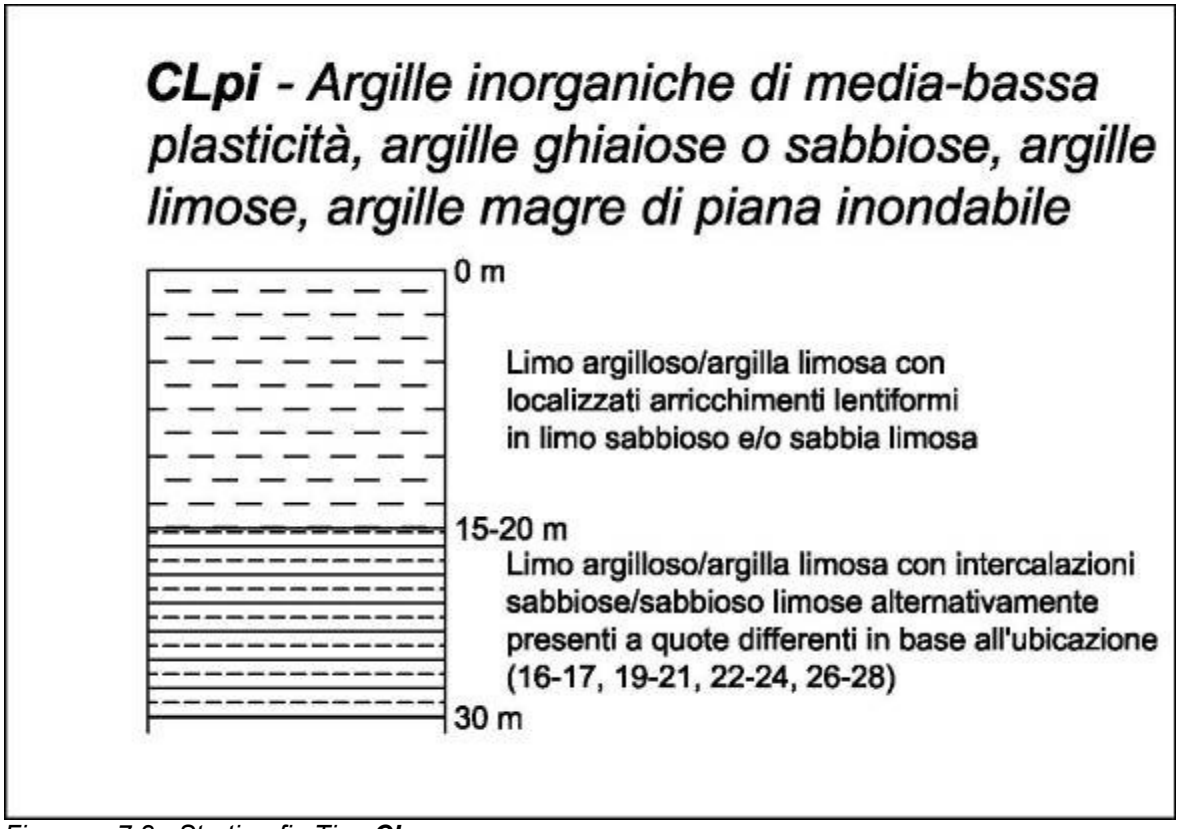


*Figura n. 7.8 - Stratigrafia Tipo **CLp**.*

Nella Carta geologico-tecnica sono indicati anche i sondaggi a carotaggio continuo che hanno raggiunto il substrato geologico (con indicazione della profondità del substrato), i sondaggi che non hanno raggiunto il substrato geologico (con indicazione della loro profondità) e, nelle aree con sabbia e/o ghiaia, il livello della prima falda desunto dalle prove in sito disponibili. 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 1:10.000, realizzata utilizzando i dati dei microtremori disponibili (di provenienza archivistica o acquisiti nell'ambito del presente studio), sono stati ubicati i 215 punti ove sono state effettuate le misure HVSR. Accanto all'indicazione di ciascuna prova è stato indicato il valore F_0 del picco significativo, corrispondente alla frequenza di risonanza fondamentale (*frequenza principale*) e, quando presente, il valore di un secondo picco significativo (*frequenza secondaria*), meno evidente del primo.

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:

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

- 2 Hz < F_0 ≤ 8 Hz
- F_0 >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 ≤ HVSR < 2
- 2 ≤ HVSR < 3
- HVSR ≥ 3

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

Poiché le 86 prove HVSR, eseguite nell'ambito di questo lavoro, coprono esaurientemente l'intero territorio in esame, com'è evidente nella figura n. 7.9, sono state realizzate con la stessa strumentazione e sono state elaborate con la stessa metodologia, è parso opportuno riferirsi ad esse per definire la specifica situazione del Comune di Cesenatico.

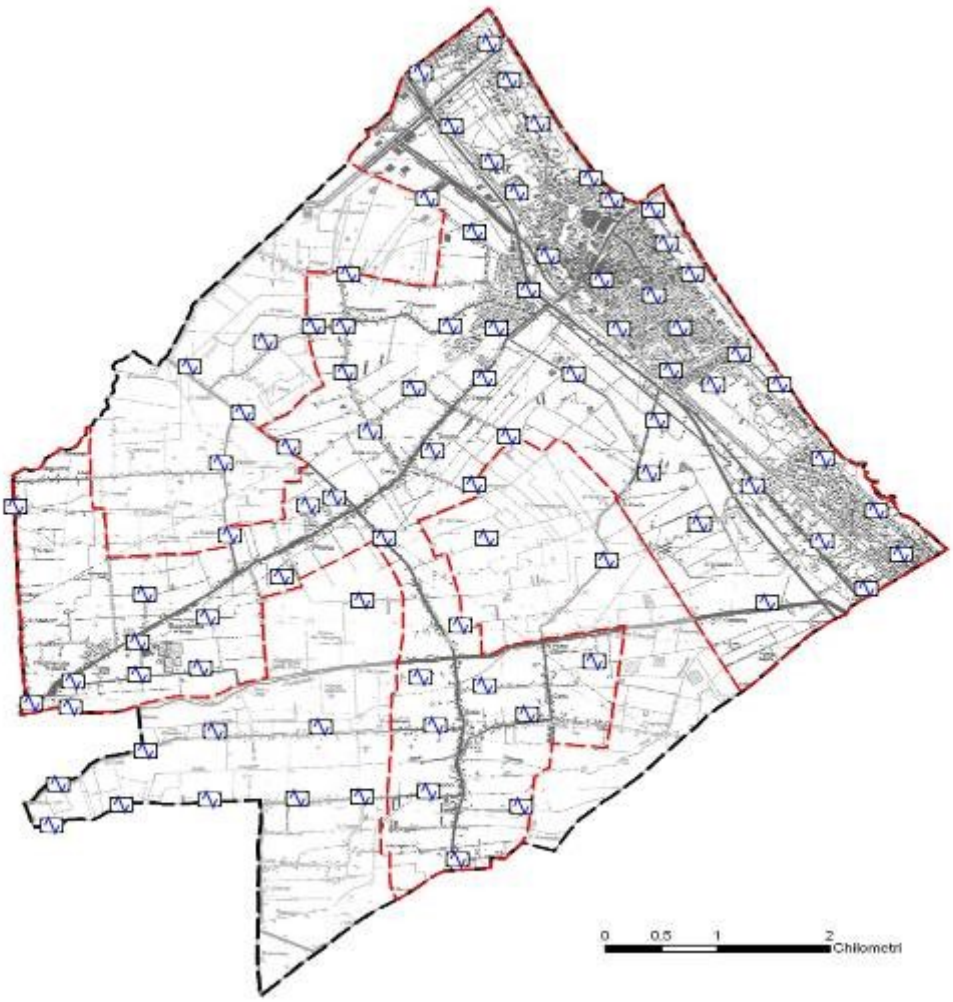


Figura n. 7.9 - Ubicazione delle prove HVSR eseguite nel territorio del Comune di Cesenatico durante l'attuazione del presente studio.

La tabella n. 7.1 fornisce il quadro riepilogativo dei risultati delle prove tromografiche, effettuate nel territorio del Comune di Cesenatico durante

l'attuazione del presente studio, specificando, per ciascuna di esse, frequenza e ampiezza del picco principale, oltre all'ubicazione e all'unità di appartenenza.

TABELLA N. 7.1 - QUADRO D'ASSIEME DELLE PROVE DEI MICROTREMORI, APPOSITAMENTE REALIZZATE NEL COMUNE DI CESENATICO NELL'AMBITO DEL PRESENTE STUDIO.

Prova	MOPS	Unità di appartenenza	Picco principale (F0)	
			Frequenza (Hz)	Ampiezza H/V maggiore di 3
040008P897	2001	Deposito alluvionale	0,090	s
040008P898	2001	Deposito alluvionale	0,154	s
040008P899	2001	Deposito alluvionale	0,141	s
040008P900	2001	Deposito alluvionale	0,123	s
040008P901	2001	Deposito alluvionale	0,134	s
040008P902	2001	Deposito alluvionale	0,126	s
040008P903	2001	Deposito alluvionale	0,146	s
040008P904	2001	Deposito alluvionale	0,123	s
040008P905	2001	Deposito alluvionale	0,126	s
040008P906	2001	Deposito alluvionale	0,146	s
040008P907	2001	Deposito alluvionale	0,119	s
040008P908	2001	Deposito alluvionale	0,130	s
040008P909	2001	Deposito alluvionale	0,158	s
040008P910	2001	Deposito alluvionale	0,137	s
040008P911	2001	Deposito alluvionale	0,134	s
040008P912	2001	Deposito alluvionale	0,123	s
040008P913	2001	Deposito alluvionale	0,137	s
040008P914	2001	Deposito alluvionale	0,141	s
040008P915	2001	Deposito alluvionale	0,158	s
040008P916	2001	Deposito alluvionale	0,123	s
040008P917	2001	Deposito alluvionale	0,109	s
040008P918	2001	Deposito alluvionale	0,146	s
040008P919	2001	Deposito alluvionale	0,092	s
040008P920	2001	Deposito alluvionale	0,123	n
040008P921	2001	Deposito alluvionale	0,116	s
040008P922	2001	Deposito alluvionale	0,154	s
040008P923	2001	Deposito alluvionale	0,109	s
040008P924	2001	Deposito alluvionale	0,193	n
040008P925	2001	Deposito alluvionale	0,146	n
040008P926	2001	Deposito alluvionale	0,150	s
040008P927	2001	Deposito alluvionale	0,134	s
040008P928	2001	Deposito alluvionale	0,193	n
040008P929	2001	Deposito alluvionale	0,154	s
040008P934	2001	Deposito alluvionale	0,137	s
040008P935	2001	Deposito alluvionale	0,154	s
040008P936	2001	Deposito alluvionale	0,098	s

040008P937	2001	Deposito alluvionale	0,116	s
040008P938	2001	Deposito alluvionale	0,137	n
040008P939	2001	Deposito alluvionale	0,150	s
040008P953	2001	Deposito alluvionale	0,150	s
040008P954	2001	Deposito alluvionale	0,130	s
040008P955	2001	Deposito alluvionale	0,109	s
040008P956	2001	Deposito alluvionale	0,137	n
040008P959	2001	Deposito alluvionale	0,173	s
040008P960	2001	Deposito alluvionale	0,123	s
040008P962	2001	Deposito alluvionale	0,146	s
040008P967	2001	Deposito alluvionale	0,098	s
040008P968	2001	Deposito alluvionale	0,082	s
040008P969	2001	Deposito alluvionale	0,098	s
040008P970	2001	Deposito alluvionale	0,126	s
040008P971	2001	Deposito alluvionale	0,158	s
040008P972	2001	Deposito alluvionale	0,146	n
040008P973	2001	Deposito alluvionale	0,060	n
040008P974	2001	Deposito alluvionale	0,103	s
040008P975	2001	Deposito alluvionale	0,146	n
040008P976	2001	Deposito alluvionale	0,150	s
040008P977	2001	Deposito alluvionale	0,130	s
040008P978	2001	Deposito alluvionale	0,109	s
040008P979	2001	Deposito alluvionale	0,137	s
040008P980	2001	Deposito alluvionale	0,130	s
040008P981	2001	Deposito alluvionale	0,146	n
040008P982	2001	Deposito alluvionale	0,173	n
040008P930	3050	Cordone Sabbioso del litorale	0,178	n
040008P931	3050	Cordone Sabbioso del litorale	0,154	s
040008P932	3050	Cordone Sabbioso del litorale	0,178	s
040008P933	3050	Cordone Sabbioso del litorale	0,297	n
040008P940	3050	Cordone Sabbioso del litorale	0,098	s
040008P941	3050	Cordone Sabbioso del litorale	0,098	s
040008P942	3050	Cordone Sabbioso del litorale	0,158	s
040008P943	3050	Cordone Sabbioso del litorale	0,119	s
040008P944	3050	Cordone Sabbioso del litorale	0,098	s
040008P945	3050	Cordone Sabbioso del litorale	0,082	s
040008P946	3050	Cordone Sabbioso del litorale	0,098	s
040008P947	3050	Cordone Sabbioso del litorale	0,126	s
040008P948	3050	Cordone Sabbioso del litorale	0,158	n
040008P949	3050	Cordone Sabbioso del litorale	0,146	s
040008P950	3050	Cordone Sabbioso del litorale	0,060	s
040008P951	3050	Cordone Sabbioso del litorale	0,103	s
040008P952	3050	Cordone Sabbioso del litorale	0,146	s

040008P957	3050	Cordone Sabbioso del litorale	0,130	s
040008P958	3050	Cordone Sabbioso del litorale	0,146	s
040008P961	3050	Cordone Sabbioso del litorale	0,095	s
040008P963	3050	Cordone Sabbioso del litorale	0,130	s
040008P964	3050	Cordone Sabbioso del litorale	0,134	s
040008P965	3050	Cordone Sabbioso del litorale	0,158	s
040008P966	3050	Cordone Sabbioso del litorale	0,119	s

I dati indicati nella tabella precedente sono stati utilizzati per ottenere il grafico riportato nella figura n. 7.10.

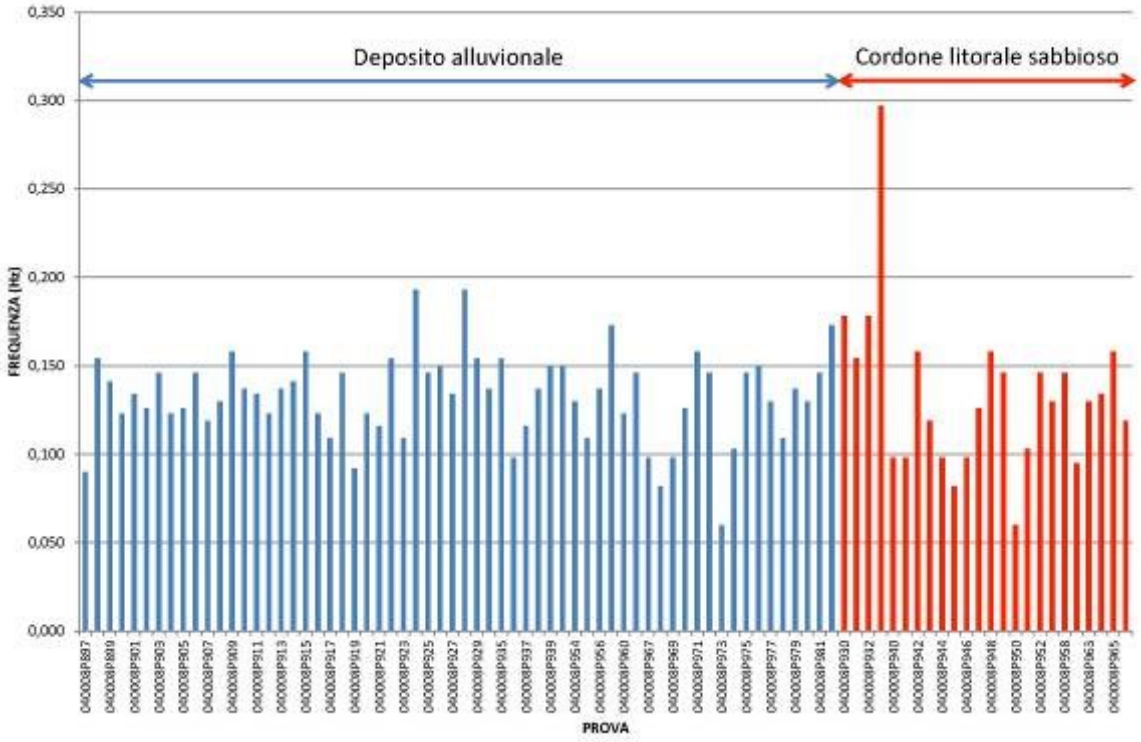


Figura n. 7.10 - Picchi principali (F_0) dei microtremori rilevati nel presente studio.

I risultati dell'elaborazione statistica dei valori dei picchi principali (F_0) rilevati nel presente studio nel territorio comunale di Cesenatico sono compendiati nella tabella n. 7.2. Ne deriva che i terreni locali presentano una significativa omogeneità dei valori di frequenza nei picchi principali (F_0) rilevati.

TABELLA N. 7.2 - DATI STATISTICI RELATIVI AI PICCHI PRINCIPALI (F_0) DEI MICROTREMORI RILEVATI

Frequenza (Hz)	Tutti i dati rilevati	Cordone sabbioso del litorale (zona 3050)	Deposito alluvionale (zona 2001)
Media	0,13	0,13	0,13
Minima	0,06	0,06	0,06
Massima	0,30	0,30	0,19
Deviazione Standard	0,03	0,05	0,02

7.4. CARTA DELLE MICROZONE OMOGENEE IN PROSPETTIVA SISMICA

La Carta delle Microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS) in scala 1:10.000 del Comune di Cesenatico 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 Cesenatico, 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 - successione stratigrafica costituita da prevalenti depositi fini costituiti da miscele di limi e argille, con subordinate intercalazioni di livelli sabbiosi e sabbioso limosi*. Questa microzona omogenea è dotata di un proprio profilo stratigrafico tipo, riferito ai primi 30 metri di sottosuolo (figura n. 7.11).

Alle zone di attenzione per l'instabilità, corrispondenti all'area interessata dal Cordone sabbioso del litorale, è stato attribuito il codice 3050, *ZALQ1 - zona di attenzione per liquefazione tipo 1*. È una successione stratigrafica costituita da depositi sabbiosi, presenti fino a profondità variabili da -3,00 a -10,00 metri dal piano di campagna, sovrastanti depositi fini costituiti da miscele di limi e argille, con subordinate intercalazioni di livelli sabbiosi e sabbioso limosi. Questa microzona omogenea è dotata di un proprio profilo stratigrafico tipo, riferito ai primi 30 metri di sottosuolo (figura n. 7.12).

Nella Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica sono rappresentati anche i punti di misura del rumore ambientale, con l'indicazione del valore F_0 e l'asse di paleoalveo.

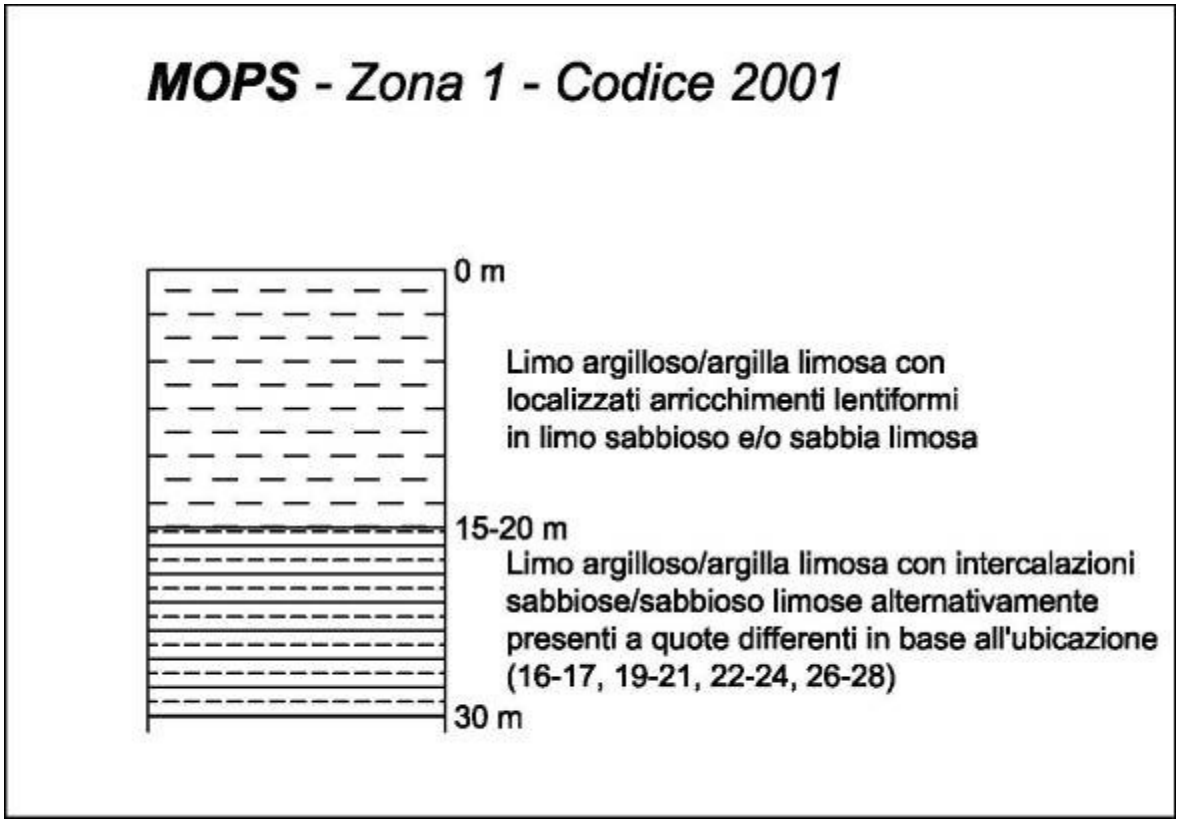


Figura n. 7.11 - Colonna stratigrafica sintetica rappresentante la MOPS: ZONA 1 Cod. 2001.

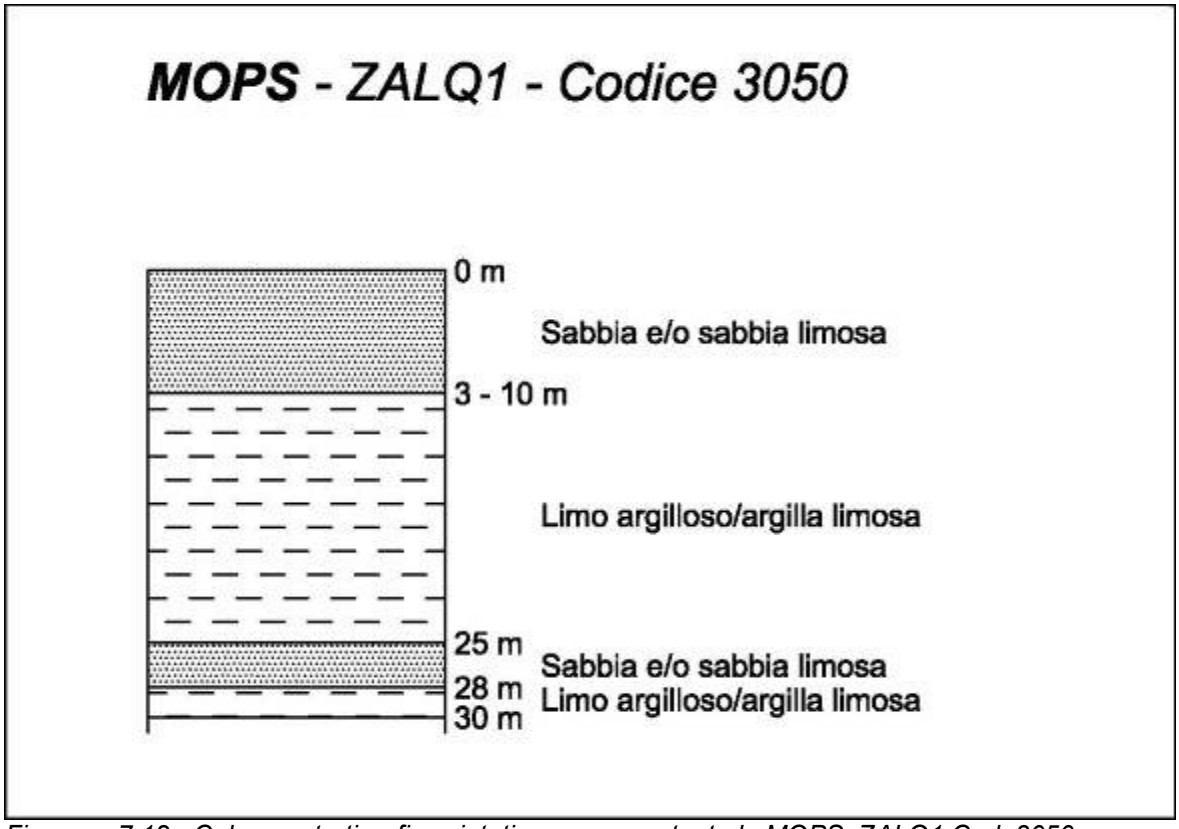


Figura n. 7.12 - Colonna stratigrafica sintetica rappresentante la MOPS: ZALQ1 Cod. 3050.

7.5. CARTA DELLE VELOCITÀ DELLE ONDE DI TAGLIO S

Nella Carta delle Vs in scala 1:10.000 del Comune di Cesenatico è precisata l'ubicazione degli stendimenti per determinazioni MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), disponibili presso l'archivio comunale (n. 24) o appositamente eseguite nell'ambito della presente ricerca (n. 16). Queste ultime sono state concentrate nella zona litoranea suscettibile di instabilità.

Accanto a ciascun stendimento 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}).

La tabella n. 7.3 fornisce il quadro riepilogativo delle misure di velocità delle onde di taglio S a Cesenatico, indicando, oltre al valore di Vs_{30}, la loro ubicazione e unità di appartenenza.

TABELLA N. 7.3 - QUADRO D'ASSIEME DEI VALORI Vs_{30} RISCONTRATI NEL COMUNE DI CESENATICO

Prova	MOPS	**Unità di appartenenza**	**Vs30 (m/s)**
040008L1MASW1VS1	3050	Cordone Sabbioso del litorale	195,0
040008L2MASW2VS2	3050	Cordone Sabbioso del litorale	279,0
040008L3MASW3VS3	3050	Cordone Sabbioso del litorale	342,0
040008L4MASW6VS4	2001	Deposito alluvionale	173,0
040008L5MASW8VS5	3050	Cordone Sabbioso del litorale	250,0
040008L6MASW9VS6	3050	Cordone Sabbioso del litorale	202,0
040008L7MASW10VS7	3050	Cordone Sabbioso del litorale	202,0

040008L8MASW11VS8	3050	Cordone Sabbioso del litorale	263,0
040008L9MASW12VS9	3050	Cordone Sabbioso del litorale	272,0
040008L10MASW13VS10	2001	Deposito alluvionale	211,5
040008L11MASW14VS11	2001	Deposito alluvionale	180,0
040008L12MASW15VS12	2001	Deposito alluvionale	174,5
040008L13MASW16VS13	3050	Cordone Sabbioso del litorale	188,5
040008L14MASW17VS14	3050	Cordone Sabbioso del litorale	182,5
040008L15MASW18VS15	3050	Cordone Sabbioso del litorale	191,5
040008L16MASW19VS16	3050	Cordone Sabbioso del litorale	188,0
040008L17MASW20VS17	3050	Cordone Sabbioso del litorale	189,0
040008L18MASW21VS18	3050	Cordone Sabbioso del litorale	184,0
040008L19MASW22VS19	3050	Cordone Sabbioso del litorale	190,0
040008L20MASW23VS20	3050	Cordone Sabbioso del litorale	194,5
040008L21MASW24VS21	3050	Cordone Sabbioso del litorale	190,0
040008L22MASW25VS22	3050	Cordone Sabbioso del litorale	188,5
040008L23MASW26VS23	3050	Cordone Sabbioso del litorale	192,5
040008L24MASW27VS24	3050	Cordone Sabbioso del litorale	219,0
040008L15REMI28VS25	3050	Cordone Sabbioso del litorale	184,0
040008L17REMI30VS26	3050	Cordone Sabbioso del litorale	192,0
040008L16REMI29VS27	3050	Cordone Sabbioso del litorale	183,0
040008L25MASW31VS28	3050	Cordone Sabbioso del litorale	171,0
040008L26MASW32VS29	3050	Cordone Sabbioso del litorale	201,0
040008L27MASW33VS30	3050	Cordone Sabbioso del litorale	178,0
040008L28MASW34VS31	3050	Cordone Sabbioso del litorale	181,0
040008L29MASW35VS32	3050	Cordone Sabbioso del litorale	207,0
040008L30MASW36VS33	3050	Cordone Sabbioso del litorale	199,0
040008L31MASW37VS34	3050	Cordone Sabbioso del litorale	176,0
040008L32MASW38VS35	3050	Cordone Sabbioso del litorale	190,0
040008L33MASW39VS36	3050	Cordone Sabbioso del litorale	175,0
040008L34MASW40VS37	2001	Deposito alluvionale	186,0
040008L35MASW41VS38	3050	Cordone Sabbioso del litorale	194,0
040008L36MASW42VS39	3050	Cordone Sabbioso del litorale	205,0
040008L37MASW43VS40	3050	Cordone Sabbioso del litorale	236,0
040008L38MASW44VS41	3050	Cordone Sabbioso del litorale	211,0
040008L39MASW45VS42	3050	Cordone Sabbioso del litorale	187,0
040008L40MASW46VS43	3050	Cordone Sabbioso del litorale	192,0

L'andamento di questi dati è ulteriormente evidenziato dalla figura n. 7.13.

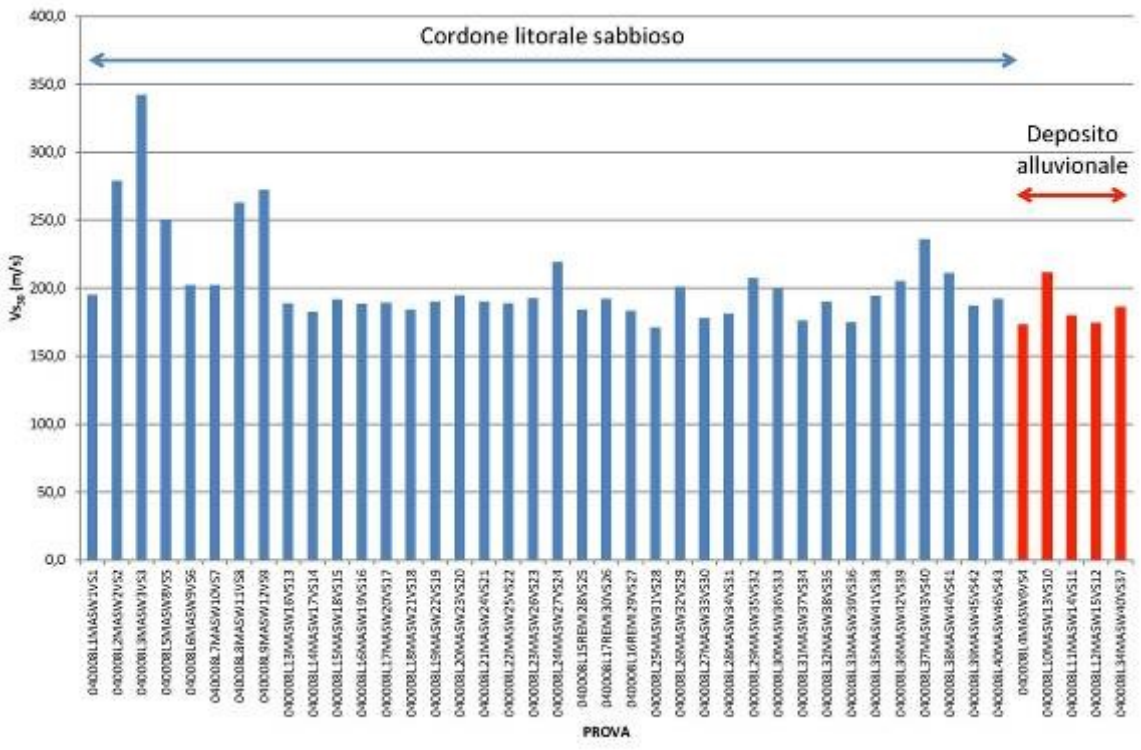


Figura n. 7.13 - Grafico dei valori Vs_{30} riscontrati a Cesenatico.

I risultati dell'elaborazione statistica dei valori di Vs_{30} disponibili nel territorio comunale di Cesenatico dal precedente studio di III livello sono compendiati nella tabella n. 7.4. Ne deriva che i terreni locali presentano una significativa omogeneità dei valori delle velocità delle onde S nei primi 30 metri di profondità.

TABELLA N. 7.4 - DATI STATISTICI RELATIVI AI VALORI Vs_{30} RISCONTRATI NEL COMUNE DI CESENATICO NEL PRECEDENTE STUDIO DI III LIVELLO

Vs_{30} (m/s)	Tutti i dati comunali	Cordone sabbioso del litorale (3050)	Deposito alluvionale (2001)
Media	202,09	204,34	185,00
Minima	171,00	171,00	173,00
Massima	342,00	342,00	211,50
Deviazione Standard	33,52	34,70	15,67

La tabella n. 7.5 riporta valori di Vs_{30} aggiunti nel presente studio. Anche questi dati si collocano perfettamente nella distribuzione dei valori evidenziata dalla precedente analisi.

TABELLA N. 7.5 - VALORI Vs_{30} AGGIUNTI NEL PRESENTE STUDIO DI III LIVELLO

Prova	MOPS	**Unità di appartenenza**	**Vs30 (m/s)**
040008L41REMI47	3050	Cordone Sabbioso del litorale	203
040008L41MASW48	3050	Cordone Sabbioso del litorale	204
040008L42MASW49	3050	Cordone Sabbioso del litorale	211
040008L43REMI50	3050	Cordone Sabbioso del litorale	208

Prova	MOPS	Unità di appartenenza	Vs30 (m/s)
040008L44REMI51	3050	Cordone Sabbioso del litorale	189
040008L45REMI52	3050	Cordone Sabbioso del litorale	192
040008L46REMI53	3050	Cordone Sabbioso del litorale	215

7.6. CARTE DI MICROZONAZIONE SISMICA

Nelle seguenti tavole, conclusive del presente studio:

- Carta di microzonazione sismica - FPGA in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FA $_{0,1 - 0,5\ s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FA $_{0,4 - 0,8\ s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FA $_{0,7 - 1,1\ s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FA $_{0,5 - 1,5\ s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FH $_{0,1 - 0,5\ s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FH $_{0,5 - 1,0\ s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FH $_{0,5 - 1,5\ s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - H_{sm} in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - H $_{0,4 - 0,8\ s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - H $_{0,7 - 1,1\ s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - H $_{0,5 - 1,5\ s}$ in scala 1:10.000

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.

Nelle zone stabili suscettibili di amplificazioni locali (livello 2) viene raffigurata la stima dell'amplificazione effettuata tramite procedure semplificate (utilizzo di abachi e formule), possibile laddove l'assetto geologico è assimilabile ad un modello fisico monodimensionale.

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≤T≤0,5s, SA2 per 0,4s≤T≤0,8s, SA3 per 0,7s≤T≤1,1s, SA4 per 0,5s≤T≤1,5s;
- FH = SI/SI_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 scelta dell'abaco per la stima è stata effettuata sulla base delle caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo, in particolare della profondità del substrato rigido che, nel Comune di Cesenatico, è stata assunta superiore a 300 metri.

In particolare, per Zona 2001 i fattori di amplificazione sono stati determinati utilizzando la tabella Pianura 3, con riferimento alla classe Vs30 = 200 m/s riportata nella figura n. 7.14.

Vs_{30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400
PGA	1,3	1,3	1,3			

Fattore di Amplificazione **PGA**

Vs_{30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400
SA1	1,3	1,3	1,3			
SA2	2,1	2,1	2,0			
SA3	2,5	2,5	2,4			
SA4	2,4	2,4	2,3			

Fattori di Amplificazione **SA1** (0,1s≤T≤0,5s), **SA2** (0,4s≤T≤0,8s), **SA3** (0,7s≤T≤1,1s), **SA4** (0,5s≤T≤1,5s)

Vs_{30} (m/s) →	150	200	250	300	350	400
SI1	1,5	1,5	1,5			
SI2	2,3	2,3	2,2			
SI3	2,6	2,6	2,4			

Fattori di Amplificazione **SI1** (0,1s≤T≤0,5s), **SI2** (0,5s≤T≤1,0s), **SI3** (0,5s≤T≤1,5s)

Figura n. 7.14 - Tabella tratta dall'Allegato 2 della DGR 476/2021.

Par la Zona 2002, i valori dei fattori di Amplificazione sono stati calcolati attraverso un'analisi di Risposta Sismica Locale evidente nel capitolo successivo. La tabella n. 7.6 riporta la sintesi dei Fattori di Amplificazione delle varie microzone.

TABELLA N. 7.6 - 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	1,3	1,3	2,1	2,5	2,4	1,5	2,3	2,6	
INSTAB	2002	1,22	1,14	2,47	2,96	2,87	0,94	2,62	2,72	Liquefazione

8. ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE

8.1. AREA CONSIDERATA

Gli approfondimenti di terzo livello sono stati eseguiti sull'area interessata dalle sabbie di cordone litorale di pertinenza dell'Unità di Modena (AES8a), estese a fascia lungo la linea di costa del Comune di Cesenatico. Si tratta dell'area che, nel primo e secondo livello di approfondimento, è risultata soggetta a potenziale instabilità per fenomeni di liquefazione. È stata, in particolare, definita una successione sismostratigrafica tipo, coerente con i risultati delle indagini specificatamente condotte su tale area, risultata globalmente omogenea dal punto di vista della risposta sismostratigrafica. Questo consente d'interpretare l'intero 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 in riferimento allo scenario della Microzona 2002, definita da un profilo sismo stratigrafico specifico, emerso dall'analisi dei dati stratigrafici e geofisici disponibili e integrativi.

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 definito come lo stato rigido del sottosuolo con Vs > 800 m/sec, al tetto del quale riferire l'input sismico caratteristico dell'area di studio da impiegare per le analisi di risposta locale.

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.

Nella Microzona 2002 le indagini hanno evidenziato la presenza di terreni prevalentemente sabbiosi nei primi 8-10 metri dal p.c., sovrapposti a depositi argilloso-limosi con locali e subordinate intercalazioni sabbioso-limose presenti tra le quote -25 e -40 metri da p.c.

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 geofisiche disponibili per la microzona oggetto di RSL.

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

Per profondità maggiori è stato ricostruito un modello sismostratigrafico basato su dati di velocità delle onde di taglio riferite a studi condotti a livello regionale, ancorati a dati stratigrafici derivanti da pozzi profondi e dalle sezioni geologiche della RER disponibili per l'areale oggetto di studio.

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), localizzato alla profondità di circa -320 metri, in accordo anche con i dati contenuti nello studio di Mascandola et al. del 2018.

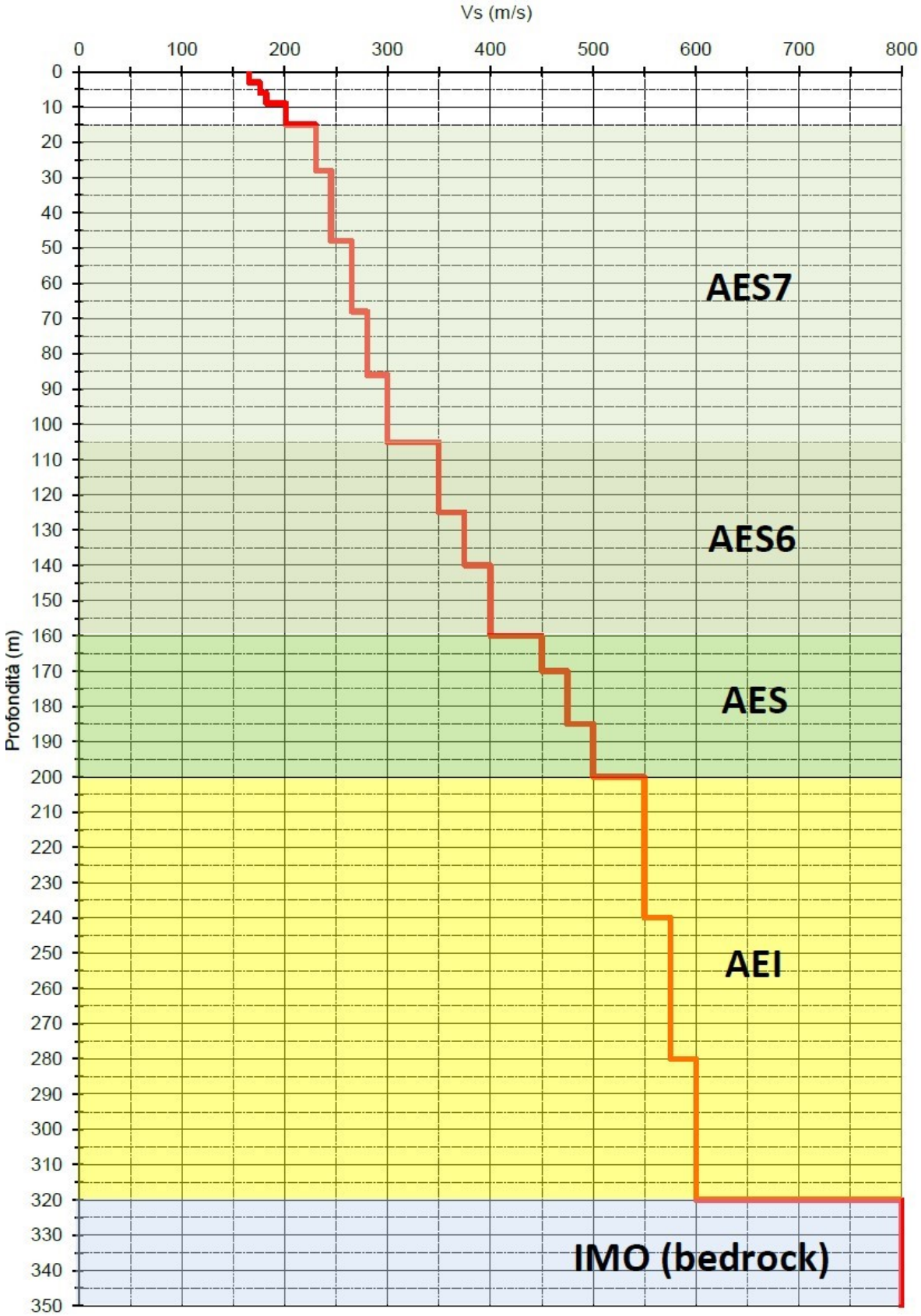


Figura n. 8.1 - Profilo di Vs adottato per la zona oggetto di RSL.

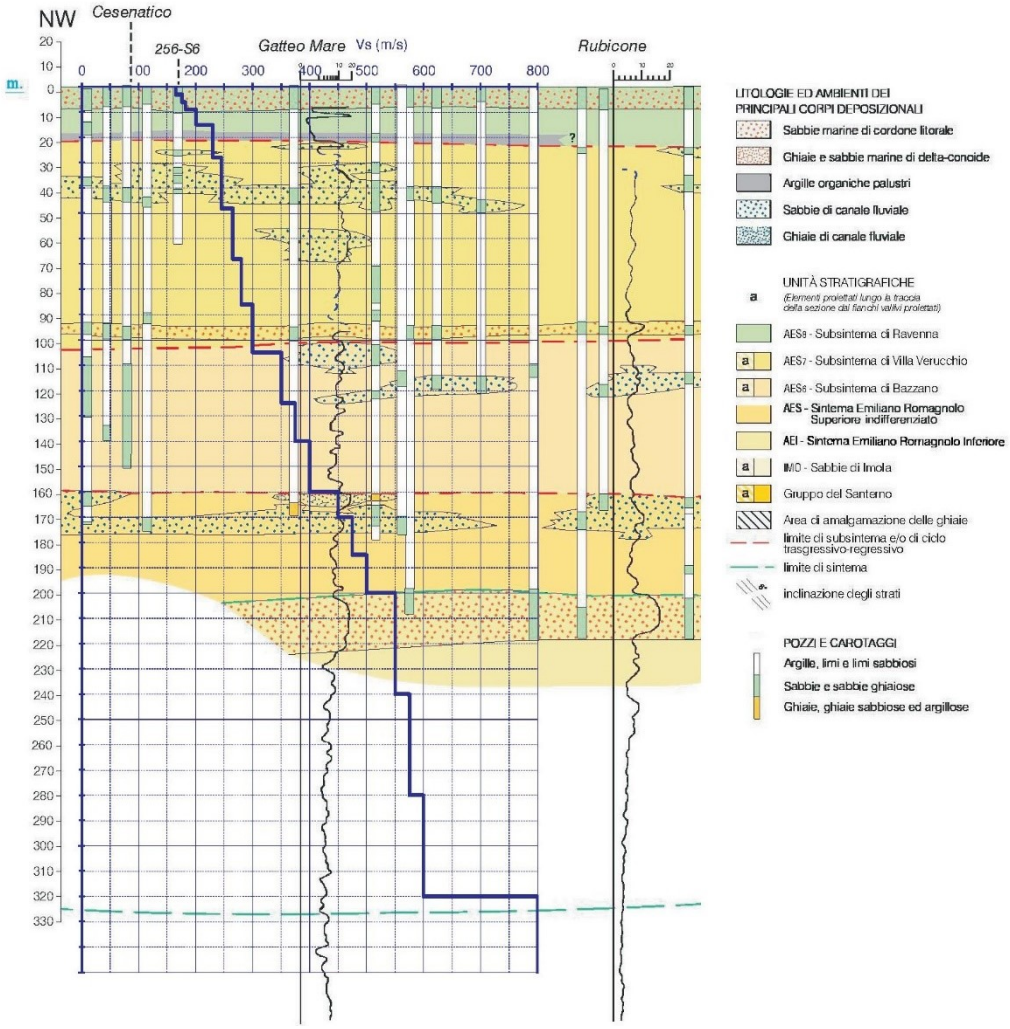


Fig. 8.2 - Stralcio sezione geologica n. 59 della RER con sovrapposto il profilo di Vs utilizzato nella RSL.

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), si è fatto riferimento a curve riportate in studi eseguiti da terzi, ottenute da campioni di terreno prelevati nell'area oggetto di RSL nei primi 30 metri di profondità (figura n. 8.3).

Per profondità maggiori sono invece state utilizzate curve di letteratura GEI (83) riferite a diversi intervalli di profondità (figura n. 8.3).

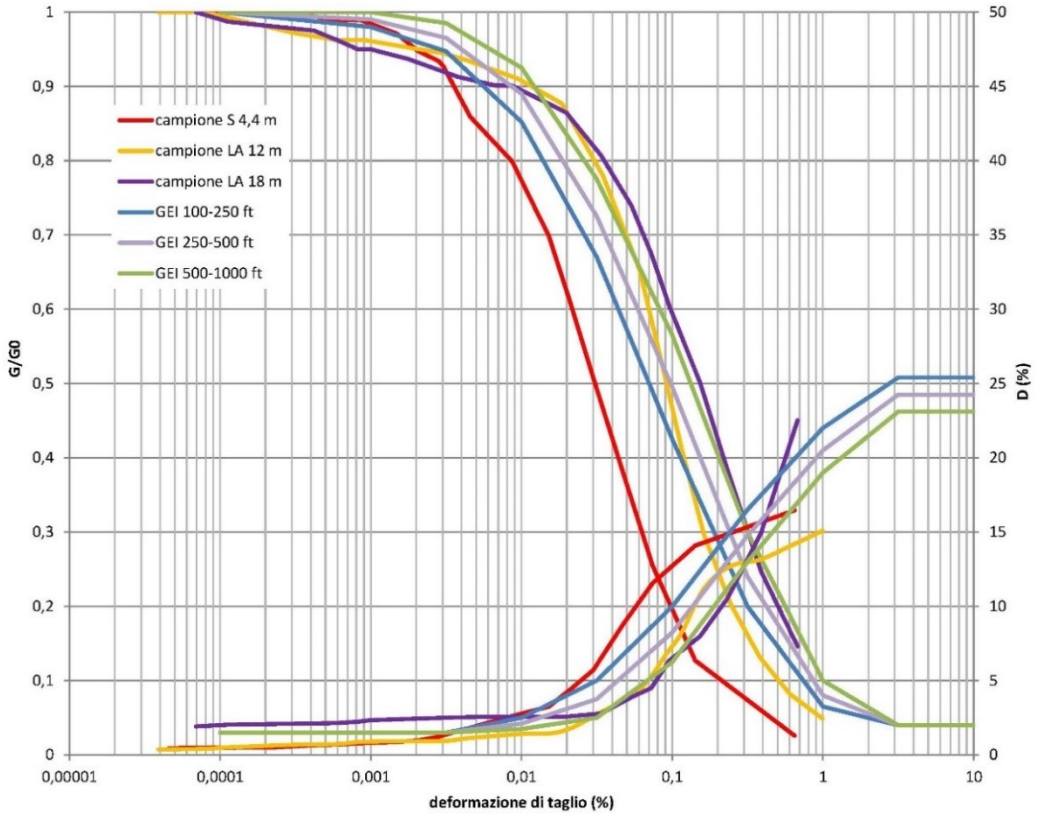


Figura n. 8.3 - Grafico delle curve di decadimento utilizzate.

8.3.4. Descrizione del modello

Sulla base delle caratteristiche litostratigrafiche e geofisiche del sottosuolo, è stato costruito il modello riportato nella tabella n. 8.1.

Strato	Descrizione	S [m]	ρ [Kg/m³]	Vs [m/s]	γ	Curva decadimento
Strato (1)	sabbia	3.00	1850.00	165.00	0.35	Cesenatico S 4,4m laboratorio
Strato (2)	sabbia	3.00	1850.00	176.00	0.35	Cesenatico S 4,4m laboratorio
Strato (3)	sabbia	3.00	1850.00	182.00	0.35	Cesenatico S 4,4m laboratorio
Strato (4)	argilla	6.00	1850.00	201.00	0.35	Cesenatico LA 12m laboratorio
Strato (5)	argilla	13.00	1850.00	230.00	0.35	Cesenatico LA 18m laboratorio
Strato (6)	-	20.00	1900.00	245.00	0.35	GEI (83), 100-250 ft
Strato (7)	-	20.00	1900.00	265.00	0.35	GEI (83), 100-250 ft
Strato (8)	-	18.00	1950.00	280.00	0.35	GEI (83), 250-500 ft
Strato (9)	-	19.00	1950.00	300.00	0.35	GEI (83), 250-500 ft
Strato (10)	-	20.00	1950.00	350.00	0.35	GEI (83), 250-500 ft
Strato (11)	-	15.00	1950.00	375.00	0.35	GEI (83), 250-500 ft
Strato (12)	-	20.00	1950.00	400.00	0.35	GEI (83), 250-500 ft
Strato (13)	-	10.00	2000.00	450.00	0.35	GEI (83), >500 ft
Strato (14)	-	15.00	2000.00	475.00	0.35	GEI (83), >500 ft
Strato (15)	-	15.00	2000.00	500.00	0.35	GEI (83), >500 ft
Strato (16)	-	40.00	2100.00	550.00	0.35	GEI (83), >500 ft
Strato (17)	-	40.00	2100.00	575.00	0.35	GEI (83), >500 ft
Strato (18)	-	40.00	2100.00	600.00	0.35	GEI (83), >500 ft
bedrock			2200.00	800		

Tabella n. 8.1 - Modello sismostratigrafico e caratteristiche meccaniche degli strati della Microzona 2002.

8.3.5. Azioni sismiche in ingresso

Quali segnali di input sismico sono stati utilizzati quelli forniti dalla piattaforma WebGIS sviluppata da EUCENTRE per la Regione Emilia-Romagna nell'ambito dell'accordo "Acquisizione del servizio di rilevamento a scala regionale del rischio sismico degli edifici residenziali ordinari e aggiornamento dei segnali di riferimento per la stima della risposta sismica locale negli studi di microzonazione sismica di terzo livello di approfondimento"[11].

Tutti i segnali sono stati selezionati attraverso una procedura che valuta la similarità tra le forme spettrali di riferimento e la forma degli spettri di risposta dei segnali contenuti nelle banche dati.

Il servizio fornisce 7 accelerogrammi per ciascun nodo del reticolo di riferimento della pericolosità sismica locale dell'Allegato A delle NTC 2008. Per il sito indagato sono stati utilizzati i sismi riferiti al nodo più vicino: il n° 18299.

Gli accelerogrammi sono stati estratti per tempi di ritorno di 475 anni (tabella n. 8.2).

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

Mw	Distanza epicentrale	Fattore di scala	File
6.9	62.9	0.72	ESM EU.HRZ..HNE.D.19790415.061941.C.ACC.ASC
5.74	12.57	1.58	NGA RSN146_COYOTELK_G01320.AT2
6.93	94.31	1.99	NGA RSN797_LOMAP_RIN090.AT2
6.69	38.07	1.22	NGA RSN1091_NORTHR_VAS000.AT2
6.6	31	0.74	KiKnet SMNH100010061330.EW2
6.6	62	1.32	KiKnet SAGH050503201053.EW2
6.1	97	1.51	KiKnet MYGH041103280724.EW2

Tabella n. 8.2 - Sismi con tempo di ritorno di 475 anni.

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. 5.0.14 di STACEC.

Il codice di calcolo LSR2D 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

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

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. 8.4.

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

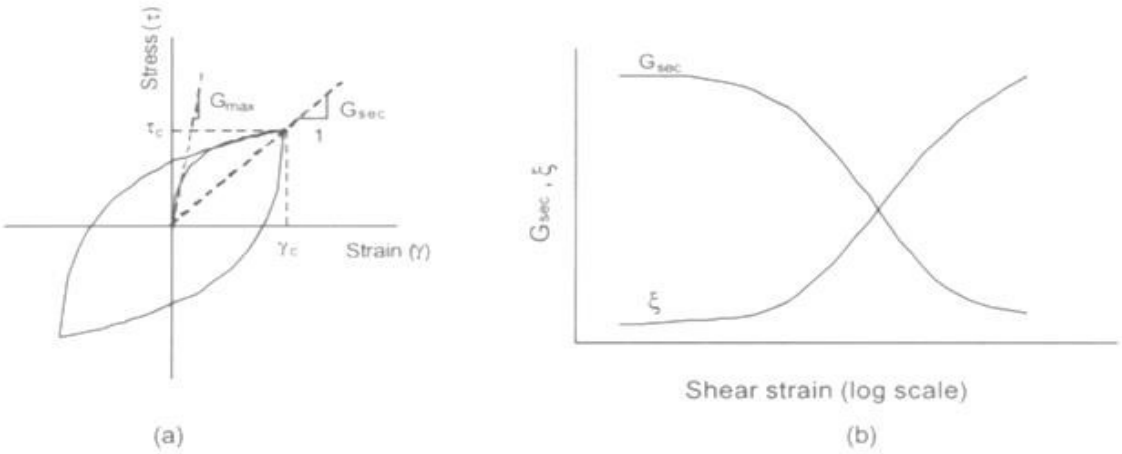


Figura n. 8.4 - Modello lineare equivalente: (a) curve tensioni - deformazioni; (b) variazione del modulo.

Il comportamento non lineare del terreno, durante un ciclo di carico, viene approssimato per come mostrato nella figura n. 8.4. Il modulo di taglio equivalente, G, è preso considerando il modulo di taglio secante G_S.

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

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

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. 8.5) e caricato mediante un'accelerazione alla base dello stesso (bedrock), la soluzione dell'equazione del moto viene poi ottenuta nel dominio del tempo utilizzando il metodo di integrazione di Newmark.

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

dove:

M = matrice di massa del sistema;

C = matrice di smorzamento del sistema;

K = matrice di rigidezza del sistema;

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

a_g = vettore di accelerazione alla base.

Tale equazione vale per ogni istante di tempo 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.

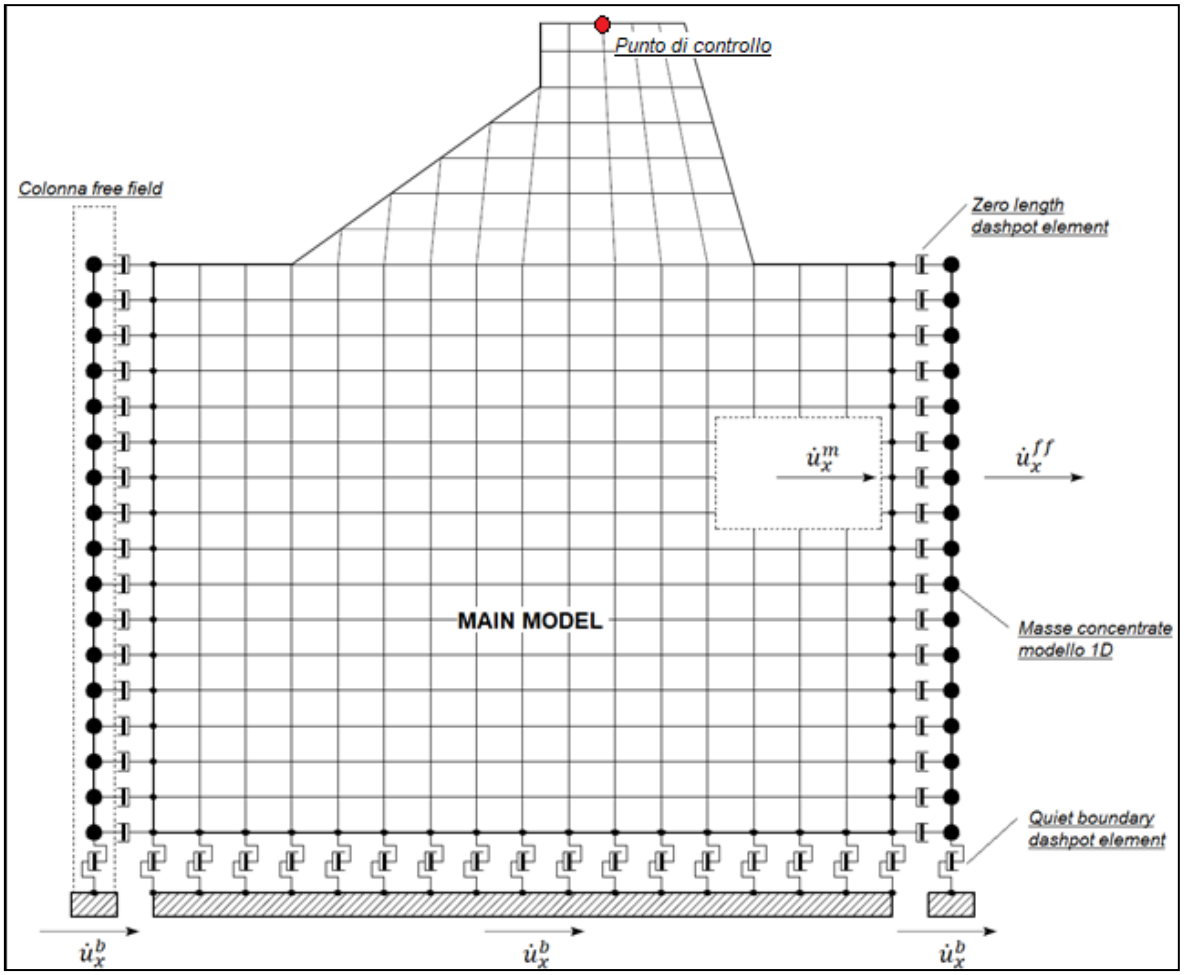


Figura n. 8.5 - Discretizzazione FEM del terreno.

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

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

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. 5.0.14 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.

Nella figura n. 8.6 che segue sono riportati i grafici con gli spettri in output (in tonalità di grigio), gli spettri medi in input (in verde) e in output (in rosso) per la Microzona 2002.

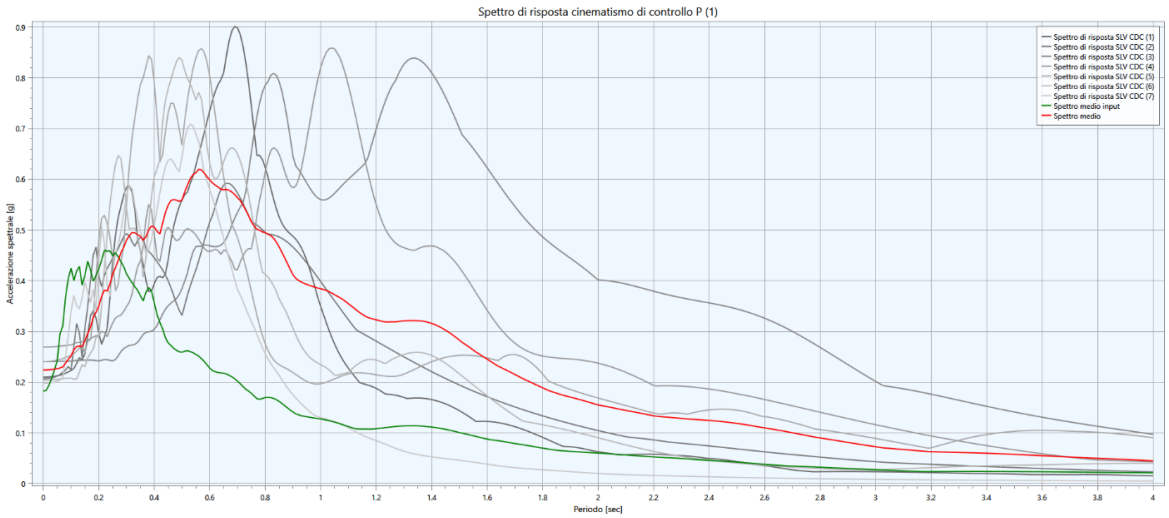


Figura n. 8.6 - Confronto tra gli spettri in accelerazione spettro medio in accelerazione in input e lo spettro medio in accelerazione in output per la Microzona 2002.

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 la Microzona 2002 si considera l'abaco per PIANURA 3, 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. e valore di Vs30 che varia da 150 m/sec a 250 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 dello spettro elastico in accelerazione da RSL confrontato con quello semplificato derivato dalle NTC per la categoria di sottosuolo C;
- la tabella con i fattori di amplificazione calcolati, confrontati con quelli da normativa.

8.5.1. Accelerogrammi di output - Microzona 2002

La figura n. 8.7 riporta gli accelerogrammi di output della Microzona 2002

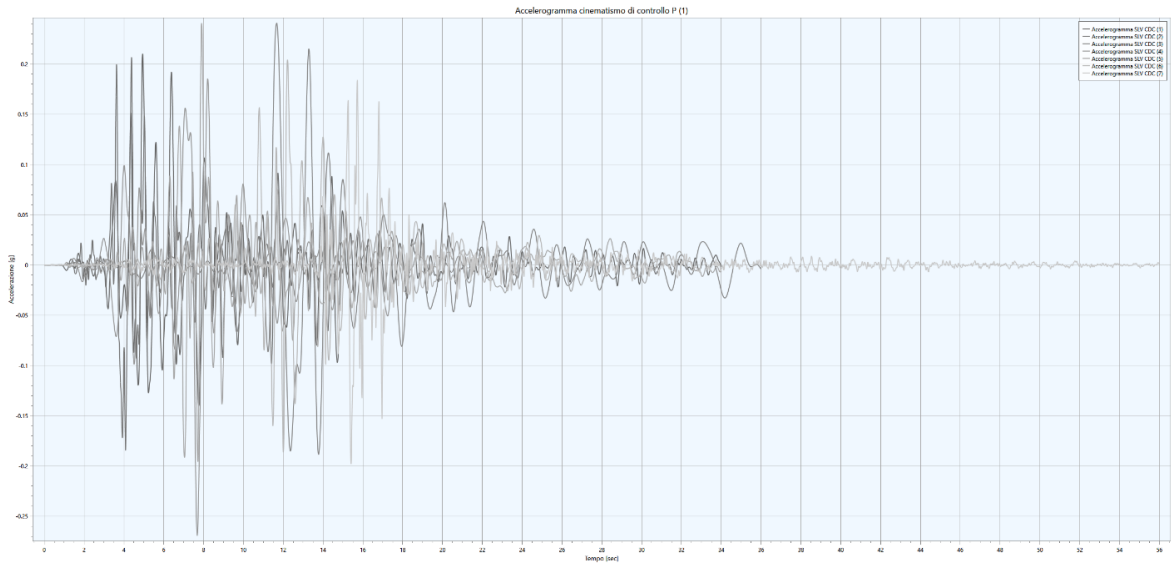


Figura n. 8.7 - Accelerogrammi di output della Microzona 2002.

La figura n. 8.8 contiene il confronto tra lo spettro medio in output in accelerazione e lo spettro di riferimento da normativa per la categoria di sottosuolo C per Microzona 2002.

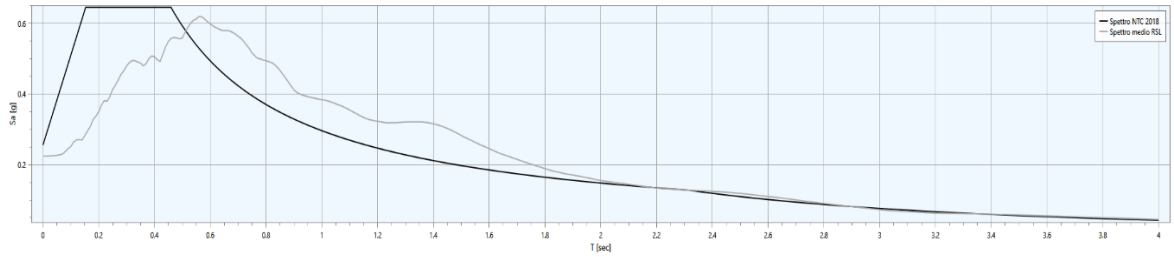


Figura n. 8.8 - Confronto tra lo spettro medio in output in accelerazione e lo spettro di riferimento da normativa per la categoria di sottosuolo C per Microzona 2002.

La tabella n. 8.3 e la figura 8.9 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 (%)*
FA PGA	1,22	1,3	-6,6
FA $_{SA1\ 0.1-0.5}$	1,14	1,3	-14,0
FA $_{SA2\ 0.4-0.8}$	2,47	2,1	+15,1
FA $_{SA3\ 0.7-1.1}$	2,96	2,5	+16,4
FA $_{SA4\ 0.5-1.5}$	2,87	2,4	+17,2
FH $_{SI1\ 0.1-0.5}$	0,94	1,5	-59,6
FH $_{SI2\ 0.5-1.0}$	2,62	2,3	+12,2
FH $_{SI3\ 0.5-1.5}$	2,72	2,6	+4,4

Tabella n. 8.3 - Valori dei fattori di amplificazione calcolati nella Microzona 2002.

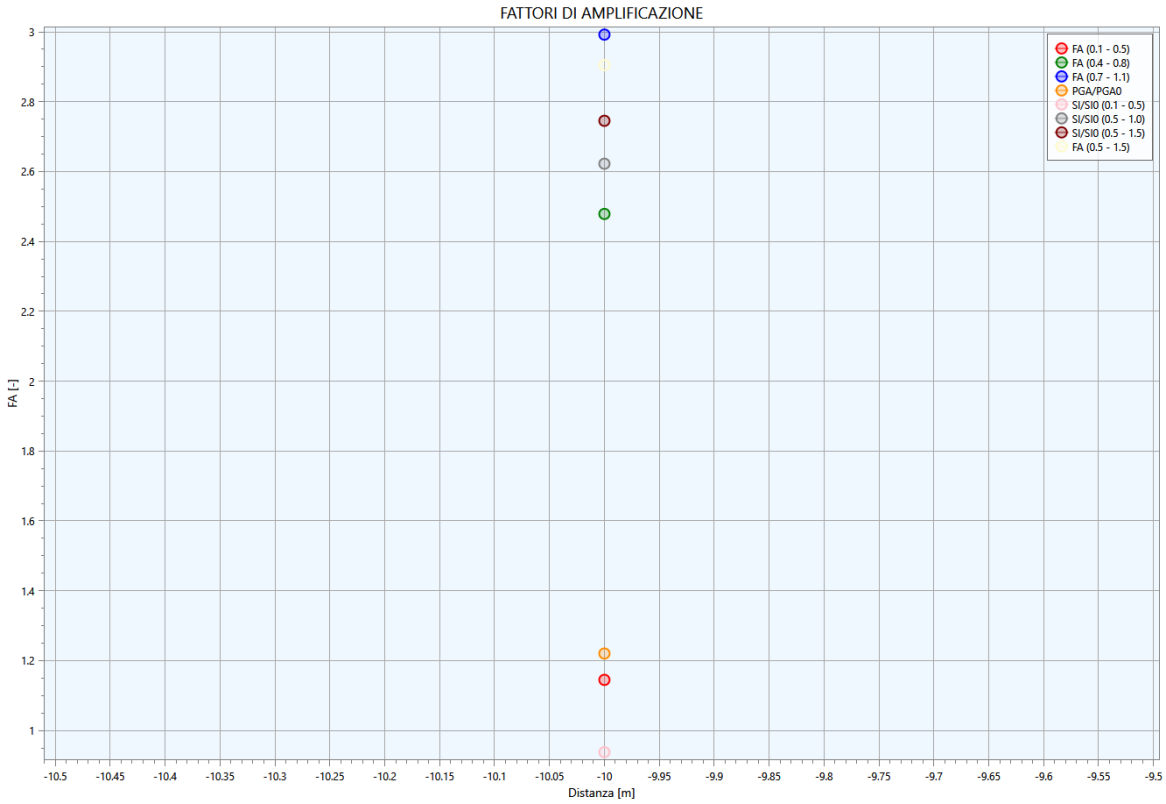


Figura n. 8.9 - Rappresentazione grafica dei fattori di amplificazione calcolati nella Microzona 2002.

Si è proceduto inoltre ad eseguire ulteriori RSL per la medesima microzona, mantenendo inalterato il profilo litologico, adottando differenti curve di decadimento da letteratura per la parte di sottosuolo più profonda e ipotizzando un bedrock meno rigido, al fine di verificare l'entità di variazione dell'amplificazione.

I fattori di amplificazione risultanti delle simulazioni sono riportati di seguito:

Modello sismostratigrafico	***Vs bedrock***	***FATTORI***							
		FPGA	***FA 0,1-0,5***	***FA 0,4-0,8***	***FA 0,7-1,1***	***FA 0,5-1,5***	***FH 0,1-0,5***	***FH 0,5-1,0***	***FH 0,5-1,5***
curve decadimento da campioni fino a -30 m + curve GEI (83)	800 m/s	1,22	1,14	2,47	2,96	2,87	0,94	2,62	2,72
curve decadimento da campioni fino a -30 m + curve EPRI (93)	800 m/s	1,3	1,22	2,63	3,16	3,06	1,01	2,78	2,89
curve decadimento da campioni fino a -30 m + curve EPRI (93)	700 m/s	1,23	1,17	2,46	2,9	2,82	0,99	2,58	2,67
curve decadimento da campioni fino a -30 m + curve GEI (83)	700 m/s	1,16	1,1	2,31	2,75	2,68	0,91	2,43	2,53

Tabella n. 8.4 - Valori dei fattori di amplificazione calcolati per differenti simulazioni (in rosso quelli del modello adottato per il presente studio).

Come si può osservare l'adozione delle curve di decadimento proposte da EPRI (93), anch'esse differenziate per intervalli di profondità, generano fattori di amplificazione leggermente superiori a quelli ottenuti con le curve GEI (83) a parità di caratteristiche del bedrock.

Facendo variare invece le caratteristiche di rigidezza del bedrock, i fattori di amplificazione subiscono una moderata riduzione passando da velocità delle onde di taglio di 800 m/s a velocità di 700 m/s.

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.

Nelle aree suscettibili di instabilità, sottoposte ad approfondimenti di Livello 3, il valore del parametro di pericolosità H è stato ricavato direttamente dagli spettri in accelerazione risultanti dalla RSL svolta. 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 (fig. 8.10).

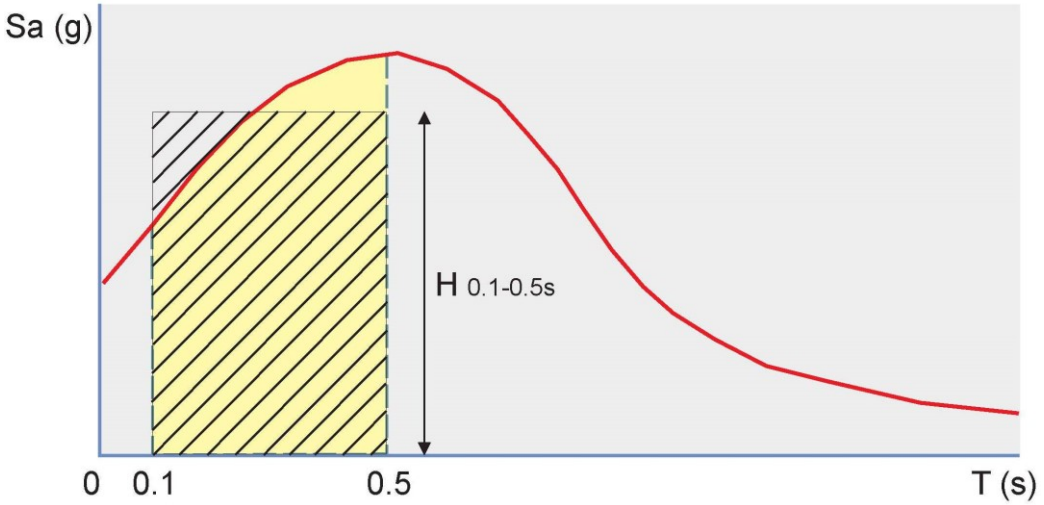


Fig. 8.10 – Esempio di calcolo di H per un intervallo di periodo compreso tra 0,1 e 0,5 s.

Nelle aree stabili, sottoposte ad approfondimento di Livello 2, lo scuotimento atteso al sito è stato ottenuto dal prodotto dell'Acceleration Spectrum Intensity (ASI), integrale dello spettro di riferimento in accelerazione calcolato per l'intervallo di periodi 0,1-0,5 s, diviso per ΔT e moltiplicato per il fattore di amplificazione in accelerazione (FA) calcolato per lo stesso intervallo di periodo:

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

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

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 8.5 – 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 8.6 – 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
Hsm	0,54	0,43
H 0,4-0,8s	-	0,56
H 0,7-1,1s	-	0,44
H 0,5-1,5s	-	0,42

Tabella 8.7 – Valori del parametro di pericolosità H

Con riferimento alla classificazione proposta a livello nazionale dal DPC, le microzone presentano una pericolosità sismica media per l'intervallo 0,1s<T<0,5s e molto alta per gli intervalli di periodo superiore.

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 3 prove penetrometriche statiche con punta elettrica (CPTE) e 38 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 relativamente alla Zona 2002 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 = **0,179**g) e il fattore di amplificazione (F_{PGA} = **1,22**) caratteristico della zona di riferimento, determinato dalla Risposta Sismica Locale] pari a **0,22**g (0,179 x 1,22 = 0,218).

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

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

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

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

9.2.1 Analisi (LPI)

I risultati delle verifiche alla liquefazione effettuate nella zona 2002 sono riportati nella seguente tabella 9.1.

TABELLA N. 9.1 - INDICE DI LIQUEFAZIONE GLOBALE DEI TERRENI IN ESAME

ID indagine	LPI B&I (2014)
040008P195CPTU195	19,368
040008P226CPTU226	28,867
040008P240CPTU240	10,599
040008P459CPTE459	3,374
040008P460CPTE460	4,623
040008P461CPTE461	2,541
040008P983CPTU984	25,861
040008P984CPTU985	24,458
040008P985CPTU986	23,519
040008P986CPTU987	24,074
040008P987CPTU988	20,005
040008P988CPTU989	11,373
040008P989CPTU990	5,874
040008P990CPTU991	7,036
040008P991CPTU992	6,747
040008P992CPTU993	6,322
040008P996CPTU997	12,417
040008P997CPTU998	15,457
040008P998CPTU999	14,089
040008P1001CPTU1002	24,678
040008P1002CPTU1003	21,453
040008P1003CPTU1004	16,57
040008P1005CPTU1006	26,732
040008P1006CPTU1007	19,953
040008P1007CPTU1008	7,439
040008P1008CPTU1009	7,721
040008P1009CPTU1010	6,059
040008P1010CPTU1011	10,838

ID indagine	LPI B&I (2014)
040008P1011CPTU1012	7,942
040008P1012CPTU1013	7,79
040008P1013CPTU1014	12,532
040008P1015CPTU1016	20,998
040008P1016CPTU1017	17,864
040008P1017CPTU1018	16,519
040008P1018CPTU1019	10,421
040008P1019CPTU1020	14,4
040008P1020CPTU1021	8,754
040008P1021CPTU1022	12,806
040008P1025CPTU1026	16,982
040008P1031CPTU1032	15,568
040008P1032CPTU1033	23,641
Media	**14,494**

La valutazione del pericolo di liquefazione, effettuata con riferimento all'indice di liquefazione (IL), come precisato nella tabella n. 9.2, porta a definire questo fenomeno non probabile per 3 verticali, probabile per 19 e certo per 19.

TABELLA N. 9.2 - 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 9.3, la pericolosità risulta moderata per 3 verticali, alta per 19 e molto alta per 19.

TABELLA N. 9.3 - 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. 9.1 sono evidenti gli indici di liquefazione calcolati (B&I 2014) unitamente alla valutazione del relativo rischio di liquefazione.

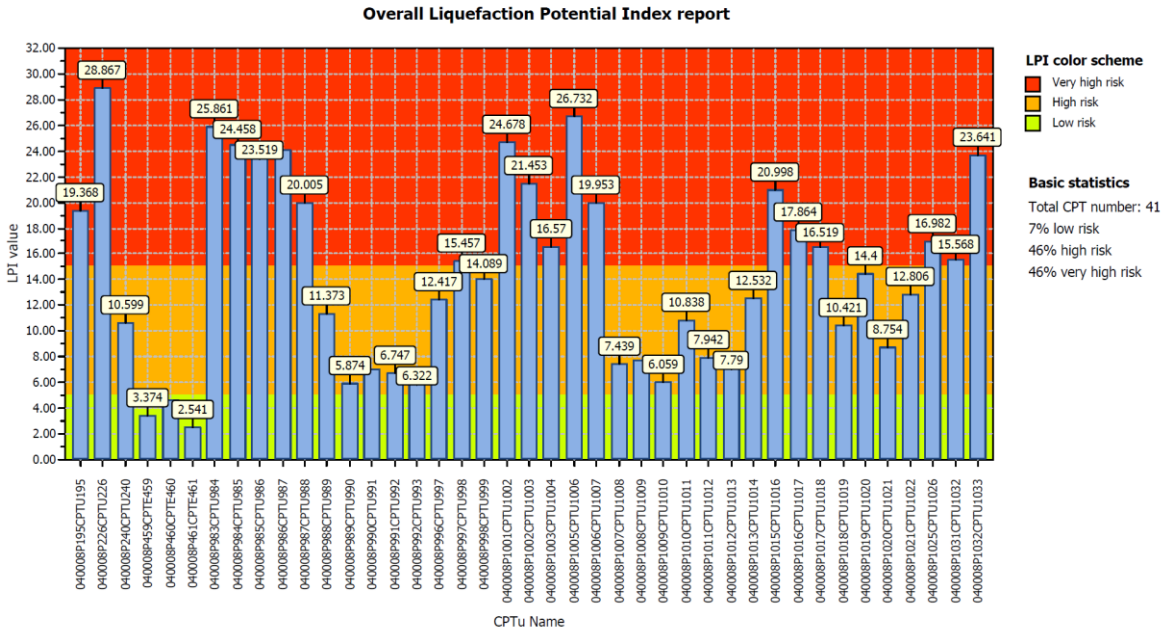


Figura n. 9.1 - Indici di liquefazione calcolati congiuntamente alla valutazione del relativo rischio di liquefazione.

La figura n. 9.2 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) unitamente alla valutazione del relativo rischio di liquefazione. Si può notare che i due metodi forniscono, in termini relativi, le stesse indicazioni.

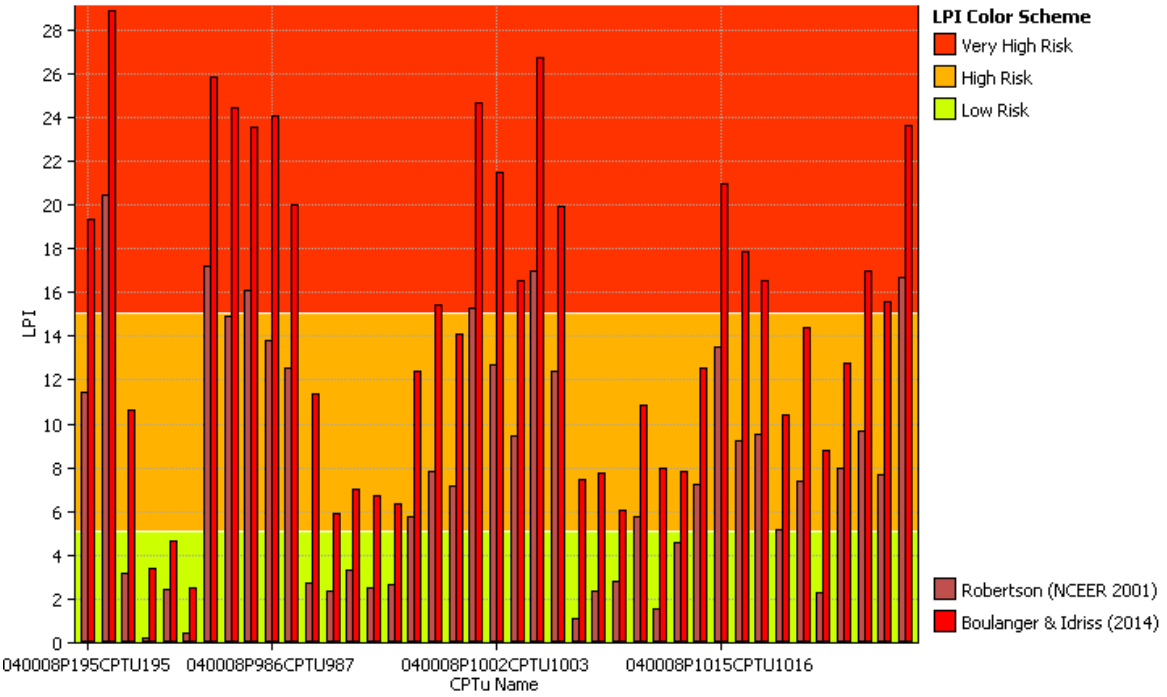


Figura n. 9.2 - Raffronto fra gli indici di liquefazione calcolati con il metodo di Boulanger & Idriss (2014) e quelli calcolati con il metodo di Robertson (NCEER 2001) unitamente alla valutazione del relativo rischio di liquefazione.

La figura n. 9.3 mostra la probabilità (B&I 2014), espressa in percentuale, che la liquefazione dei terreni in esame si verifichi. I terreni rappresentati indicano probabilità di liquefazione: bassa (3), alta (19) e molto alta (19).

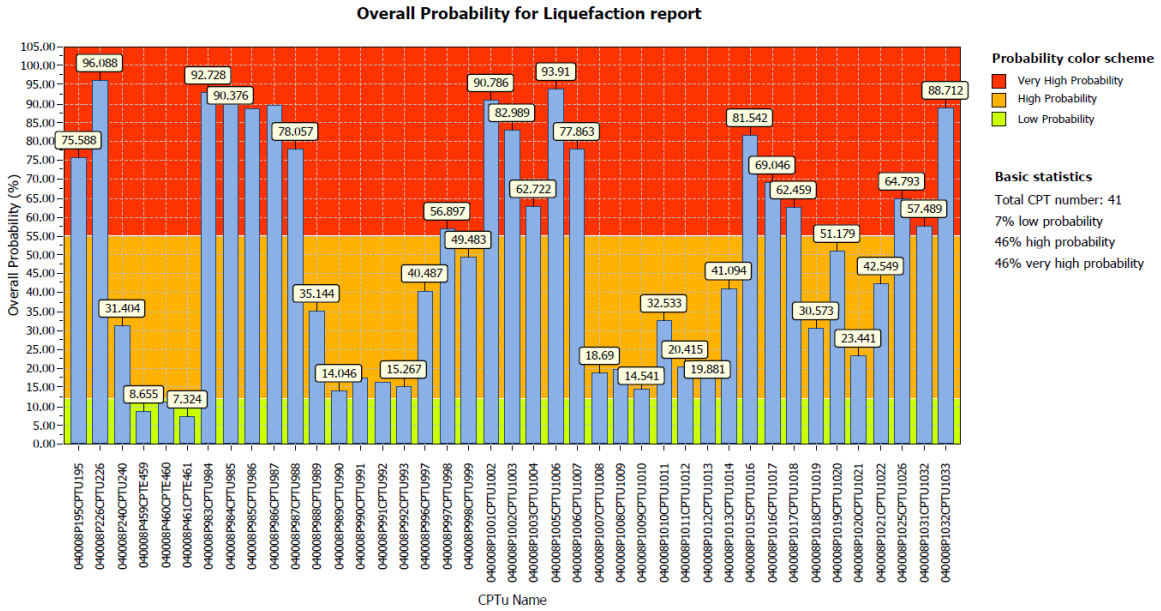


Figura n. 9.3 - Probabilità di liquefazione.

La figura n. 9.4 mostra il raffronto fra la probabilità di liquefazione calcolata con il metodo di Boulanger & Idriss (2014) e quella calcolata con il metodo di Robertson (NCEER 2001). I due metodi forniscono, in termini relativi, le stesse indicazioni.

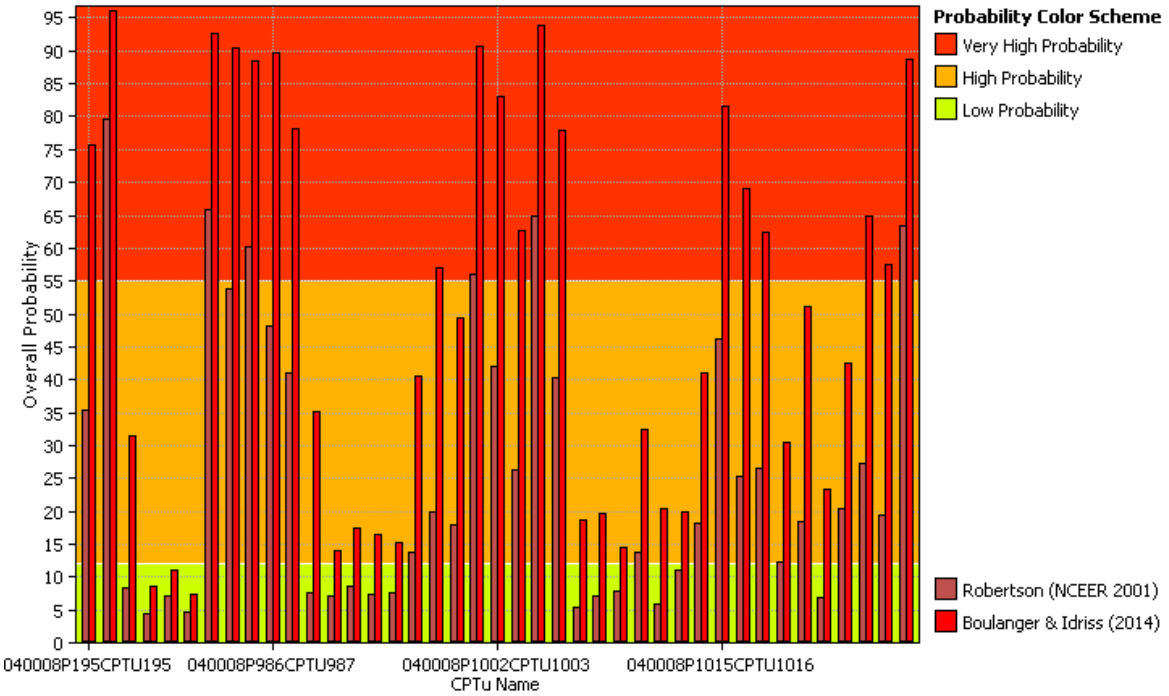


Figura n. 9.4 - Raffronto fra la probabilità di liquefazione calcolata con il metodo di Boulanger & Idriss (2014) e quella calcolata con il metodo di Robertson (NCEER 2001).

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

I risultati ottenuti (B&I 2014), con riferimento a ciascuna penetrometria considerata, sono riportanti nella tabella n. 9.4.

TABELLA N. 9.4 - CEDIMENTI PERMANENTI POST-SISMICI

ID indagine	Cedimento (cm)
040008P195CPTU195	22,89
040008P226CPTU226	32,255
040008P240CPTU240	14,146
040008P459CPTE459	5,482
040008P460CPTE460	10,194
040008P461CPTE461	3,615
040008P983CPTU984	27,191
040008P984CPTU985	27,697
040008P985CPTU986	25,32
040008P986CPTU987	27,271
040008P987CPTU988	21,551
040008P988CPTU989	14,446
040008P989CPTU990	6,398
040008P990CPTU991	7,607
040008P991CPTU992	9,932
040008P992CPTU993	7,805
040008P996CPTU997	14,678
040008P997CPTU998	17,563
040008P998CPTU999	16,271
040008P1001CPTU1002	26,307
040008P1002CPTU1003	24,589
040008P1003CPTU1004	20,926
040008P1005CPTU1006	30,211
040008P1006CPTU1007	21,567
040008P1007CPTU1008	9,327
040008P1008CPTU1009	9,049
040008P1009CPTU1010	6,648
040008P1010CPTU1011	13,203
040008P1011CPTU1012	9,465
040008P1012CPTU1013	9,722
040008P1013CPTU1014	18,048
040008P1015CPTU1016	22,019
040008P1016CPTU1017	23,154

ID indagine	Cedimento (cm)
040008P1017CPTU1018	17,696
040008P1018CPTU1019	11,774
040008P1019CPTU1020	16,369
040008P1020CPTU1021	10,989
040008P1021CPTU1022	13,295
040008P1025CPTU1026	18,947
040008P1031CPTU1032	16,607
040008P1032CPTU1033	30,223
Media	**16,889**

Nella figura n. 9.5 sono evidenziati i cedimenti verticali calcolati (B&I 2014).

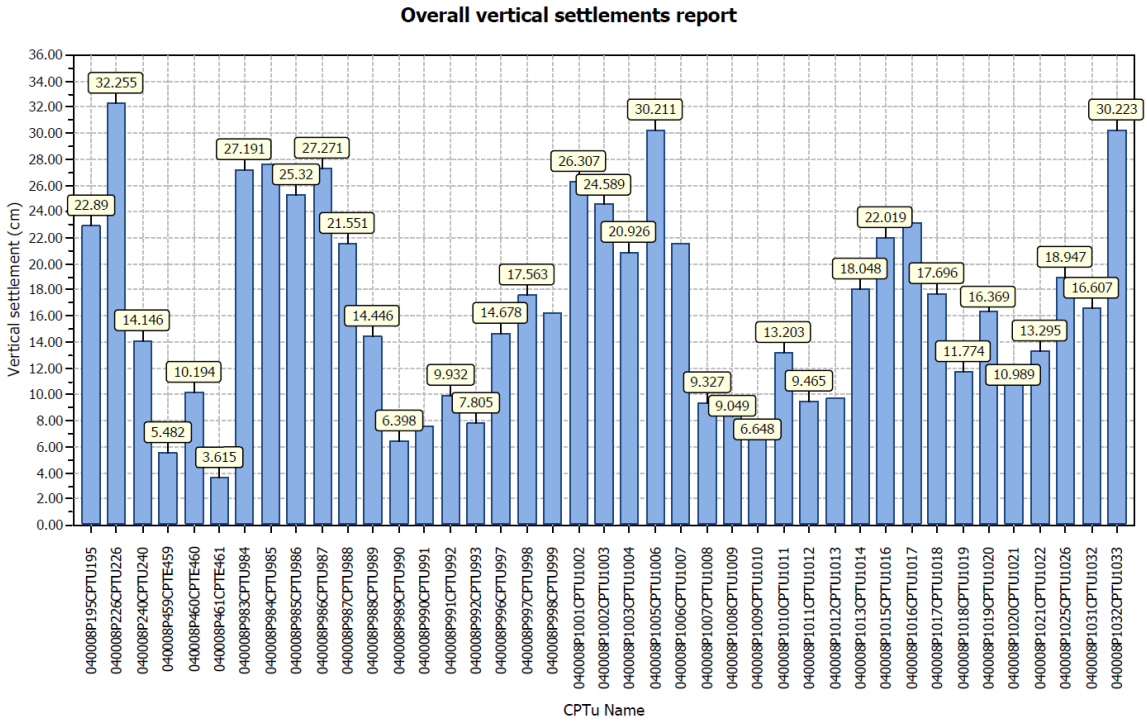


Figura n. 9.5 - Cedimenti verticali calcolati.

La figura n. 9.6 mostra il raffronto fra i cedimenti verticali calcolati con il metodo di Boulanger & Idriss (2014) e quelli calcolati con il metodo di Robertson (NCEER 2001). I due metodi forniscono, in termini relativi, le stesse indicazioni.

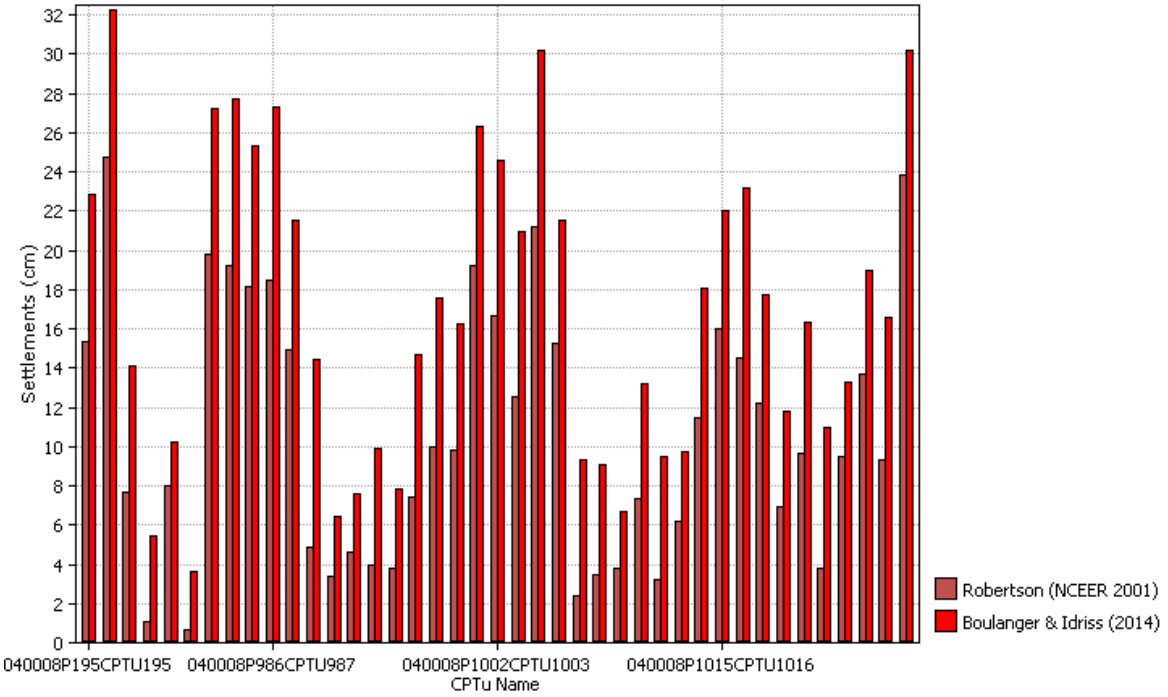


Figura n. 9.6 - Raffronto fra i cedimenti verticali calcolati con il metodo di Boulanger & Idriss (2014) e quelli calcolati con il metodo di Robertson (NCEER 2001).

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. 9.7) e z è la profondità dal piano campagna espressa in metri.

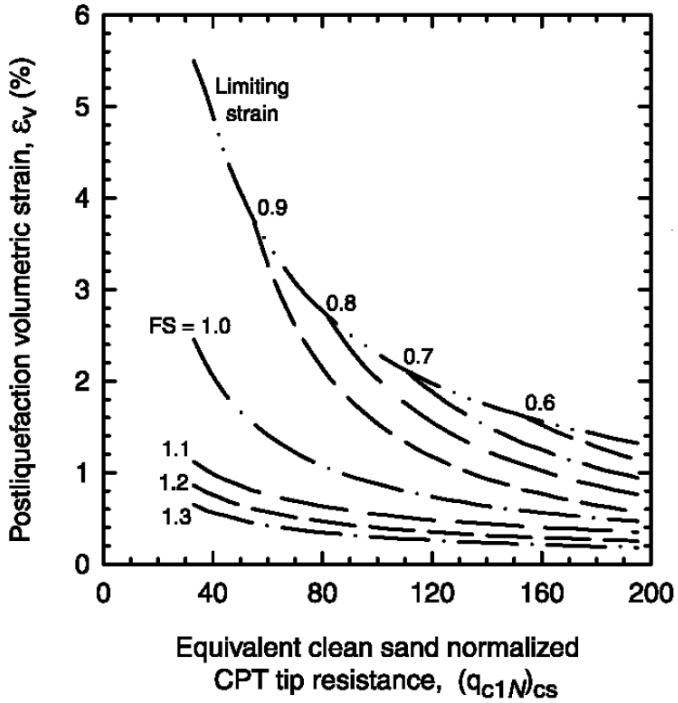


Figura n. 9.7 - Grafico per la valutazione della deformazione volumetrica post-liquefazione (Zhang et al., 2002)

9.4.1 Analisi (LSN)

Nella figura n. 9.8 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).

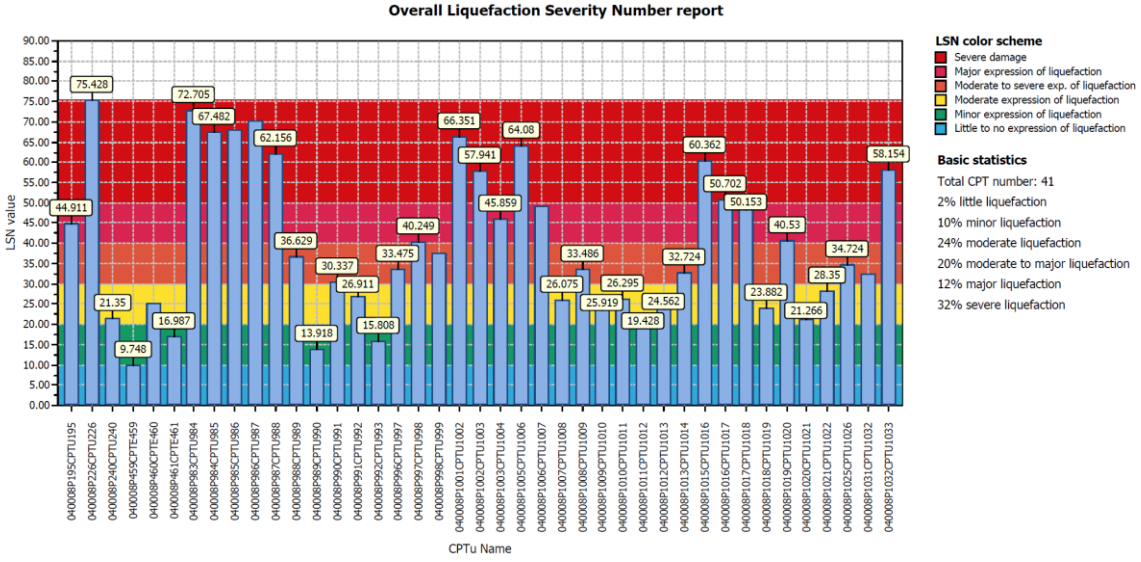


Figura n. 9.8 - Valori dell'indice globale LSN calcolati nel presente studio.

La valutazione del pericolo di liquefazione, effettuata con riferimento all'indice di liquefazione (LSN), come precisato nella tabella n. 9.5, porta a definire i potenziali effetti indotti dalla liquefazione come:

- da nulli a lievi per 1 verticale;
- modesti per 4 verticali;
- moderati per 10 verticali;
- da moderati a severi per 8 verticali;
- evidenti per 5 verticali;
- notevoli per 13 verticali.

TABELLA N. 9.5 - 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

La figura n. 9.9 mostra il raffronto fra gli indici di liquefazione (LSN) 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.

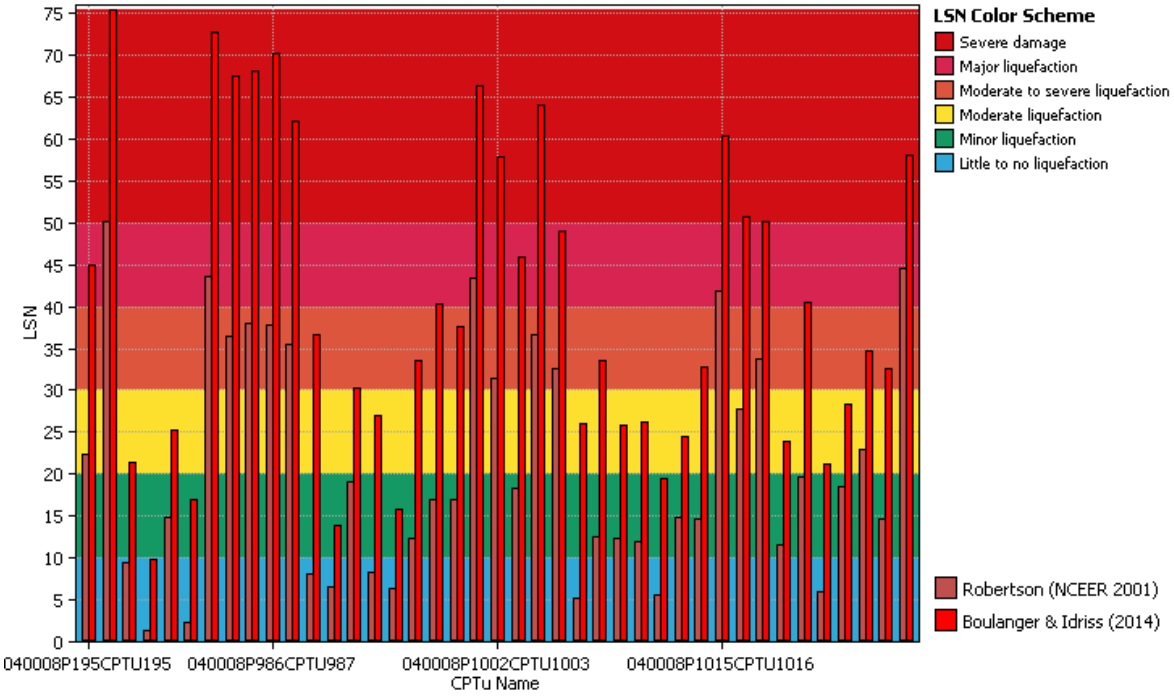


Figura n. 9.9 - Raffronto fra gli indici di liquefazione (LSN) calcolati con il metodo di Boulanger & Idriss (2014) e quelli calcolati con il metodo di Robertson (NCEER 2001).

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. 9.10.

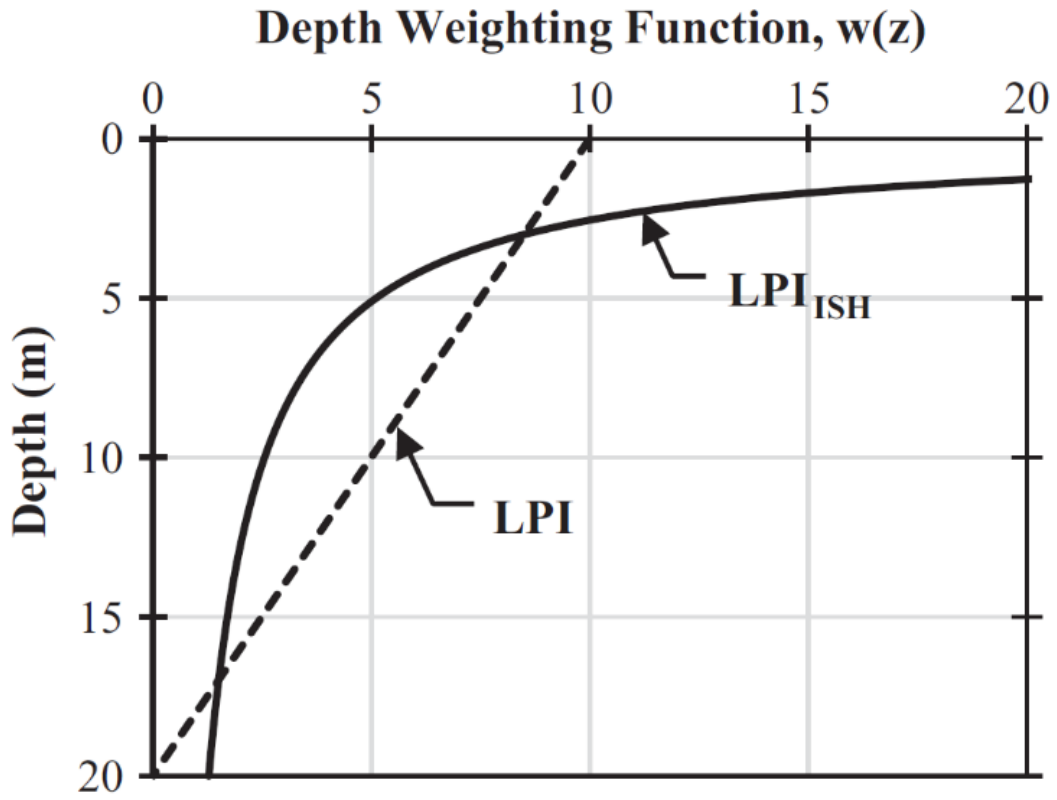


Figura n. 9.10 - Funzione di Ishihara utilizzata per il calcolo degli indici del potenziale di liquefazione (LPI_{ISH})

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. 9.11.

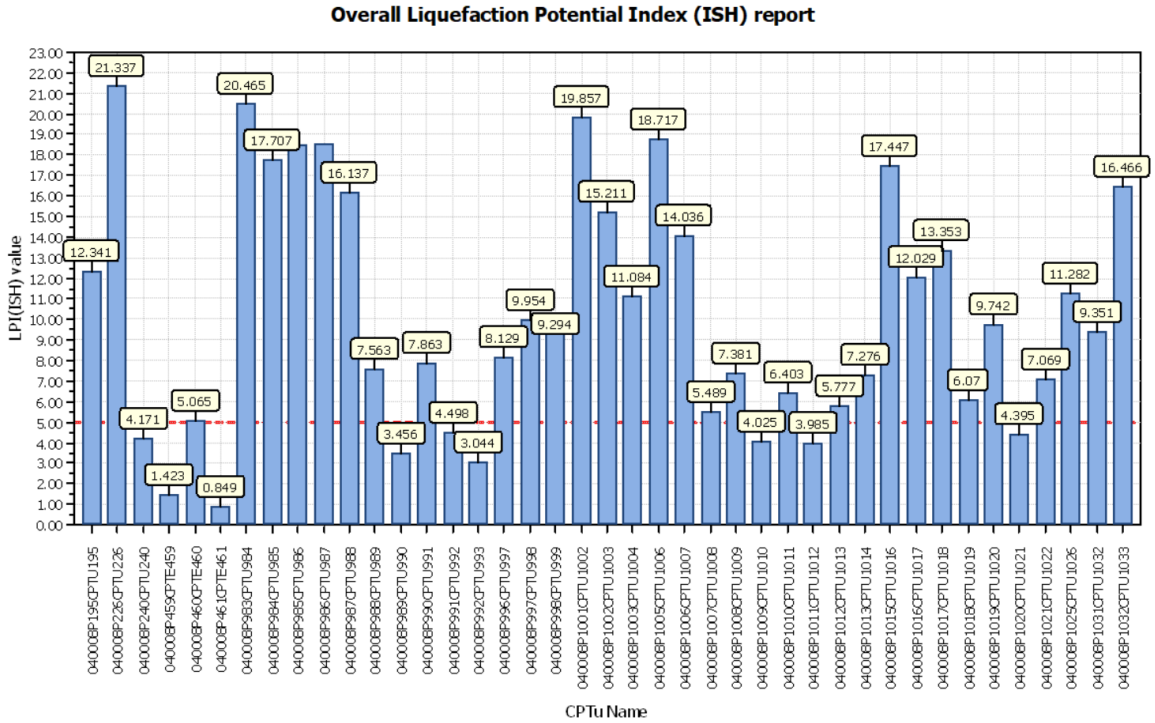


Figura n. 9.11 - Indici del Potenziale di Liquefazione calcolati con il metodo di Ishihara (LPI_{ISH}).

Utilizzando la classificazione presente nella tabella n. 9.6 si evince che sono previsti danni da liquefazione per 32 verticali su 41.

TABELLA N. 9.6 - 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

La figura n. 9.12 mostra il raffronto fra gli Indici del Potenziale di Liquefazione di Ishihara (LPI_{ISH}) 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.

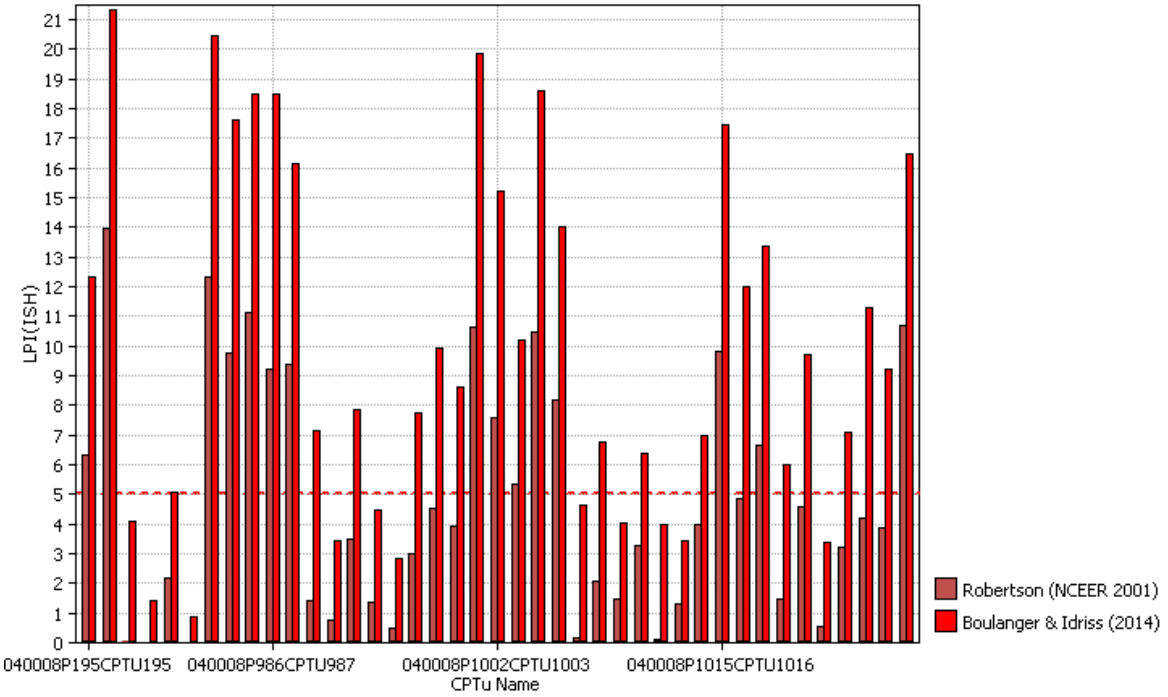


Figura n. 9.12 - Raffronto fra gli indici del Potenziale di Liquefazione di Ishihara (LPI_{ISH}) calcolati con il metodo di Boulanger & Idriss (2014) e quelli calcolati con il metodo di Robertson (NCEER 2001)

10. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Nel presente studio di Microzonazione Sismica di III livello, concernente il Comune di Cesenatico, 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 decisamente fondata.

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 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FA $_{0,1 - 0,5\ s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FA $_{0,4 - 0,8\ s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FA $_{0,7 - 1,1\ s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FA $_{0,5 - 1,5\ s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FH $_{0,1 - 0,5\ s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FH $_{0,5 - 1,0\ s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - FH $_{0,5 - 1,5\ s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - H_{sm} in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - H $_{0,4 - 0,8\ s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - H $_{0,7 - 1,1\ s}$ in scala 1:10.000
- Carta di microzonazione sismica - H $_{0,5 - 1,5\ s}$ in scala 1:10.000

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 41 prove penetrometriche disponibili [3 prove penetrometriche statiche con punta elettrica (CPTE) e 38 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, 25 ottobre 2023