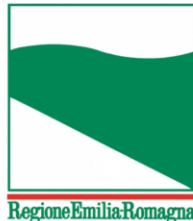




PROTEZIONE CIVILE  
Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile



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

# MICROZONAZIONE SISMICA

## Relazione Illustrativa

### Livello 3

## Regione Emilia-Romagna

### Comune di Rimini



Regione	Soggetto realizzatore	Data
Emilia-Romagna	Responsabile: Dott. Geol. Alessandro Merli	Agosto 2021
	Gruppo di lavoro: Geotema S.r.l. Dott Geol. Paolo Ciacci Ismgeo S.r.l. Ing. Marco Rinaldi	



## INDICE

1.	PREMESSA .....	1
2.	INTRODUZIONE .....	2
3.	SISMICITA' STORICA E PERICOLOSITA' DI BASE .....	5
4.	ASSETTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO DELL'AREA.....	21
4.1.	Cartografia di base.....	21
4.2.	Inquadramento Geomorfologico.....	21
4.3.	Inquadramento Geologico-Strutturale .....	24
4.4.	Assetto Stratigrafico .....	26
5.	DATI GEOTECNICI E GEOFISICI.....	44
5.1.	Indagini di tipo geofisico.....	45
5.2.	Indagini di tipo geotecnico .....	47
6.	MODELLO DI SOTTOSUOLO.....	48
6.1.	Andamento delle Vs nel sottosuolo.....	48
7.	INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE .....	55
8.	METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI.....	56
9.	ELABORATI CARTOGRAFICI.....	57
9.1	MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO I .....	57
9.1.1	Carta geologico-tecnica.....	57
9.1.2	Carta delle frequenze naturali del terreno.....	59
9.1.3	Carta delle MOPS (Microzone Omogene in prospettiva Sismica).....	62
9.2	MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO II - III.....	72
9.2.1	Carta delle velocità delle onde di taglio Vs.....	72
9.2.2	Carta dei fattori di amplificazione sismica (FA).....	73
9.2.3	Fattori di amplificazione Topografica (FT).....	78
9.2.4	Carta del parametro di scuotimento sismico assoluto "HSM".....	83
10.	MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO III (Analisi di RLS e Liquefazione).....	85
10.1	Analisi di Risposta Sismica Locale.....	86
10.1.1	Modellazione numerica e codici di calcolo.....	86
10.1.2	Moto di input.....	86
10.1.3	Modello di sottosuolo e parametri dinamici.....	88
10.1.4	Spettri di Risposta e Fattori di Amplificazione.....	95
10.2	Potenziale di liquefazione.....	126
10.2.1	Suscettibilità a liquefazione ed analisi tramite metodi semplificati.....	126
10.2.2	Stima del potenziale di liquefazione tramite metodi CPT .....	128
10.3	Verifica di risposta sismica locale in tensioni efficaci.....	136
10.4	Modello RSL 2D.....	138
11.	Confronto con la distribuzione dei danni degli eventi passati.....	145
12.	CONCLUSIONI.....	154
13.	BIBLIOGRAFIA .....	157

## ALLEGATI:

- ALLEGATO 1: Prove geognostiche/geofisiche di nuova realizzazione
- ALLEGATO 2: Prove di laboratorio
- ALLEGATO 3: Sezioni geolitologiche
- ALLEGATO 4: Parametri di scuotimento sismico – accelerogrammi di output
- ALLEGATO 5: Dati spettro medio di output
- ALLEGATO 6: Verifiche di liquefazione
- ALLEGATO 7: Tabelle parametriche di sintesi verifiche di liquefazione

## **1. PREMESSA**

La microzonazione sismica, cioè la suddivisione dettagliata del territorio in base alla differente risposta rispetto ad un ipotetico terremoto, è uno degli strumenti più efficaci per la riduzione del rischio sismico in quanto permette, fino dalle prime fasi della pianificazione urbanistica, di valutare la pericolosità sismica nelle aree urbane e urbanizzabili, indirizzare i nuovi interventi verso quelle zone a minore pericolosità e programmare interventi di mitigazione del rischio nelle zone in cui sono presenti particolari criticità.

La L.R. 20/2000 “Disciplina generale sulla tutela e uso del territorio” e la L.R. 19/2008 “Norme per la riduzione del rischio sismico”, richiedono l’esecuzione di studi di microzonazione sismica per la redazione e l’approvazione dei piani urbanistici comunali.

In data 02/05/07 la Regione Emilia-Romagna con deliberazione dell’Assemblea Legislativa n.112/2007 ha approvato gli “Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica”. Successivamente tali indirizzi sono stati aggiornati con l’atto di indirizzo e coordinamento tecnico approvato con Del. G.R. 2193/2015, quindi, la più recente Del. G.R. 630/2019 “Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, LR 24/2017)”. Infine con *DGR 476/2021 e successiva integrazione DGR 564/2021*, la R.E.R. ha pubblicato il recente “AGGIORNAMENTO DELL'”ATTO DI COORDINAMENTO TECNICO SUGLI STUDI DI MICROZONAZIONE SISMICA PER LA PIANIFICAZIONE TERRITORIALE E URBANISTICA (ARTT. 22 E 49, L.R. N. 24/2017)” DI CUI ALLA DELIBERAZIONE DELLA GIUNTA REGIONALE 29 APRILE 2019, N. 630” cui poter far riferimento per la redazione di studi di microzonazione sismica in Emilia Romagna.

Anche il Dipartimento della Protezione Civile e la Conferenza delle Regioni e Province Autonome in data 13 novembre 2008 ha approvato gli “Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica”, e con O.C.D.C.P. n. 293 del 26 ottobre 2015 e Deliberazione della Regione Emilia Romagna 573/2016 , sono stati definiti i criteri e le risorse finanziarie per gli studi di microzonazione sismica in Emilia Romagna.

Il comune di Rimini, pertanto, essendo in possesso dei requisiti indicati dall' O.C.D.C.P. n. 293 del 26 ottobre 2015 ha ottenuto il relativo finanziamento e gli studi che sono stati previsti per le aree urbanizzate e urbanizzabili del comune destinatario del contributo sono relativi agli approfondimenti di Microzonazione Sismica di III livello; tuttavia, preliminarmente a tale approfondimento, si è proceduto all’adeguamento degli studi di Microzonazione Sismica di primo e di secondo livello (inizialmente redatti nell’ambito del PSC comunale), secondo gli “Standard di rappresentazione e archiviazione informatica” contemplati nella medesima DGR 630/2019, in conformità ai criteri definiti al relativo All. “A”. Lo studio finale sarà accompagnato dall’analisi della Condizione Limite di Emergenza (CLE), entrambi redatti secondo i più recenti Standard 3.1 e 4.1.1 del 2019.

## **2. INTRODUZIONE**

A seguito di un terremoto, si ha spesso modo di osservare come la distribuzione dei danni sul territorio sia assai eterogenea a parità di vulnerabilità dell'edificato. Le condizioni geologico-tecniche degli strati più superficiali, nonché le caratteristiche geomorfologiche possono concorrere, infatti, a modificare localmente lo scuotimento indotto da un terremoto. Per un'efficace azione di prevenzione, in materia di rischio sismico, è necessario tener conto non solo, quindi, della zonazione sismica nazionale, ma anche di eventuali sfavorevoli condizioni locali, a scala comunale o sub comunale. Particolarmente rilevanti sono i cosiddetti effetti di amplificazione di sito, ossia l'insieme delle variazioni in ampiezza, durata e contenuto in frequenza che un moto sismico, rispetto ad una formazione rocciosa di base, subisce attraversando gli strati sovrastanti, fino alla superficie. Tali effetti sono causati, essenzialmente, da un processo di intrappolamento e risonanza dell'energia del terremoto all'interno di un volume di sottosuolo costituito da materiali sedimentari a bassa impedenza sismica (IS: prodotto della velocità di propagazione dell'onda per la densità del mezzo attraversato) e posto sopra ad un dominio con più alta IS, per esempio un substrato roccioso o un suolo particolarmente rigido. L'identificazione delle aree soggette ad amplificazione sismica è dunque di fondamentale importanza per la pianificazione e lo sviluppo urbanistico comunale. Uno studio di questo genere prende il nome di Microzonazione Sismica ed ha lo scopo di individuare porzioni del territorio caratterizzate da comportamento sismico omogeneo.

La messa a punto di una procedura condivisa per lo studio di questi fenomeni è stata recentemente oggetto di un intenso lavoro di coordinamento e sintesi delle conoscenze finora disponibili da parte della Conferenza delle Regioni che, con il coordinamento del Dipartimento della Protezione Civile, ha messo all'opera una grande quantità di tecnici ed esperti per la messa a punto, nel 2008, degli **“Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica”** (figura 2.1).

Le prime esperienze regionali sulla microzonazione dopo vari eventi sismici e alcune normative regionali su tale ambito hanno rappresentato le condizioni preliminari per creare delle basi comuni e condivise, recependo quanto è stato elaborato e sperimentato a livello scientifico e sviluppando le istanze espresse in vario modo dalle Regioni e dalle amministrazioni.

Il gruppo di lavoro, coadiuvato anche dalle osservazioni da parte di soggetti esterni (Consiglio nazionale dei Geologi, Consiglio nazionale degli Ingegneri, Associazione Geotecnica Italiana, ecc.), nel corso della sua attività ha evidenziato che la sperimentazione e l'applicazione degli **“Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica”** rientra a pieno titolo nei programmi nazionali di previsione e prevenzione previsti dall'articolo 4 della legge n°225 del 24 Febbraio 1992.

Questo testo, che rappresenta un punto di riferimento per tutte le attività di microzonazione sismica ad opera degli Enti territoriali, definisce una serie di protocolli e tecniche di indagine del sottosuolo applicabile ai

settori della programmazione territoriale, della pianificazione urbanistica, della pianificazione dell'emergenza e della normativa tecnica per la progettazione.



*Figura 2.1- Copertina dell'elaborato "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica"*

In funzione dei diversi contesti, dei diversi obiettivi e delle disponibilità economiche le linee guida (Indirizzi e Criteri per la Microzonazione sismica) prevedono 3 differenti livelli di approfondimento, con complessità, impegno e costi crescenti.

**Livello 1:** è un livello propedeutico ai veri e propri studi di microzonazione sismica, in quanto consiste nella messa a punto di un quadro conoscitivo generale in base a dati preesistenti ed indagini a basso costo realizzate ex-novo. L'obiettivo è l'individuazione in pianta di una serie di settori definiti "microzone" all'interno dei quali è possibile ipotizzare un comportamento sismico dei terreni omogeneo.

**Livello 2:** introduce l'elemento quantitativo associato alle zone omogenee definite nel livello 1. A ciascuna microzona viene associato un fattore di amplificazione (FA) computato attraverso appositi abachi realizzati "ad hoc" per tutto il territorio regionale in base alle caratteristiche geologiche, geomorfologiche e sismiche.

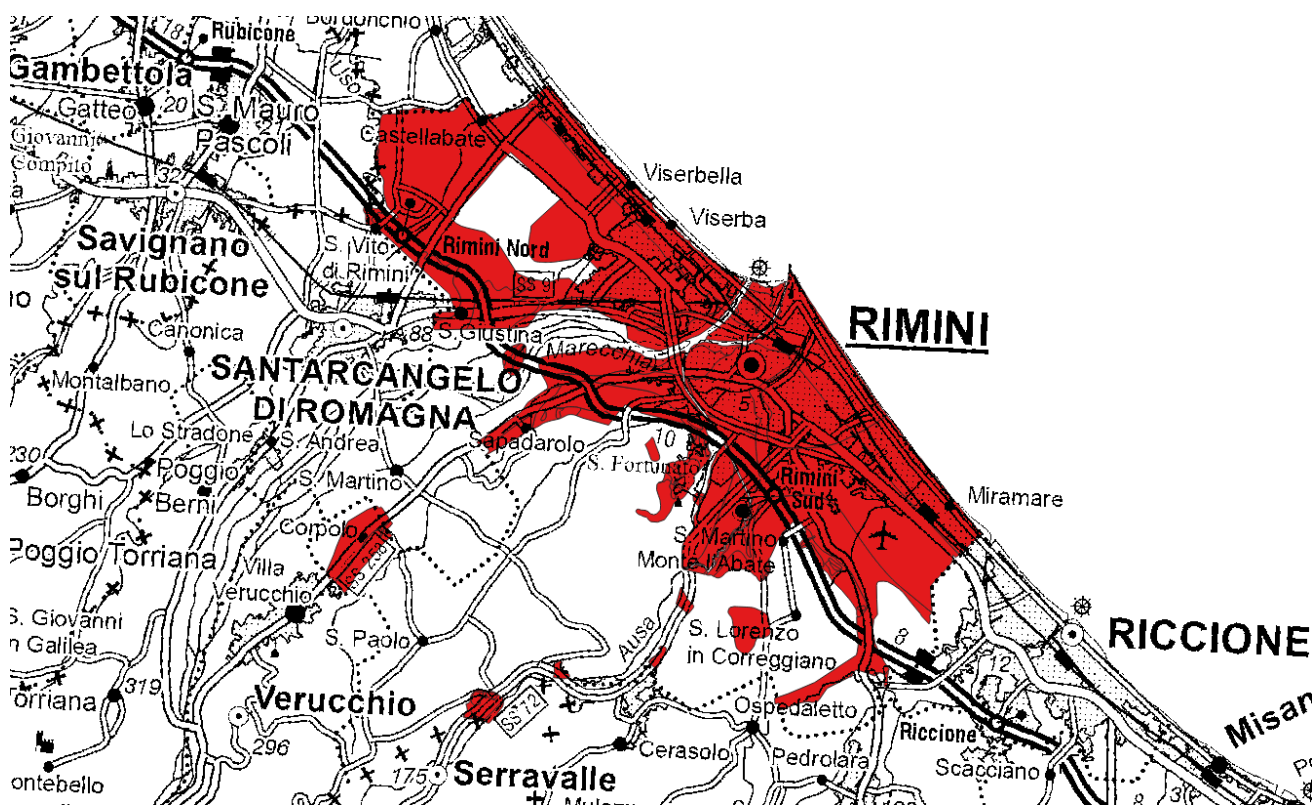
**Livello 3:** restituisce una carta di microzonazione sismica con approfondimenti su tematiche o aree particolari (p.es. fenomenologie legate a cedimenti e liquefazione).

Nel presente rapporto tecnico-scientifico vengono illustrati gli elaborati e i prodotti informatici relativi alle indagini e agli studi svolti nell'ambito della Microzonazione Sismica sino al III livello di analisi, delle aree urbanizzate e urbanizzabili presenti nel territorio comunale di Rimini (RN), (figura 2.2). In Tabella 2.1 è riportata una sintesi della documentazione e degli elaborati cartografici redatti per il presente studio:

*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Rimini (RN)*  
**Relazione Tecnico Illustrativa**

*Tabella 2.1 – sintesi della documentazione e degli elaborati cartografici in allegato alla relazione*

<b>Titolo Elaborato</b>	<b>Scala</b>	<b>N° tavole</b>
Carta delle Indagini	Scala 1:10.000	3
Carte delle Frequenze naturali dei Terreni (F0-A0, F1-A1, F2-A2,F3-A3)	Scala 1:10.000	12
Carta Geologico Tecnica	Scala 1:10.000	3
Carta delle MOPS	Scala 1:10.000	3
Carta delle Velocità delle onde di taglio S	Scala 1:10.000	3
Carta isopotenziali di liquefazione	Scala 1:10.000	3
Carte di Microzonazione sismica di II-III Livello	Scala 1:10.000	36



*Aree comunali oggetto di studio*

*Figura 2.2- Zone oggetto di studio nell'ambito del territorio urbanizzato/urbanizzabile del comune di Rimini.*

### **3. SISMICITA' STORICA E PERICOLOSITA' DI BASE**

Il territorio in studio del comune di Rimini interessa una vasta ed articolata area della Provincia di Rimini e si estende su un'area complessiva di 135,71 km<sup>2</sup>, contando 148 688 abitanti (Figura 3.1), contraddistinto dal Codice Istat: 099014.

Per la definizione della sismicità storica del territorio in studio è stato consultato il Database Macrosismico Italiano DBMI15 (Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Antonucci A. (2021). Database Macrosismico Italiano (DBMI15), versione 3.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/DBMI/DBMI15.3>). La successiva Tabella 3.1 riporta i principali eventi sismici (scosse principali "mainshock") risentiti nel comune in esame. Per ogni evento sismico sono riportate: data, area epicentrale, intensità epicentrale  $I_0$  (valori in scala MCS), magnitudo momento  $M_w$  (stimata da correlazioni empiriche o misurata) e intensità al sito  $I_s$  (MCS).



*Figura- 3.1: Evidenziato in rosso il territorio appartenente al comune di Rimini esteso dalla costa sino alla Repubblica di San Marino, oggetto del presente studio di MS.*



*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Rimini (RN)*  
Relazione Tecnico Illustrativa

Tabella 3.1 – Storia sismica del Comune di **RIMINI** (estratta dal DBMI15).

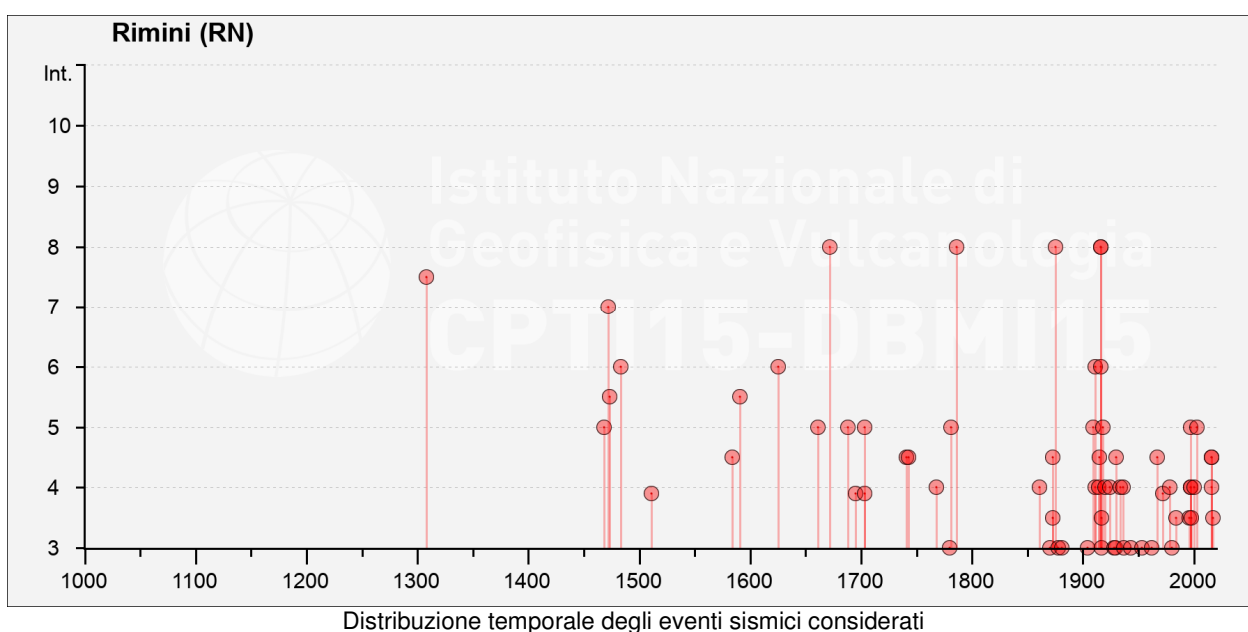
Effetti	In occasione del terremoto del									
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
7-8	1308	01	25	17	15		Rimini	1	7-8	5.33
5	1468	06	06	10	30		Romagna	3	4	3.70
7	1472						Rimini	1	7	5.10
5-6	1473	02	02				Rimini	1	5-6	4.40
6	1483	08	11	19	40		Romagna	14	8	5.69
F	1511	03	26	15	30		Friuli-Slovenia	120	9	6.32
4-5	1584	09	10	20	30		Appennino forlivese	17	9	5.97
5-6	1591	07	10				Romagna	6	6-7	5.13
6	1625	12	05				Rimini	1	6	4.63
5	1661	03	22	12	50		Appennino forlivese	79	9	6.05
8	1672	04	14	15	45		Riminese	92	8	5.59
5	1688	04	11	12	20		Romagna	39	8-9	5.84
F	1695	02	25	05	30		Asolano	107	10	6.40
F	1703	01	14	18			Valnerina	197	11	6.92
5	1703	02	02	11	05		Aquilano	69	10	6.67
4-5	1741	04	24	09	20		Fabrianese	135	9	6.17
4-5	1743	02	20				Ionio settentrionale	84	9	6.68
4	1768	10	19	23			Appennino forlivese	45	9	5.99
3	1780	05	25				Romagna	5	5-6	4.40
5	1781	04	04	21	20		Faentino	96	9-10	6.12
8	1786	12	25	01			Riminese	90	8	5.66
4	1861	10	16				Romagna	10	6-7	5.13
3	1870	10	30	18	34		Forlivese	41	8	5.61
4-5	1873	03	12	20	04		Appennino marchigiano	196	8	5.85
3-4	1873	06	29	03	58		Alpago Cansiglio	197	9-10	6.29
NF	1874	10	07				Imolese	60	7	4.96
8	1875	03	17	23	51		Costa romagnola	144	8	5.74
3	1878	03	12	21	36		Bolognese	31	6	4.84
3	1881	09	28				Cesena	24	6-7	4.71
3	1904	11	17	05	02		Pistoiese	204	7	5.10
5	1909	01	13	00	45		Emilia Romagna orientale	867	6-7	5.36
NF	1909	08	25	00	22		Crete Senesi	259	7-8	5.34
4	1911	02	19	07	18	30	Forlivese	181	7	5.26
6	1911	03	26	13	51		Riminese	9	5	5.04
NF	1913	11	25	20	55		Appennino parmense	73	4-5	4.65
4	1914	10	27	09	22		Lucchesia	660	7	5.63
4-5	1915	01	13	06	52	43	Marsica	1041	11	7.08
8	1916	05	17	12	50		Riminese	132	8	5.82
6	1916	06	16	01	27		Riminese	17	6	4.82
8	1916	08	16	07	06	14	Riminese	257	8	5.82
2	1916	11	16	06	35		Alto Reatino	40	8	5.50

*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Rimini (RN)*  
Relazione Tecnico Illustrativa

Effetti	In occasione del terremoto del									
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
3	1917	04	26	09	35	59	Alta Valtiberina	134	9-10	5.99
3-4	1917	12	02	17	39		Appennino forlivese	32	6-7	5.09
5	1918	11	10	15	12	28	Appennino forlivese	187	9	5.96
4	1920	09	07	05	55	40	Garfagnana	750	10	6.53
4	1924	01	02	08	55	13	Senigallia	76	7-8	5.48
2	1926	01	01	18	04	03	Carniola interna	63	7-8	5.72
3	1928	05	30	20	01		Senigallia	17	5	5.02
3	1929	04	10	05	44		Bolognese	87	6	5.05
4-5	1930	10	30	07	13		Senigallia	268	8	5.83
4	1934	11	30	02	58	23	Adriatico settentrionale	51	5	5.30
4	1936	10	18	03	10		Alpago Cansiglio	269	9	6.06
3	1937	11	26	21	58	30	Costa pesarese	7	5	4.16
3	1943	10	03	08	28	29	Ascolano	170	8	5.67
3	1953	12	14	07	11	06	Appennino forlivese	48	5-6	4.70
2	1961	05	08	22	45	51	Forlivese	40	5	4.37
3	1962	01	23	17	31		Costa pesarese	49	5	4.35
NF	1962	08	30	06	27	07	Montefeltro	23	6-7	4.76
4-5	1967	12	30	04	19		Emilia Romagna orientale	40	6	5.05
F	1972	11	30	11	25	2	Costa pesarese	30		4.52
4	1978	12	05	15	39	04	Romagna	34	4-5	4.61
3	1980	11	23	18	34	52	Irpinia-Basilicata	1394	10	6.81
2	1983	11	09	16	29	52	Parmense	850	6-7	5.04
3-4	1984	04	29	05	02	59	Umbria settentrionale	709	7	5.62
NF	1986	12	06	17	07	1	Ferrarese	604	6	4.43
NF	1993	11	07	23	21	1	Cesenate	36	4-5	3.95
3-4	1996	10	15	09	55	5	Pianura emiliana	135	7	5.38
4	1997	09	26	00	33	1	Appennino umbro-marchigiano	760	7-8	5.66
5	1997	09	26	09	40	0	Appennino umbro-marchigiano	869	8-9	5.97
4	1997	10	14	15	23	1	Valnerina	786		5.62
3-4	1998	04	05	15	52	2	Appennino umbro-marchigiano	395		4.78
2	1999	01	25	22	45	5	Appennino forlivese	97	5	4.36
2-3	2000	05	08	12	29	0	Faentino	126	5	4.67
2-3	2000	05	10	16	52	0	Faentino	151	5-6	4.82
4	2000	08	01	02	34	31	Montefeltro	84	5-6	4.27
2	2001	11	26	00	56	5	Casentino	211	5-6	4.63
5	2003	12	07	10	20	3	Forlivese	165	5	4.18
NF	2006	10	21	07	04	1	Anconetano	287	5	4.21
4-5	2016	08	24	01	36	32	Monti della Laga	221	10	6.18
4	2016	10	26	19	18	0	Valnerina	77		6.07
4-5	2016	10	30	06	40	1	Valnerina	379		6.61
3-4	2017	01	18	10	14	9	Aquilano	280		5.70

*Estratto della tabella esplicativa riportante i parametri che costituiscono il formato sintetico del database:*

<b>Field Description</b>	<b>Se</b> Origin time: seconds
<b>N</b> Record number (in chronological order)	<b>EpicentralArea</b> Epicentral area or area of the largest macroseismic effects
<b>Year</b> Origin time: year	<b>Mw</b> moment magnitude
<b>Mo</b> Origin time: month	<b>NMDP</b> Number of macroseismic data point
<b>Da</b> Origin time: day	<b>Imax</b> Maximum intensity
<b>Ho</b> Origin time: hour	<b>Io</b> Epicentral intensity
<b>Mi</b> Origin time: minutes	*N.F (not felt-non avvertito)



L'esame della storia sismica indica quali eventi di maggior rilevanza: il terremoto "Riminense" del 1308, 1472, 1672, 1786, 1875 e del 1916. Tali sismi hanno generato in prossimità della zona epicentrale il massimo risentimento e danno ( $VII \leq I_s \leq VIII$  MCS); l'ultimo evento, in termini temporali, di maggior risentimento significativo è stato quello del Riminese 1916, di cui in fig. 3.2 a) e b) viene riproposto lo stralcio della carta dei risentimenti macrosismici INGV rispettivamente per gli eventi principali del 17 maggio e 16 agosto 1916. Inoltre in fig. 3.3 si propongono le carte delle isosisme ricostruite da INGV per i maggiori terremoti storici della Romagna.

Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Rimini (RN)  
 Relazione Tecnico Illustrativa

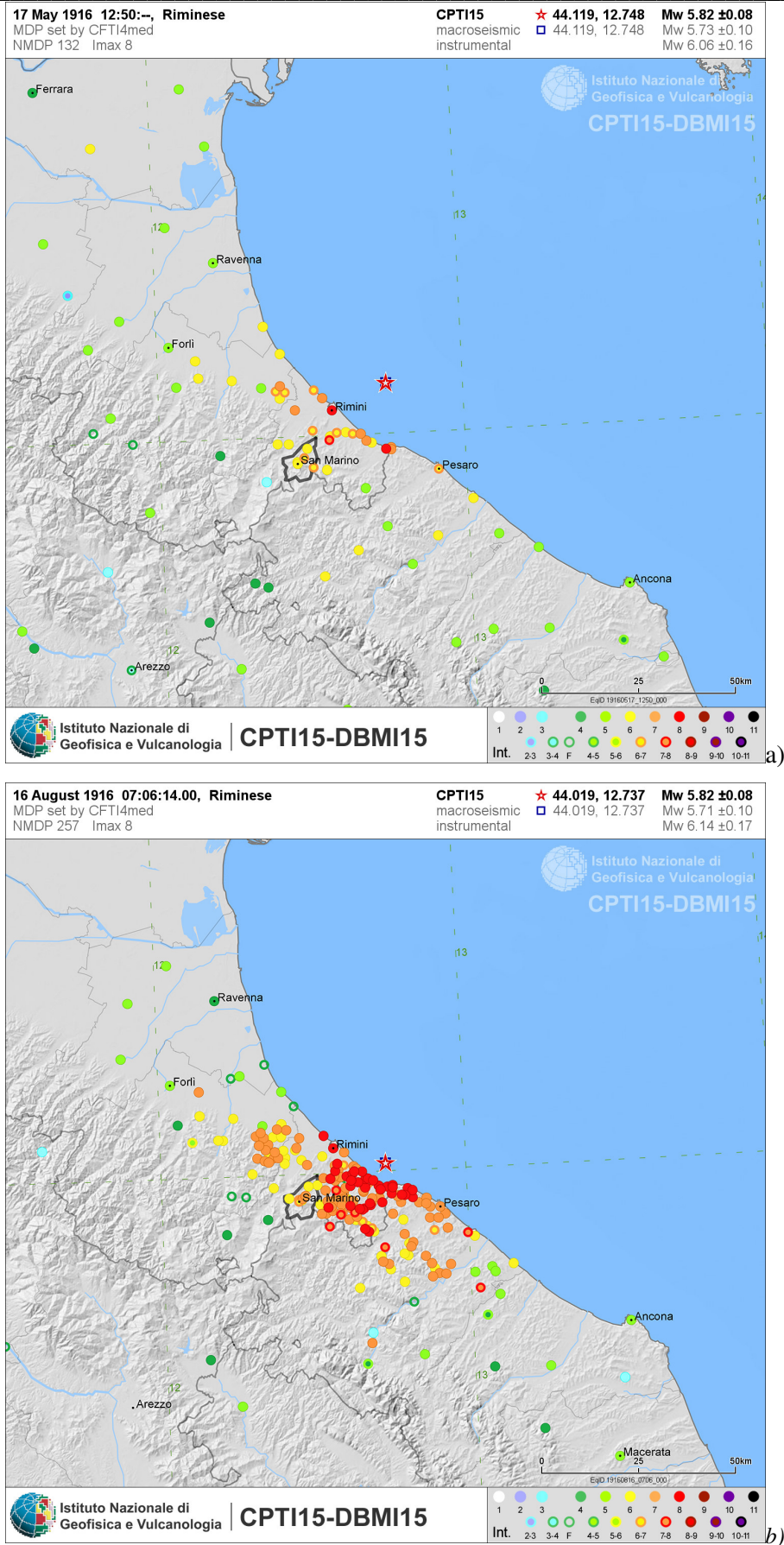
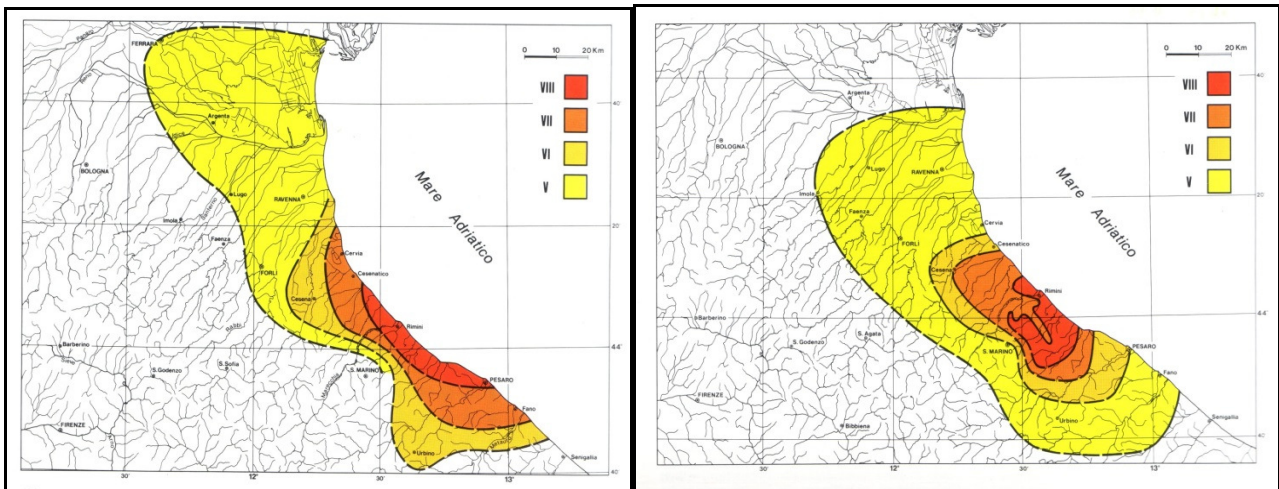
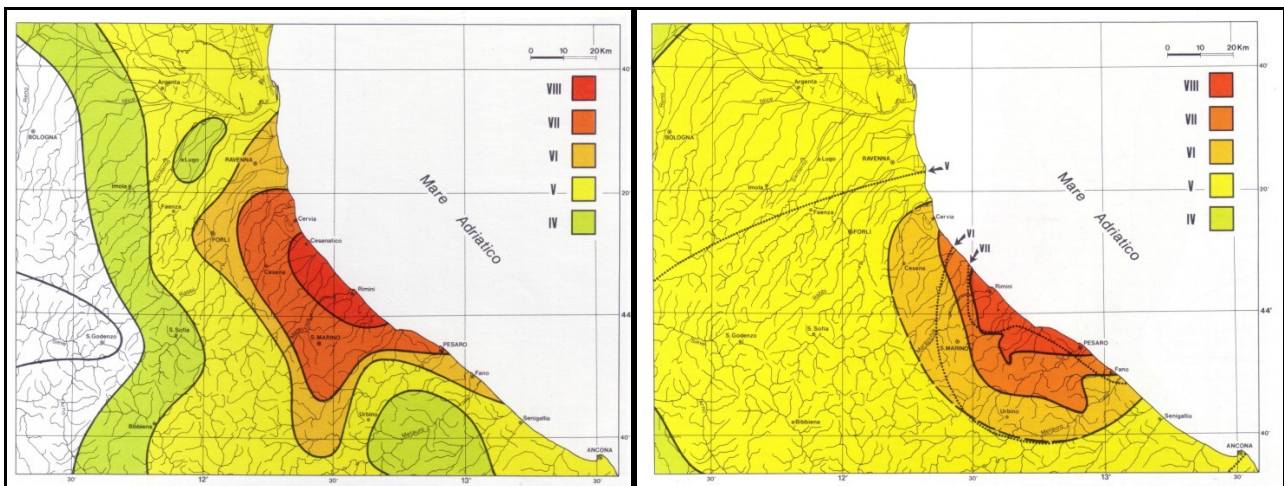


Figura- 3.2: Carta del risentimento macrosismico – terremoto Riminese eventi maggio/agosto 1916 - DBMI15 (a e b)



**Terremoto del 14 aprile 1672**

**Terremoto del 25 dicembre 1786**



**Terremoto del 17 marzo 1875**

**Terremoto del 17 maggio – 16 agosto 1916**

*Figura - 3.3: Carte delle isosisme in cui le aree colorate dal rosso al verde corrispondono a parti di territorio colpite da effetti di severità decrescente. (DISS3/INGV).*

In base alla disposizione degli epicentri, nonché da una verifica sul database DISS 3.2 (Database of Individual Seismogenic Sources) realizzato dall'INGV, è possibile risalire alle aree sismogenetiche che hanno particolarmente contribuito alla sismicità storica della zona in studio ed alla pericolosità sismica dell'area (vedi fig. 3.4); in tal caso si tratta di sistemi di faglia appenninici e costieri prevalentemente di natura compressiva.

Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Rimini (RN)  
Relazione Tecnico Illustrativa

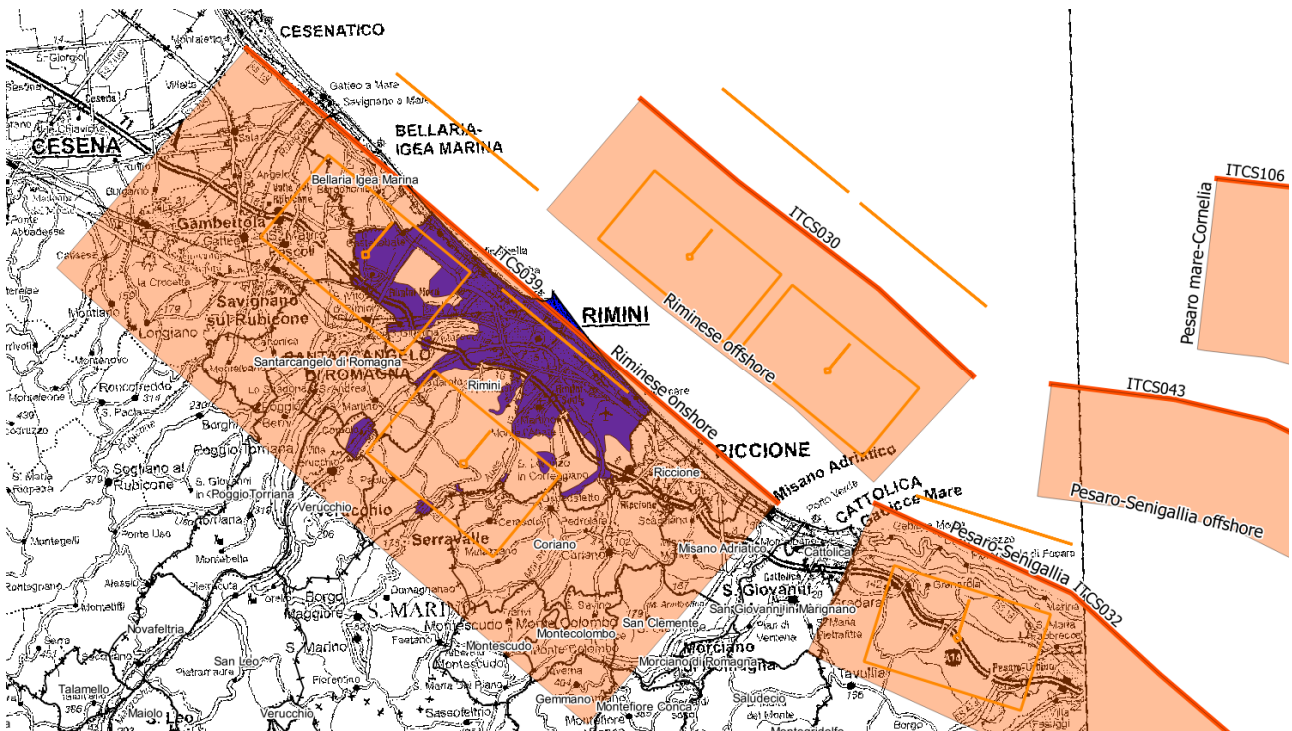
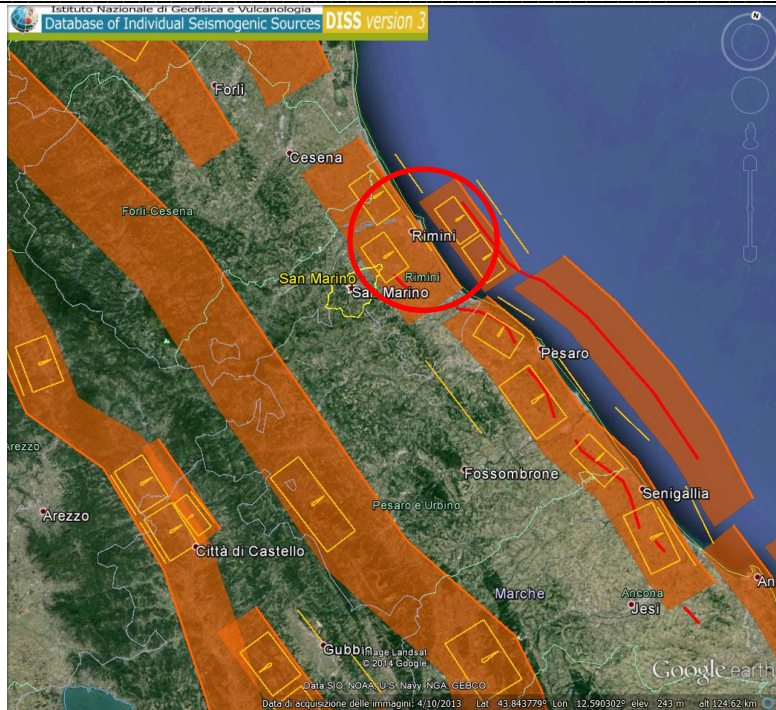


Figura – 3.4: Sorgenti sismogenetiche (Id-Nome-Max Magnitudo) individuate dal catalogo DISS (Database of Individual Seismogenic Sources) dell’Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

Come riportato da “La sismicità della zona costiera adriatica nord-marchigiana di Stefano Mazzoli e Chiara Macchiavelli” si trae che studi effettuati in tempi recenti da gruppi di ricerca (Borraccini et alii, 2002, 2005; Di Bucci et alii, 2003; Santini et alii, 2011; Macchiavelli et alii, 2012), la sismicità della zona costiera e delle Marche settentrionali mostra un comportamento complesso, caratterizzato da una notevole variabilità delle orientazioni degli assi di massima e minima compressione (Fig. 3.5)

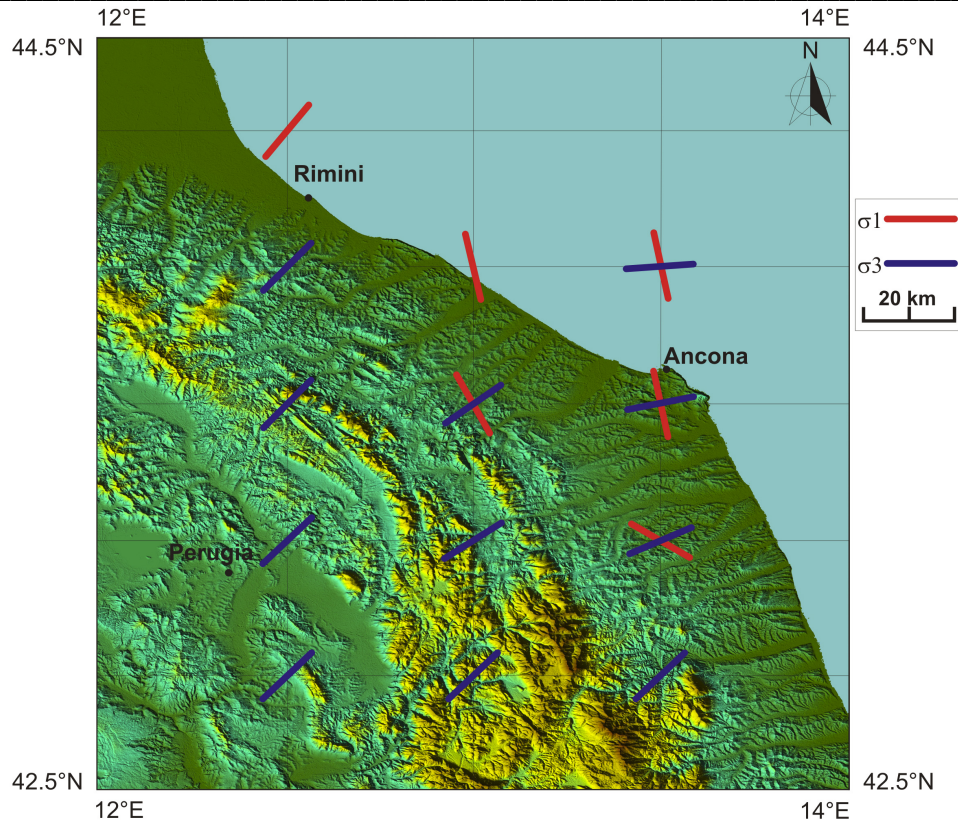


Figura 3.5 – Proiezione in mappa degli assi di massima compressione ( $\sigma_1$ ) e minima compressione ( $\sigma_3$ ) per l'area umbro-marchigiano-romagnola (da Macchiavelli et alii, 2012).

Nonostante un notevole dibattito scientifico esista circa la cinematica delle faglie attive ed campo di stress attualmente dominante nell'area d'interesse (Frepoli & Amato, 1997, 2000; Montone et alii, 1999, 2004, 2012; Boncio et alii, 2000; Di Bucci & Mazzoli, 2002; Vannoli et alii, 2004; Chiarabba et alii, 2005; Pondrelli et alii, 2006; Basili et al., 2007; Boncio & Bracone, 2009; Piccinini et alii, 2009; Pierdominici et alii, 2012; Macchiavelli et alii, 2012), tutti gli Autori concordano sul fatto che le faglie attive principali che controllano la sismicità dell'area siano rappresentate da strutture con direzione circa parallela alla costa e immersione dominante verso sud-ovest (costituite, almeno originalmente, da faglie inverse).

Inoltre dai diagrammi di disaggregazione per magnitudo (M) e distanza (R) in Figura 3.6 ( $T_r$  475 anni), desunti dal Progetto DPC-INGV-S1 (2006) e Iervolino et Al. 2011, si osserva come i maggiori contributi alla pericolosità dell'area siano legati al sistema di faglie costiere adriatiche (onshore e offshore) entro i 20 Km di distanza (valore medio  $R < 10$  km). In maniera minore sembrano intervenire, quindi, i grandi sistemi appenninici conosciuti in letteratura come Etrurian Fault System (EFS) e Umbria Fault System.

*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Rimini (RN)*  
 Relazione Tecnico Illustrativa

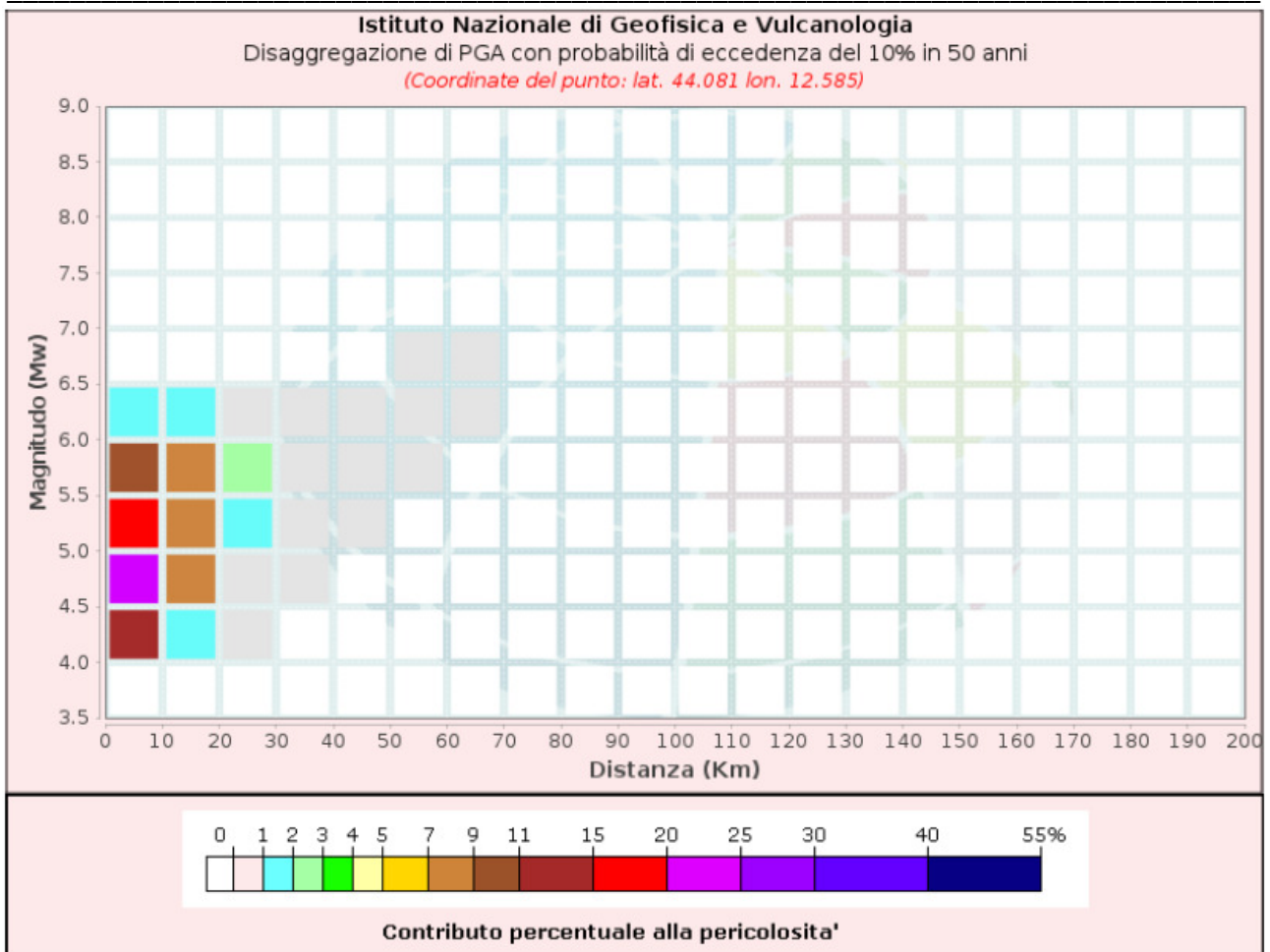


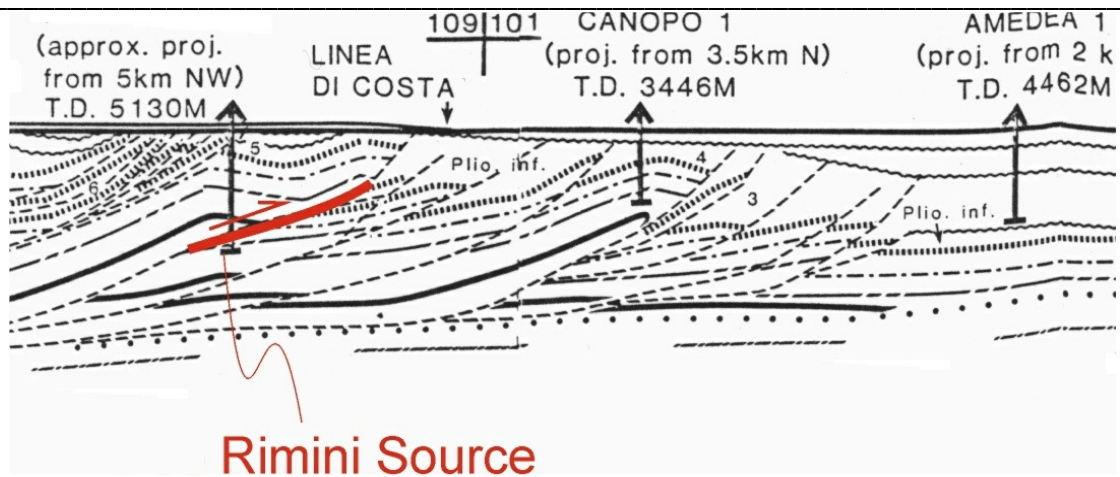
Figura 3.6–Diagramma di disaggregazione riferito alla zona baricentrale dell'area comunale di Rimini

Nelle tabelle 3.7, 3.8 e 3.9 vengono indicate le caratteristiche generali dei principali sistemi sismogenetici composti **ITCS030-032-039** sulla base di evidenze empiriche e dati di letteratura da catalogo DISS 3.2:

Tabella 3.7 Principali parametri della sorgente sismogenetica ITCS039 (da DISS 3.2).

<b>ITCS039 – RIMINESE ONSHORE</b>	
Min Depth (km)	2
Max Depth (km)	10
Strike (deg)	120 - 140
Dip (deg)	25 - 35
Rake (deg)	80 - 100
Slip Rate (mm/y)	1.0 - 1.07
Max Magnitude (Mw)	5.9

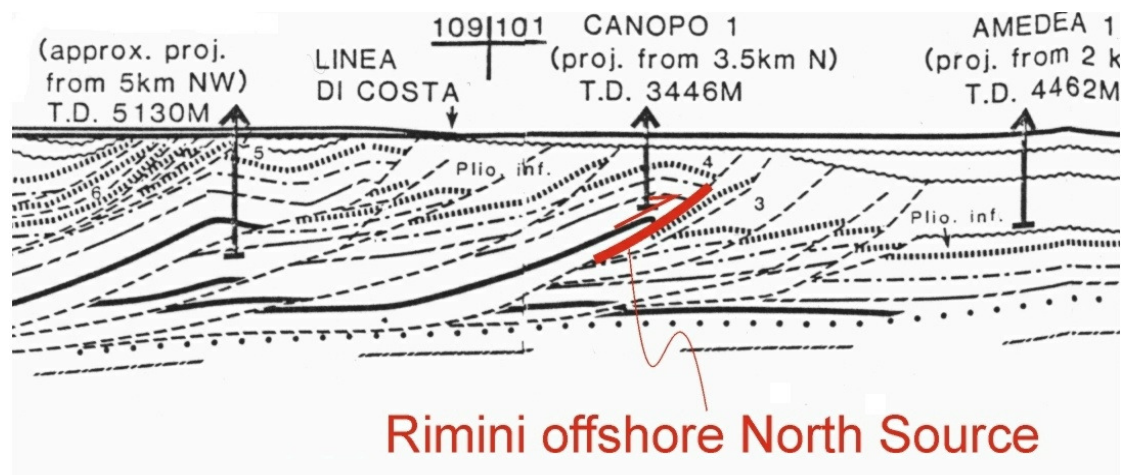




Sorgente sismogenetica ITC039 - Riminese "on-shore" proiettata su Sezione Amedea-M.te.Amiata di Bally et al. [1986]. Basili, R., U. Fracassi and S. Mariano 2006

Tabella 3.8 Principali parametri della sorgente sismogenetica ITCS030 (da DISS 3.2).

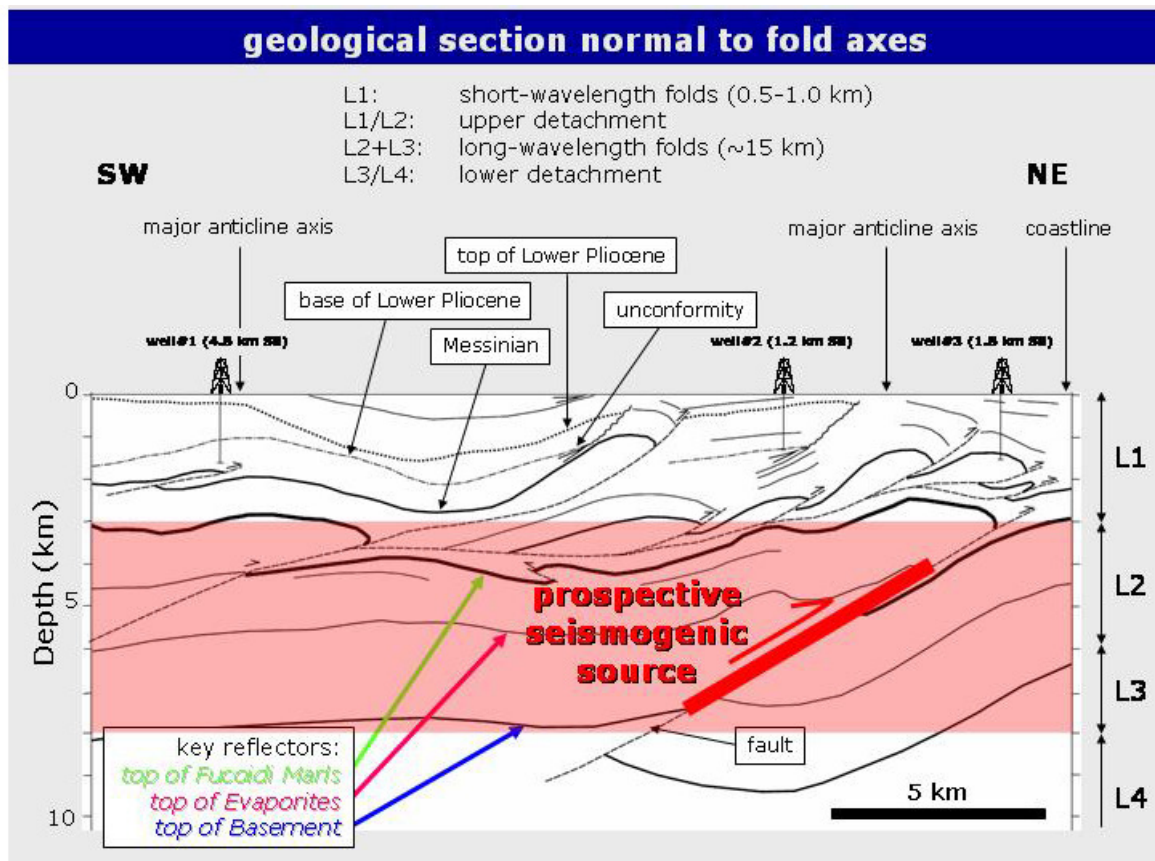
<b>ITCS030 – RIMINESE OFFSHORE SOUTH</b>	
Min Depth (km)	3
Max Depth (km)	7
Strike (deg)	120 - 140
Dip (deg)	25 - 35
Rake (deg)	80 - 100
Slip Rate (mm/y)	0.2 - 0.52
Max Magnitude (Mw)	6.1



Sorgente sismogenetica ITC030 - Riminese "off-shore" proiettata su Sezione Amedea-M.te.Amiata di Bally et al. [1986]. Basili, R., U. Fracassi and S. Mariano 2006.

Tabella 3.9 Principali parametri della sorgente sismogenetica ITCS032 (da DISS 3.2).

<b>ITCS032 – PESARO-SENIGALLIA</b>	
Min Depth (km)	3
Max Depth (km)	7.5
Strike (deg)	105 - 145
Dip (deg)	25 - 35
Rake (deg)	80 - 100
Slip Rate (mm/y)	0.2 – 0.52
Max Magnitude (Mw)	6.1



Hypothetical location of the Senigallia earthquake source based on a seismic reflection profile. The correlative fault is a main thrust which generates long-wavelength folds, (From Basili et al. [2004]).

Infine per quanto attiene la stima dei valori di Mw attesi nell'area può essere utilizzato lo studio ZS9 del 2004 ("Gruppo di Lavoro per la redazione della Mappa della Pericolosità Sismica" dell'INGV), il quale è una rielaborazione della precedente sismozonazione ZS4 (Meletti et al, 2000), ripensata in base sia a nuove valutazioni del potenziale sismogenetico sia rispetto a nuove analisi eseguite sui terremoti storici e considerazioni statistiche.

La zona di studio ricade prevalentemente entro la zona "Rimini-Ancona" definita come ZS n. 917 (ad est), tuttavia una piccolissima porzione sudoccidentale risulta rientrare nella n. 918 denominata "Medio-Marchigiana/Abruzzese" (ad ovest), come evidenziato in figura 3.7.

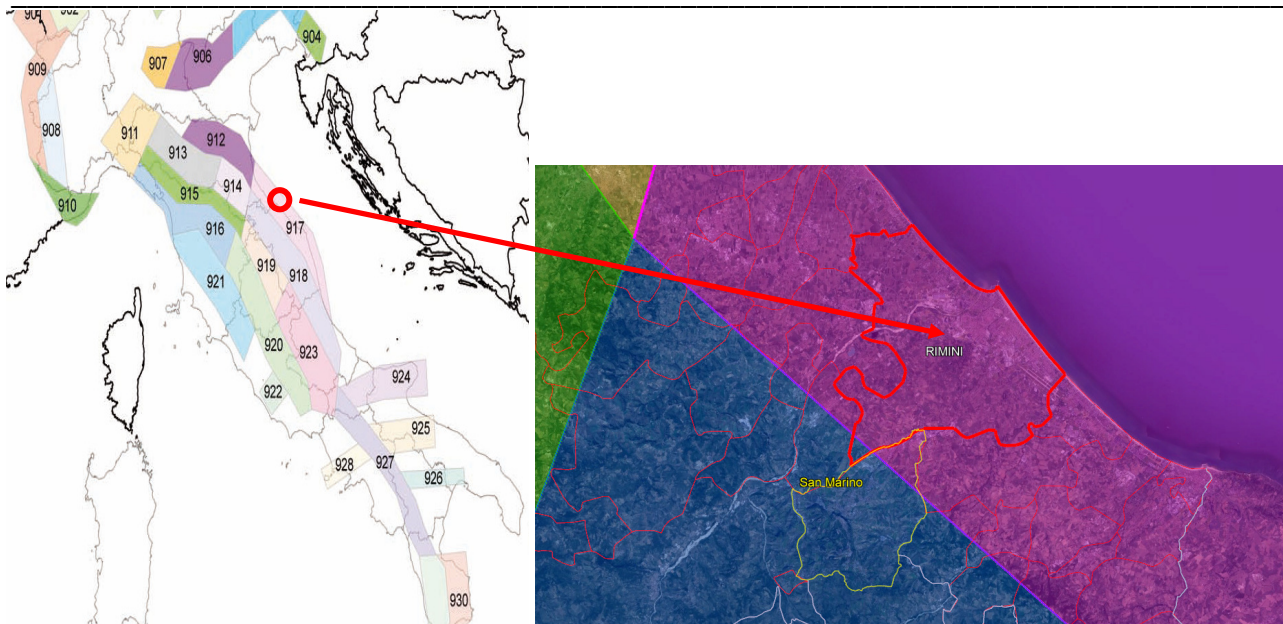


Figura 3.7–Dettaglio della Zonazione Sismogenetica ZS9 (“Gruppo di Lavoro per la redazione della Mappa della Pericolosità Sismica” dell’INGV, 2004). Evidenziata in viola la ZS n. 917 “Rimini-Ancona” ed in celeste la ZS n. 918 “Medio-Marchigiana/Abruzzese”.

Le caratteristiche associate a tali zone prevedono:

- Un meccanismo focale prevalente.
- Una Magnitudo Momento Massima “Osservata” ( $M_w\text{-max1}$ ) definita sia dalle analisi legate agli eventi storici sia su basi geologiche legate al Database of Individual Seismogenic Sources (DISS).
- Una Magnitudo Momento Massima “Cautelativa” ( $M_w\text{-max2}$ ) definita aggiungendo un margine di sicurezza rispetto alla  $M_w\text{-max1}$  in relazione alle conoscenze strutturali, geofisiche e sismologiche.

Zone	917	918
Meccanismo focale	inverso	indeterminato
Mw-Max	6.14	6.37

Tali valori risultano sostanzialmente in linea con la recente carta sismotettonica della Regione Emilia Romagna – Edizione 2016, di cui in figura 3.8a e 3.8b se ne riporta uno stralcio illustrativo.

Anche in quest’ultima zonazione proposta dalla regione le aree in studio ricadono pienamente nella Zona 4 (mentre una piccolissima appendice meridionale del territorio comunale ricade a cavallo delle zone 17 e 20), per la quale i meccanismi focali associabili alle principali faglie attive risultano prevalentemente di tipo inverso, con una orientazione caratteristica SW/30 (direzione di immersione) e profondità ipocentrali comprese fra 5-15 km; la magnitudo massima ivi osservata storicamente risulta pari a  $M_w=6.1$ , mentre quella massima calcolata per scenari futuri, sulla base dei modelli di analisi adottati, porta a valori pari a  $M_w\text{max}= 6.16\pm 0.21$ .

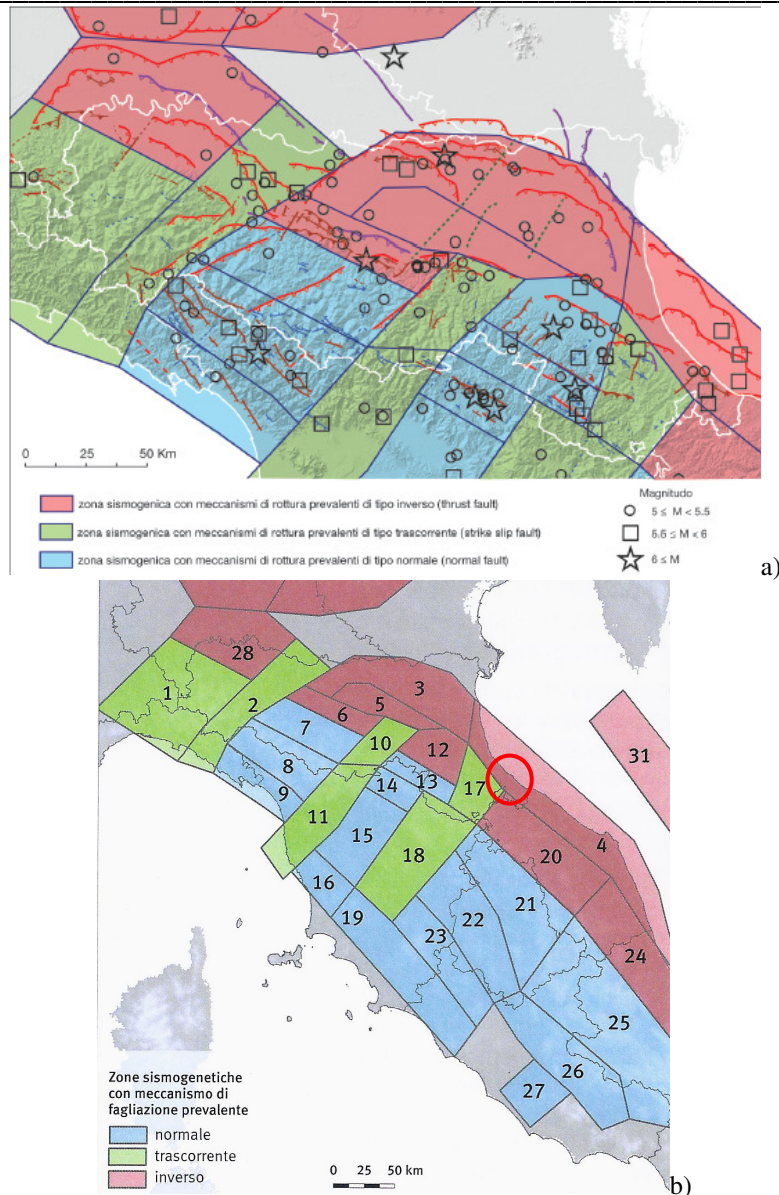


Fig. 3.8 - Stralcio cartografia zonazione carta sismotettonica 2016 Emilia Romagna (a-b)

In conclusione si può osservare come ben pochi dei terremoti significativi verificatisi nella storia sismica del riminese e lungo la costa del Comune di Rimini abbiano presentato delle magnitudo inferiori a 5/5.5 e grado di intensità MCS<7-8. Pertanto, considerati i cataloghi storici e le relative incertezze, gli studi dell'INGV, la zonazione ZS9 e le indicazioni I.C.M.S. nonché la recente Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna, in relazione alle finalità e tipologia di studio, si ritiene adeguata una magnitudo momento massima di riferimento pari a **Mw=6.16**.

In figura 3.10 invece viene riportato un ulteriore dettaglio dell'area. Oltre alle zone sismogenetiche individuate dal DISS (Database of Individual Seismogenic Sources) dell'Istituto di Geofisica e Vulcanologia, in quest'altra figura vengono visualizzati gli andamenti delle principali faglie attive e capaci tratte dal catalogo *ITHACA* (ITHACA Working Group (2019). *ITHACA (Italy HAZard from Capable faulting), A database of active capable faults of the Italian territory. Version December 2019. ISPRA Geological Survey of Italy. Web Portal <http://sgi2.isprambiente.it/ithacaweb/Mappatura.aspx>*).

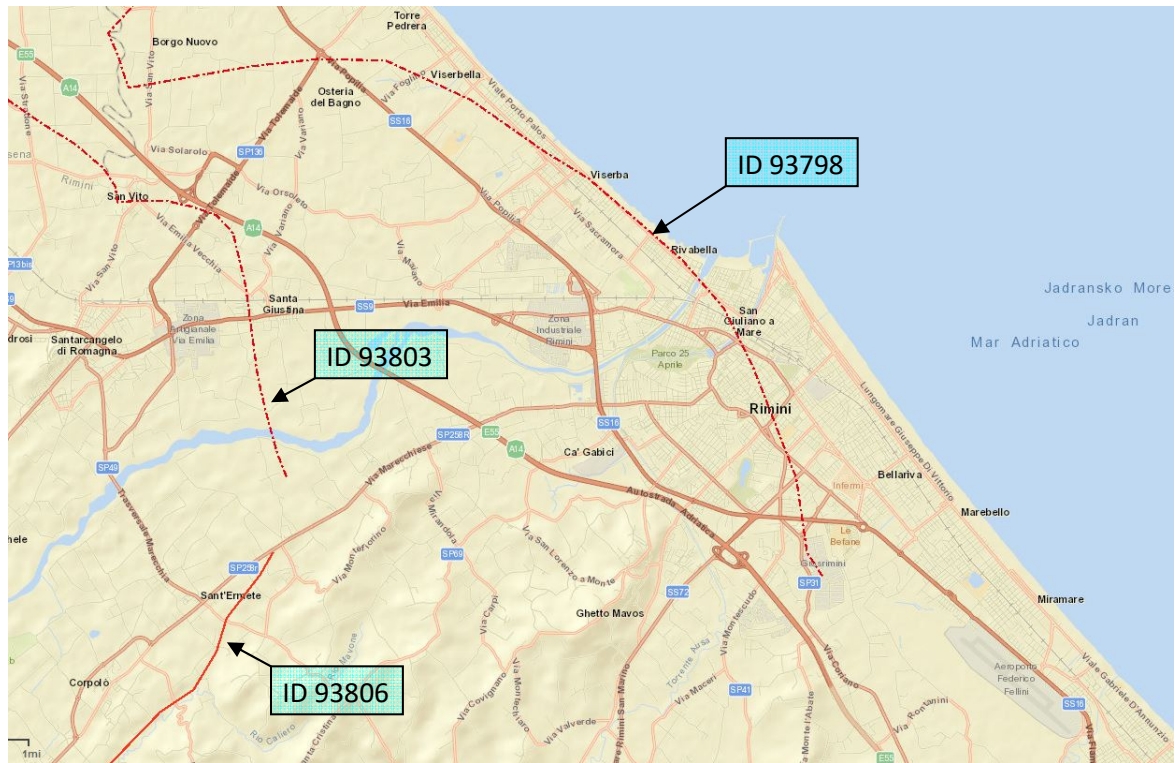


Figura 3.10 – Dettaglio catalogo ITHACA delle faglie attive e capaci e relativo codice identificativo.

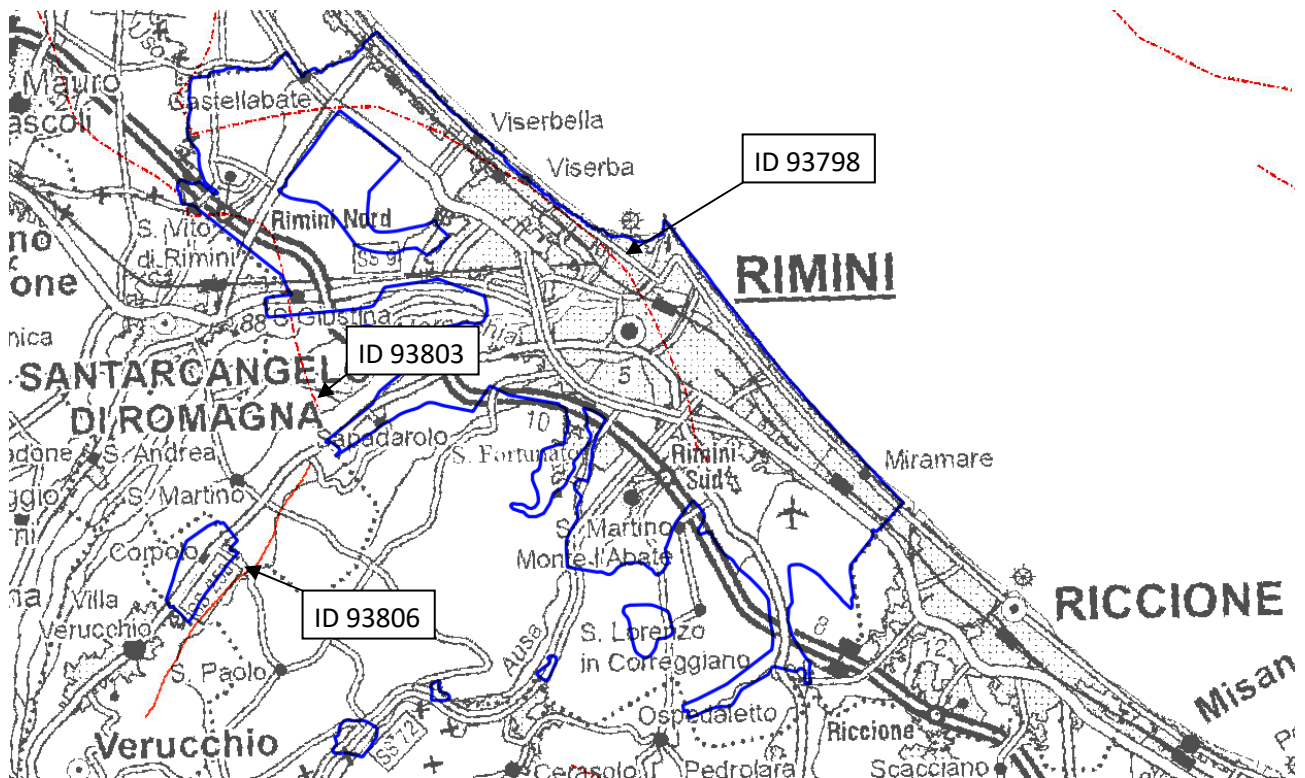


Figura 3.11 – Sovrapposizione faglie capaci ITHACA con le aree oggetto di studio (poligoni blu).

Dalle figure 3.10-3.11 si evince come il territorio comunale venga interessato da due strutture di faglia con cinematisimo “inverso”, con direzione NW-SE, denominate “Rimini-Ravenna” (Fault code 93798) e “Sant’Arcangelo di Romagna - Ravenna” (Fault code 93803), nonché da un elemento minore a cinematisimo “normale”, orientato NE-SW, denominato “F. Marecchia – Ravenna” (Fault code 93806); tuttavia i dati disponibili nel catalogo ITHACA riportano una scarsa conoscenza di tali strutture, trattandosi di sovrascorrimenti profondi post-tortoniani dedotti (secondo carta geologica Web-Gis Emilia Romagna), così come non ci sono evidenze superficiali né elementi noti su recenti attività, per cui la qualità delle informazioni è ritenuta bassa.

In conseguenza di ciò si può affermare che nel territorio oggetto di studio non vi siano situazioni accertate riconducibili a “zone di faglia attiva e capace” in grado di condizionare la pericolosità sismica locale e che, pertanto, possano essere segnalate negli studi di Microzonazione Sismica, come previsto negli I.C.M.S. (gruppo di lavoro MS 2008), nella versione 1.0 a titolo “Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da faglie attive e capaci FAC”.

Per completare l’inquadramento sismico dell’area, in accordo con quanto descritto nell’Allegato A4 alla Delibera di G.R. 630/2019, come aggiornata dalla *DGR 476/2021 e successiva integrazione DGR 564/2021*, per ciascuna zona significativa interna al Comune in studio è possibile, infine, calcolare lo spettro di risposta elastico a probabilità uniforme che descrive le caratteristiche del moto sismico atteso per un periodo di ritorno di 475 anni (con smorzamento pari al 5%) a partire da un moto di riferimento al bedrock ( $a_{refg}$ ).

La definizione del moto sismico di riferimento (in termini di PGA0 al bedrock) si basa sui valori di pericolosità elaborati da INGV per il territorio nazionale resi disponibili per il territorio regionale sui punti di una griglia con passo 0.05 gradi (circa 5.5 km) nel sito web del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, tema “Sismica Microzonazione Sismica”.

Il valore di  $a_{refg}$  (PGA0) relativo a ciascun sito analizzato si ottiene interpolando i valori di  $a_{refg}$  definiti nei punti della griglia più prossimi al sito o utilizzando il valore del punto della griglia più vicino. Tale valore corrisponde all’accelerazione di ancoraggio prevista al bedrock per lo spettro elastico normalizzato e per cui:

- la forma dello spettro di risposta normalizzato è rappresentativo del moto sismico atteso per un periodo di ritorno di 475 anni (con smorzamento pari al 5%);
- i valori di  $a_{refg}$  di ogni comune sono riferiti al 10% di probabilità di superamento in 50 anni;

In figura 3.12 viene illustrato uno stralcio di insieme della griglia di punti con i valori di  $a_{refg}$  di riferimento sostanzialmente derivato dal progetto DPC-INGV-S1, mentre in figura 3.13 viene illustrato un particolare ingrandito dei punti prossimi alla costa, utilizzati in modo specifico per le analisi di RSL di III Livello presso ciascuna zona omogenea.

Da tale disamina si evince che, muovendosi nell’ambito del territorio, il valore arrotondato di  $a_{refg}$  (PGA0) può variare localmente ed in misura modesta da  $a_{refg} = 0.183$  (ag/g) a  $a_{refg} = 0.184$  (ag/g).

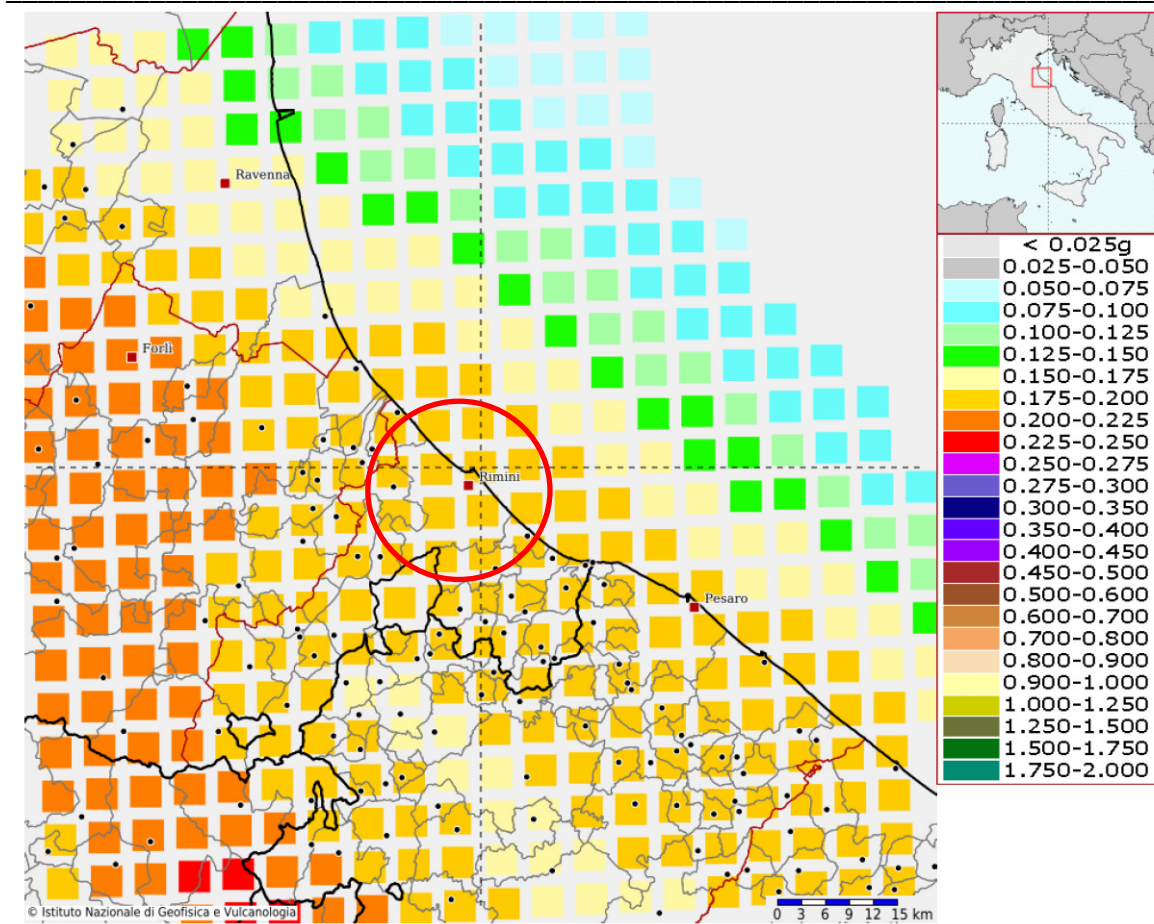


Figura 3.12 – Stralcio griglia punti di analisi PGA0 attraverso disaggregazione, progetto DPC-INGV-S1 Web-Gis.



Figura 3.13 – Dettaglio griglia punti di analisi PGA0 Utilizzati per le analisi di MS3 lungo le zone costiere.

## 4. ASSETTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO DELL'AREA

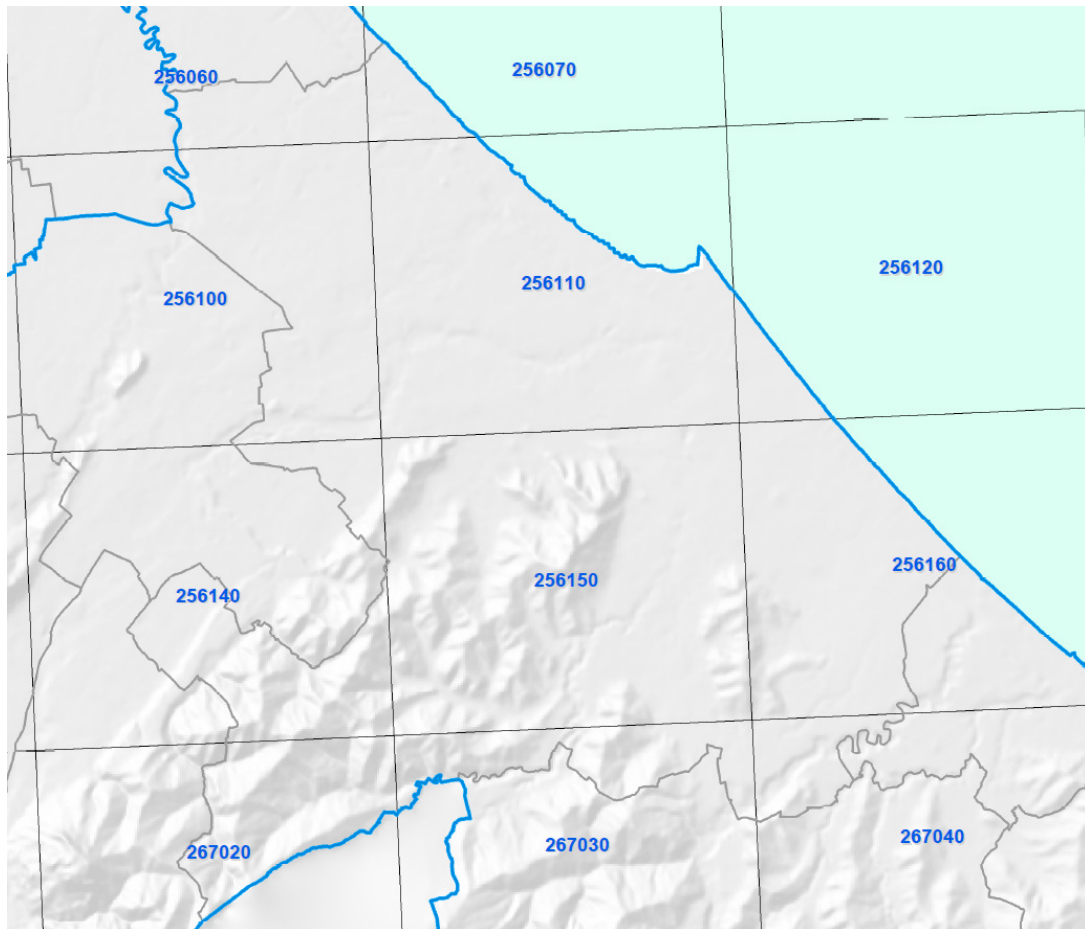
### 4.1. Cartografia di base

Al fine di realizzare un corretto inquadramento del sito di interesse, è stata reperita la seguente documentazione pregressa:

- Carta Geologica D'Italia Foglio 256 (Rimini) e 267 (San Marino) scala 1:50.000 (Progetto Carg).
- Banca Dati della Carta Geologica in scala 1:10.000 della Regione Emilia-Romagna.
- Quadro Conoscitivo PTCP2007-Variante 2012 Rimini
- Il Paesaggio Geologico dell'Emilia-Romagna della Regione Emilia-Romagna - Servizio Geologico, sismico e dei suoli Anno 2009.
- PSC del Comune di Rimini.

### 4.2. Inquadramento geomorfologico

Il territorio del comune di Rimini è caratterizzato da una morfologia alquanto eterogenea che interessa aree di piana costiera, pianeggianti intravallive e rilievi collinari.



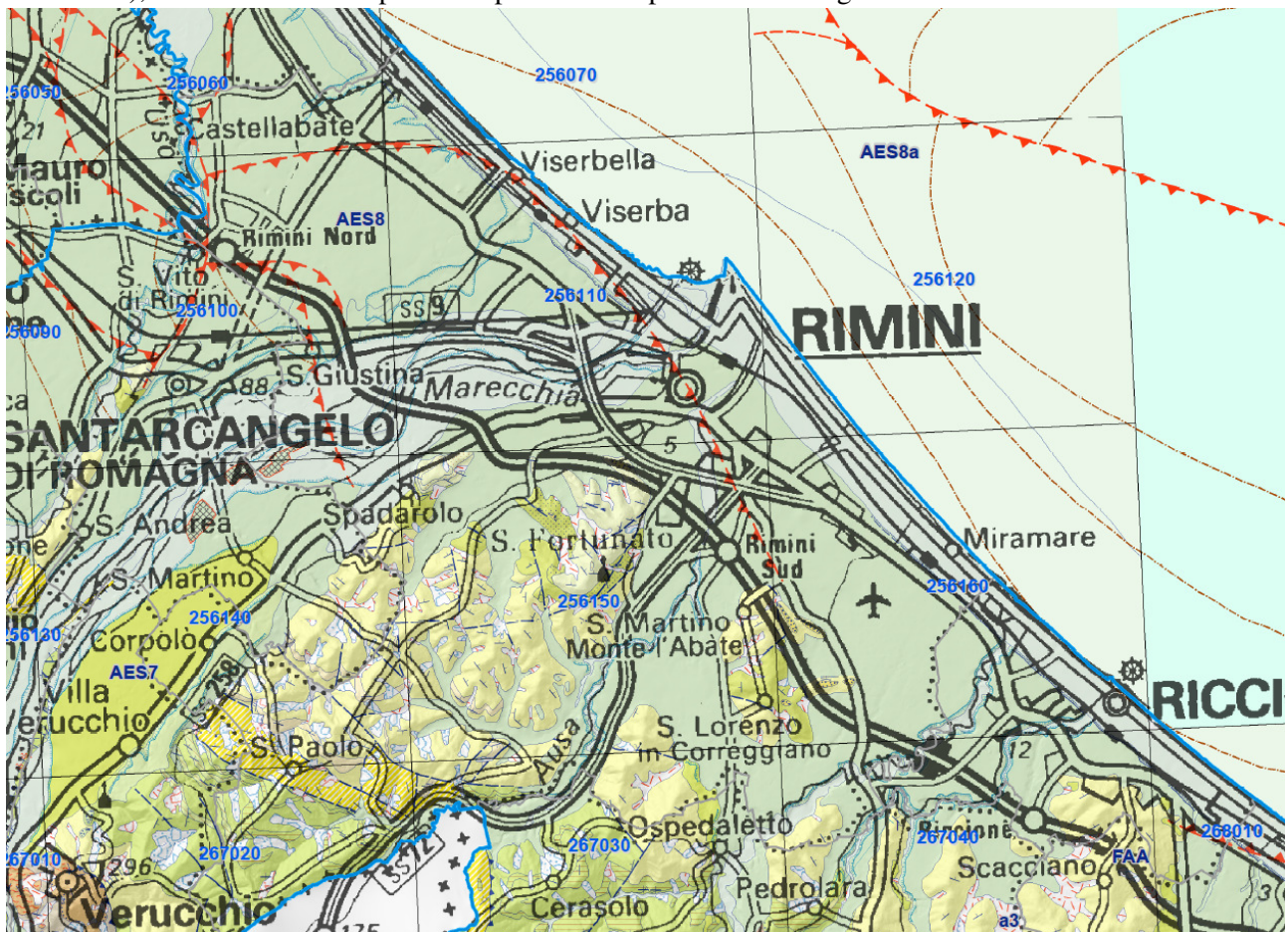
Assetto morfologico del territorio del Comune di Rimini



Come si può osservare dalla carta sopra riportata, la parte nord orientale del territorio in studio è caratterizzata principalmente da una morfologia costiera prossima al livello del mare, modellata dai processi fluviali e dall'interazione con le correnti costiere. Subito alle spalle (procedendo verso SW) si ergono i primi rilievi collinari, interclusi dal reticolo idrografico principale e minore e dalle aree pianeggianti intravallive; tra queste ultime, procedendo da nord verso sud, si rilevano quelle principali relative Torrente Uso, al Fiume Marecchia, Torrente Ausa e, più a sud, al Torrente Marano.

La morfologia di piana costiera ed alluvionale rappresenta la maggior parte del territorio comunale. Parallelamente allo sviluppo delle valli alluvionali sopracitate, in direzione SW-NE si osservano le linee di crinale collinare che fungono da spartiacque tra i bacini idrografici principali del Marecchia ed Ausa e subordinatamente degli altri corsi d'acqua. Lungo tali crinali si imposta altresì la viabilità principale di collegamento fra le varie frazioni e località.

Il territorio collinare del comune è quindi caratterizzato dalla presenza di lineamenti geologico-strutturali (pieghe, contatti stratigrafici, ecc.) ad andamento prevalentemente appenninico orientato in direzione NW-SE impostati su formazioni geologiche plio-pleistoceniche marnoso-argilloso-arenacee (vedi figura sottostante), caratterizzate da coperture superficiali di spessore talora significativo.



Le quote massime e minime rilevabili nell'ambito del territorio comunale, espresse in metri sul livello del mare, sono riportate nella seguente tabella riassuntiva:

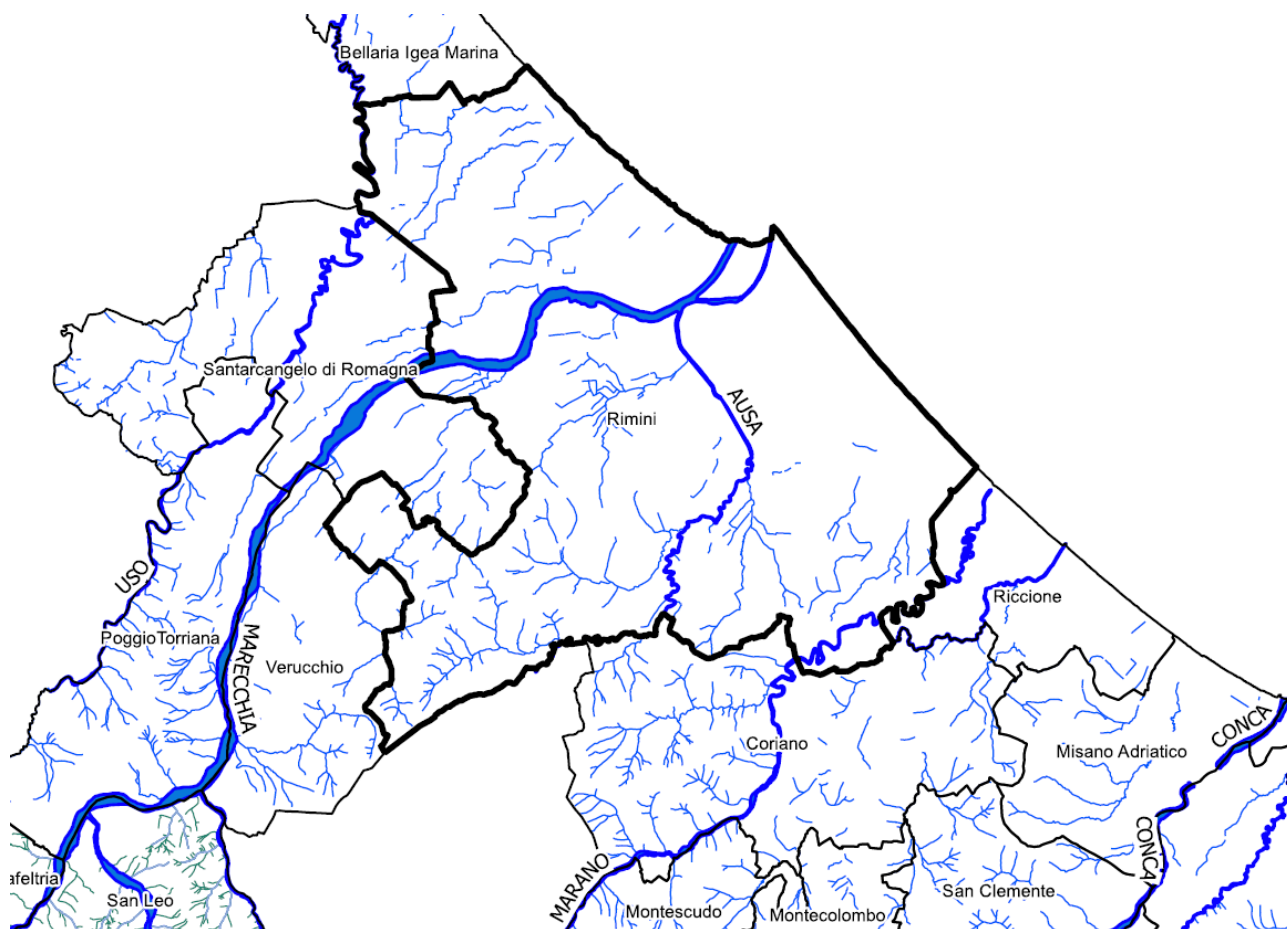
Comune	Altitudine Minima	Altitudine Massima	Altitudine Media
<a href="#">Rimini</a>	0	255	15

Nella parte sud occidentale del territorio si rileva infine la presenza di estese aree prettamente argillose, dominate talora da una morfologia calanchiva.

Le principali zone pianeggianti del territorio sono rappresentate dalla fascia costiera e dai settori di pianura alluvionale del Marecchia, Ausa, Uso e Marano, ove sono presenti le maggiori estensioni dei terrazzi alluvionali sui quali si sono sviluppate le espansioni urbanistiche, specialmente del comparto artigianale e produttivo. La fascia costiera, congiuntamente al centro storico, ospita la maggior densità urbanistica e le principali infrastrutture ferroviarie, portuali ed aeroportuali della Provincia.

Dal punto di vista idrografico, nel territorio studiato si possono distinguere quattro corpi idrici principali, partendo da N verso S, con foce diretta in Adriatico: Uso, Marecchia, Ausa, e Marano. Si evidenziano inoltre rii e fossi affluenti dei corsi d'acqua principali appartenenti alla rete scolante secondaria.

Lo schema generale del reticolo idrografico nel territorio comunale è riportato nella seguente carta di inquadramento generale.



**Carta del reticolo idrografico principale**

In linea generale, anche per i corsi d'acqua principali, si tratta di corsi d'acqua a carattere torrentizio con forti magre estive e piene straripanti nei periodi autunno-invernali. Tale situazione di portate estreme è dovuta principalmente al regime pluviometrico (deflussi legati agli afflussi meteorici) ed alla presenza di terreni scarsamente permeabili (argille, marne, argille marnose).

La rete idrografica minore è caratterizzata da criticità connesse a problematiche assai dissimili a quelle relative alle aste principali: negli areali di pianura le situazioni di pericolosità sono infatti essenzialmente legate a difficoltà nello smaltimento delle acque piovane in occasione di eventi di pioggia particolarmente intensi, in relazione ai tombinamenti dei tratti urbani, mentre nel territorio montano-collinare si evidenziano criticità spesso connesse a fenomeni di sovralluvionamento o di erosione di sponda. Merita attenzione il tratto terminale del Fiume Marecchia (circa due chilometri) il cui corso storico transitava sotto al ponte di Tiberio (situato all'ingresso settentrionale della città storica) per poi sfociare in mare tramite il porto canale. Tra il 1924 e il 1930, per evitare le periodiche esondazioni, fu costruito un alveo artificiale denominato "Deviatore del Fiume Marecchia". A seguito di questa deviazione, la foce attuale è situata nei pressi di San Giuliano Mare e Rivabella.

#### ***4.3 Inquadramento geologico-strutturale***

Il bordo appenninico esterno e l'attuale fascia costiera sono il prodotto del sistema ad embrici e accavallamenti che regola il sollevamento e lo sviluppo della catena appenninica.

Secondo le recenti ricerche dell'AGIP (Pieri e Groppi, 1981) la Pianura Padana meridionale costituisce una stretta fascia allungata parallelamente ai rilievi del bordo appenninico entro cui si è verificato un consistente accumulo di depositi soprattutto neogenici. La presenza di strutture tettoniche sepolte drappeggiate ed annegate da tali depositi, storicamente ipotizzata, è stata accertata attraverso la realizzazione di "sezioni sismiche".

Lungo il bordo appenninico esterno e la fascia di pianura antistante gli elementi strutturali accatastati vengono a formare un prisma di accrezione che per la complessa interferenza tra l'attività tettonica e quella sedimentaria assume i caratteri di una pronunciata fossa tettonica (Scandone, 1980) denominata "Avanfossa appenninico-adriatica" (Ori G.G., Roveri M. e Vannoni F., 1986). L'intrecciarsi di complessi meccanismi sedimentari e tettonici hanno dato luogo alla formazione di bacini alla fronte e sulla parte retrostante degli accavallamenti traslando con essi all'interno della avanfossa. Il risultato finale è quello di un consistente impilamento di sedimenti caratteristici della successione sedimentaria plio-peistocenica sino a quelli olocenici della zona di studio.

Di seguito si riporta uno schema tettonico dell'Appennino Settentrionale - Carta sismotettonica della Regione Emilia Romagna (Servizio Geologico, 2004) e una sezione trasversale regionale (Fantoni e Franciosi, 2009) (Figure 4.1 e 4.2).

*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Rimini (RN)*  
**Relazione Tecnico Illustrativa**

La tetto-genesi della nostra area inizia nel Tortoniano, in corrispondenza di una fase tettonica molto accentuata ad occidente, quando la fascia romagnolo - marchigiana interna, ubicata sul fronte della catena, costituisce una depressione fortemente articolata in piccoli bacini con sviluppo parallelo all'asse appenninico ("Bacini minori intrappenninici"; Ricci Lucchi, 1975). Il bordo appenninico esterno e l'avansfossa appenninico - adriatica propriamente detta, iniziano a delinearsi durante il Messiniano migrando nella fascia esterna e trovano il loro massimo sviluppo nel pliocene inferiore quando la tetto-genesi appenninica raggiunge il suo acme e la catena si estende ormai su tutta l'area.

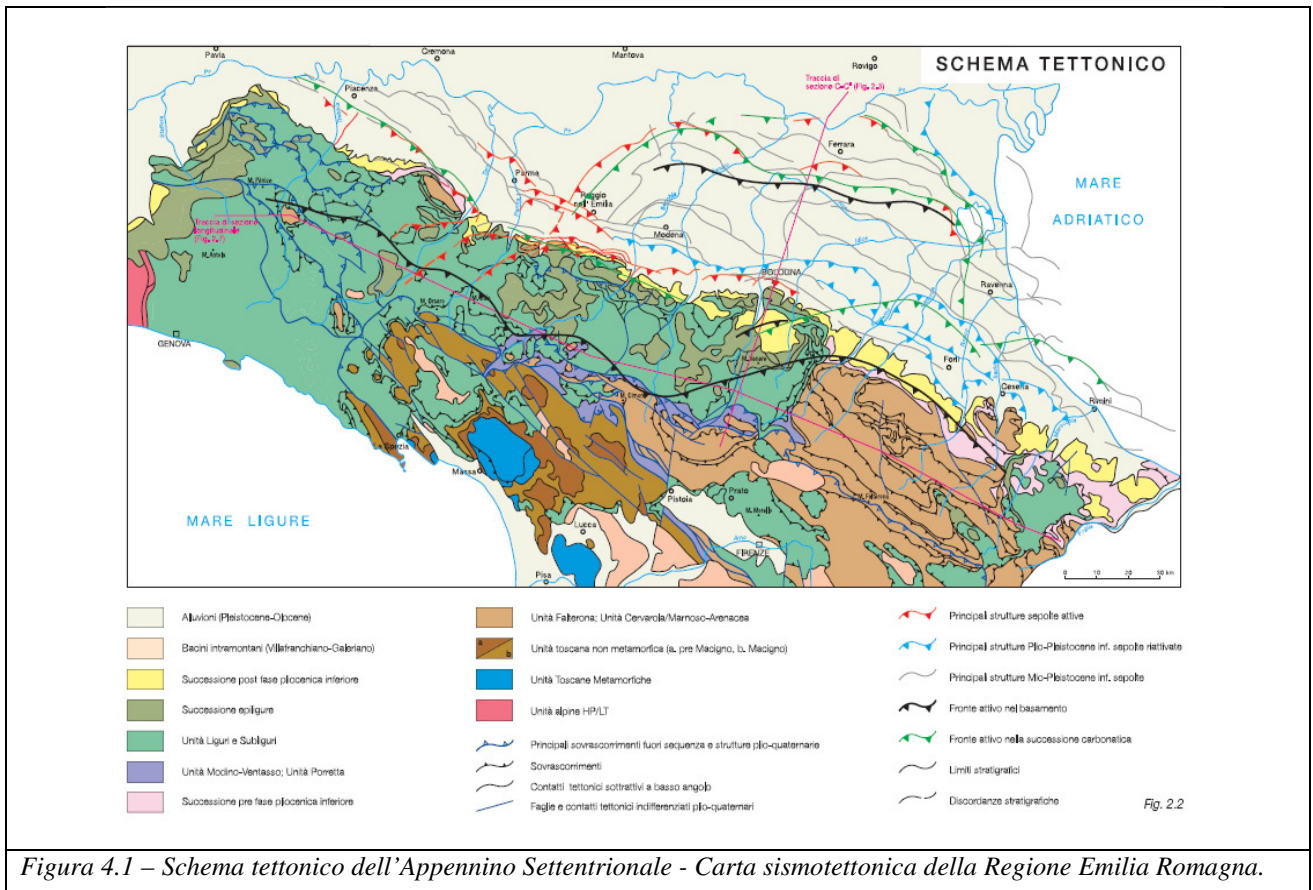


Figura 4.1 – Schema tettonico dell'Appennino Settentrionale - Carta sismotettonica della Regione Emilia Romagna.

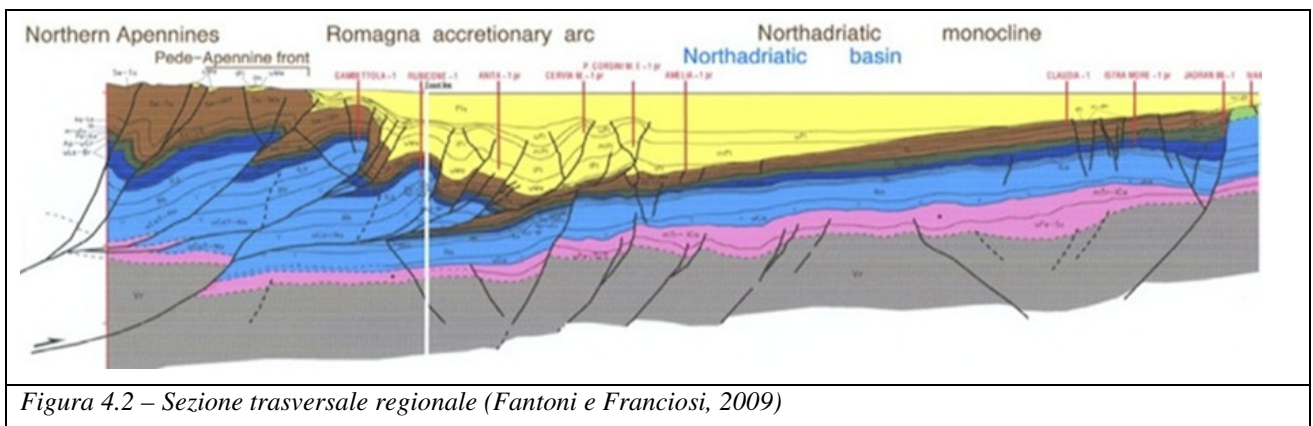


Figura 4.2 – Sezione trasversale regionale (Fantoni e Franciosi, 2009)

Durante il pliocene medio - superiore la distensione, legata all'avanzamento del fronte estensionale tirrenico, comincia ad interessare la parte più interna della catena mentre i principali fronti compressivi sono ubicati nella fascia romagnolo - marchigiana esterna determinandone il sollevamento e la parziale emersione.

Nel pleistocene inferiore - medio i fronti compressivi migrano in Adriatico. Si hanno movimenti differenziali verticali delle aree che continuano anche nel "Pleistocene glaciale" influenzando lo sviluppo e la tipologia della sedimentazione. L'attività tettonica non si è ancora esaurita, almeno nella fase avanzata dell'orogenesi (Pianura Padana, Adriatico) come è dimostrato dalla frequente attività sismica della regione.

#### **4.4 Assetto stratigrafico**

Le caratteristiche geologiche del territorio comunale non risultano di particolare complessità; esso comprende infatti le ultime pendici collinari di età sostanzialmente Pliocenica-Pleistocenica, le alluvioni continentali terrazzate della pianura (Pleistocene- Olocene) e i depositi costieri (Olocene-attuali). I terreni affioranti si sono venuti costituendo in posto (a differenza ad esempio di quelli affioranti nella vicina Valmarecchia che sono migrati in senso orizzontale) e pertanto si presentano in successione stratigrafica normale, con termini più antichi in basso e i più recenti in alto.

Il territorio riminese è caratterizzato per la parte collinare dai depositi di origine Plio-pleistocenica prevalentemente di natura argillosa. Ben rappresentato risulta anche il cosiddetto "Gruppo del Santerno", comprendente le marne, argille e tripoli di Corpolò (TCO), le argille e arenarie di Borello (FAA2) le arenarie e argille di Savignano (SVG), le sabbie di Imola (IMO). Queste formazioni comprendono termini che vanno dal Pliocene inf. (5,2 - 3,5 m.a.) al Pleistocene inf. (1,8-0,7 m.a.).

Nei colli di San Martino Monte l'Abate, San Lorenzo in Correggiano e Covignano compaiono soprattutto le litologie SVG, SVGa, IMO; in zona di Covignano, nella parte sommitale, affiorano le caratteristiche "sabbie gialle" debolmente cementate (comunemente e impropriamente chiamate "tufo") appartenenti alle sabbie di Imola (IMO) del Pleistocene medio. Sulle formazioni plioceniche poggiano i depositi argillosi e sabbiosi del Pleistocene sui quali sono stati depositi dai corsi d'acqua, nel corso delle loro divagazioni, sedimenti limosi, sabbiosi e ghiaiosi di origine alluvionale.

Verso mare questi sono interrotti dal gradino morfologico della paleofalesia, a valle della quale sono presenti depositi sabbiosi di transizione di origine litorale, lagunare e marina. Tali depositi costituiscono la piana costiera, estesa tra la falesia fossile e l'attuale linea di costa, secondo una tipica morfologia pianeggiante, caratterizzate da un'ampia piana sabbiosa originata dall'interazione tra processi continentali (alluvionali) e marini (litorali). La quota altimetrica è compresa tra lo zero del livello marino medio e +3,0/3.7 ml s.l.m..

Per il territorio comunale di Rimini sono, dunque, state individuate 3 principali macro-aree:

- **MACROAREA LITORALE:** comprende la zona litorale e di piana costiera.
- **MACROAREE ALLUVIONALI:** comprende la piana alluvionale del sistema Marecchia-Ausa, prevalente su tutto il territorio e quelle marginali del Torrente Uso e del Melo-Marano che si

sviluppano rispettivamente verso le ultime propaggini settentrionali e meridionali del territorio comunale.

- **MACROAREA COLLINARE:** riguarda tutta la zona collinare che si estende nel settore sudoccidentale del territorio interessata dall'affioramento delle formazioni geologiche Plio-Pleistoceniche.

Di seguito è riportata una breve descrizione delle caratteristiche geo-litologiche di ciascuna macro-area rilevata.

#### MACROAREA LITORALE

L'estensione lineare del tratto costiero consente un'azione piuttosto regolare da parte delle correnti litorali e la formazione di una fascia sabbiosa estesa anche a distanza dalle foci fluviali che hanno costituito e costituiscono attualmente in misura meno rilevante, le fonti di alimentazione per lo sviluppo del sistema deposizionale litorale. In conseguenza dell'intensa urbanizzazione, talora spinta fino al limite della zona di azione del moto ondoso di tempesta, alcune caratteristiche morfologiche del paesaggio costiero quali cordoni e dune sabbiose sono scomparse, lasciando spazio ad estese aree urbanizzate ed ad un diffuso appiattimento degli arenili a seguito dell'intensa attività turistico-balneare.

La larghezza dell'arenile dipende dalle correnti marine che determinano zone di deposizione e d'erosione, dalla migrazione delle foci nel tempo, dalla presenza di manufatti trasversali quali porti, moli, scogliere ed in genere tutte le opere antropiche, che modificano il regolare sviluppo delle correnti stesse, infine dalla presenza di manufatti longitudinali che condizionano la deposizione in particolare a seguito di mareggiate.

Spostandosi verso l'entroterra, ad una distanza variabile da circa 600 ml sino ad oltre 1250 ml dalla linea di riva, al di là della fascia di lidi (ora urbanizzata), è evidente un gradino morfologico di alcuni metri. Tale salto di pendenza determina un terrazzamento costiero linearmente esteso dal Comune di Cattolica (a S.E.) fino a quello di Igea Marina (a N.O.) se si eccettua l'interruzione centrale da parte del cono alluvionale del Fiume Marecchia.

I depositi sabbiosi di litorale sono riconducibili all'ultima glaciazione che abbassò il livello marino circa 100 mt al di sotto del livello attuale. La linea di costa si trovava tra Pescara e Zara nord, dalla quale si sviluppava un'ampia pianura alluvionale solcata dai corsi d'acqua che erano affluenti del Po. Le conoidi create dai fiumi sono costituite da elevati spessori ed attualmente le loro terminazioni si ritrovano in mare a distanze notevoli dall'attuale linea di costa. Con l'alternarsi di fasi di glaciazioni e di seguenti miglioramenti climatici (scioglimento dei ghiacci) il livello del mare subì abbassamenti ed innalzamenti determinando conseguenti regressioni e trasgressioni delle acque marine sulle terre emerse e viceversa.

La falesia, composta da depositi limo-argillosi recenti, rappresenta il limite tra la pianura alluvionale a S.O. ed il prisma sedimentario sabbioso litorale a N.E. riferibile alla trasgressione Flandriana (Olocene) successiva all'ultima glaciazione (Wurm). La scarpata rappresenta il prodotto dell'azione erosiva del mare

durante la fase di massima ingressione verificatasi circa 5.000 anni fa (Veggiani, "La linea di spiaggia"). Successivamente le variazioni oloceniche del livello marino hanno portato la linea di riva a lambire più volte la falesia.

La regressione marina dell'ultimo millennio ha creato lo scenario attuale dove l'avanzata della spiaggia sul mare è stata nettamente prevalente almeno fino agli ultimi decenni. Essa ha comportato un accrescimento dell'arenile per un valore medio di circa 2.3 mt tra il 1820 e il 1970 ("L' Erosione Marina tra i Litorali di Cervia e Pesaro"; Antoniazzi A., 1976) nel tratto costiero a sud del porto canale con indubbio vantaggio per l'attività turistico-balneare.

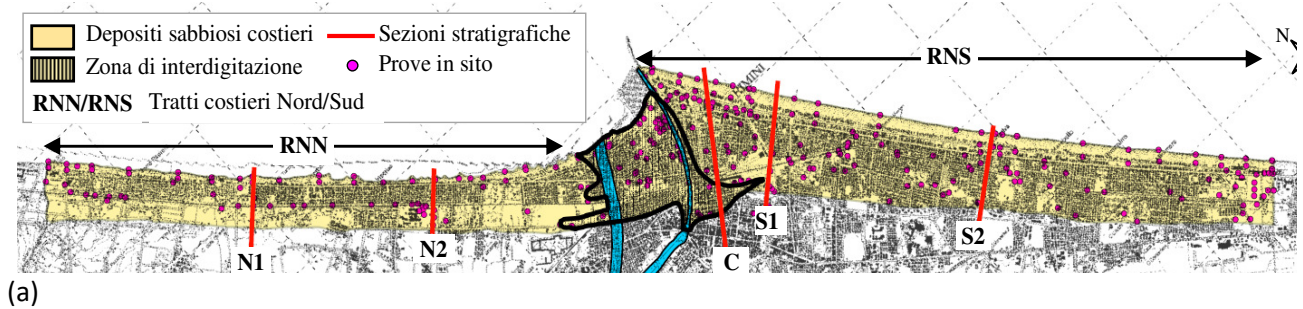
La serie marina che ricopre in contatto discordante quella alluvionale (trasgressione Flandriana) è costituita da sabbie medie o medio-fini, generalmente ben classate, con laminazione a basso angolo cuneiforme o concavo - convessa, talora evidenziata da allineamenti di livelli di frustoli vegetali. Localmente si possono rinvenire alternanze sabbioso-limose e limo-argillose, che denunciano un'elaborazione incompleta dei sedimenti di apporto alluvionale da parte del moto ondoso. Le strutture sedimentarie rivelano una situazione di media-elevata energia deposizionale, in ambienti di mare basso o litorale dominati dal moto ondoso e/o da correnti lungocosta. La presenza occasionale di ghiaie in livelli organizzati e con ciottoli ben arrotondati, denota sia la vicinanza di fonti d'apporto grossolano, sia elaborazione da parte delle correnti costiere e del moto ondoso.

La scarpata netta della paleofalesia incide i depositi continentali in modo riconoscibile soprattutto nella zona nord del territorio comunale, da Rivabella al confine con il Comune di Bellaria-Igea Marina, mentre in corrispondenza dell'abitato di Rimini risulta occultata dall'urbanizzazione e a sud appare poco percettibile.

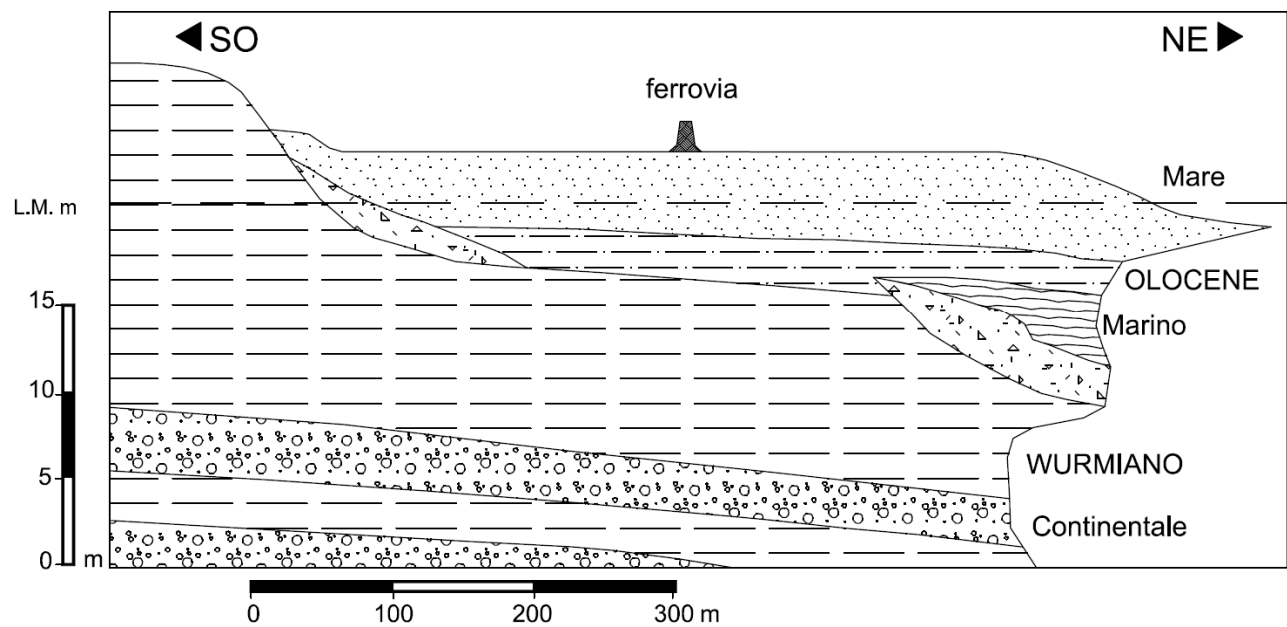
Il prisma sabbioso marino, coerentemente a quanto rilevato in Merli A. (Tesi di dottorato, 2019), è generalmente organizzato secondo due unità stratigrafiche e litotecniche arealmente continue e sovrapposte denominabili, partendo dall'alto, rispettivamente come A e B (vedi Figura 4.3 e 4.4). Tuttavia questo assetto stratigrafico superficiale costiero presenta significative anomalie nell'areale compreso fra l'attuale foce del Fiume Marecchia ed il Portocanale di Rimini, dovute alle ripetute diversioni fluviali succedutesi storicamente nonché al susseguirsi fenomeni di esondazione, rotte d'argine e/o alla deposizione di depositi grossolani in corrispondenza di strutture di palo canale e/o di barra di foce. In tale zona si riscontra una vera e propria interdigitazione di facies deposizionali marine intercalate a depositi fluviali localizzati, conseguenza dell'interazione delle dinamiche fluviali con lo sviluppo ed avanzamento della linea di costa. Questa *Zona di Interdigitazione* (nel presente studio denominata anche *RNC*), stratigraficamente irregolare e di transizione, separa arealmente le zone costiere litologicamente più omogenee presenti a nord e sud della stessa, definibili rispettivamente come *RNN* e *RNS* (vedi figura 4.3 sottostante).

Nel litorale studiato l'Unità A, (corrispondente all'unità stratigrafica superficiale AES8a) è presente sino a profondità di circa 2.5-4.0 mt da p.c., risultando costituita da sabbie generalmente cernite, omogenee, maggiormente addensate e con diametro medio leggermente superiore rispetto ai depositi caratteristici della sottostante Unità B, sempre caratterizzata da prevalenti sabbie ma organizzate secondo alternanze con livelli

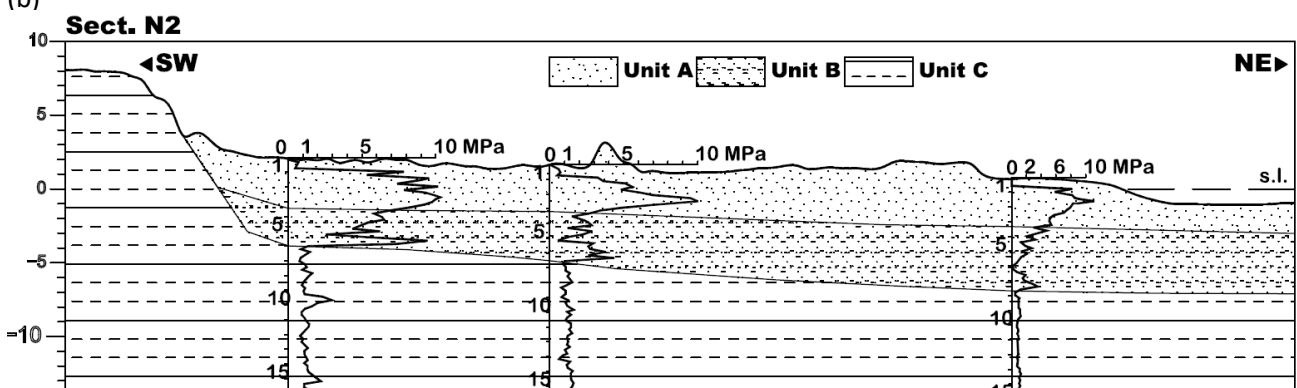
a maggior contenuto in fine congiuntamente ad un minor grado di addensamento (vedi profili penetrometrici e curve granulometriche in Figura 4.5 e 4.6). Nel settore di chiusura a pinch-out contro la paleofalesia, alla base del cuneo sabbioso, sono sovente presenti depositi ghiaiosi addensati (presso Rimini Nord) o depositi sabbiosi più grossolani (a tratti con ghiaietto) ed addensati, talora con presenza di frammenti conchigliari (soprattutto presso Rimini Nord)



(a)



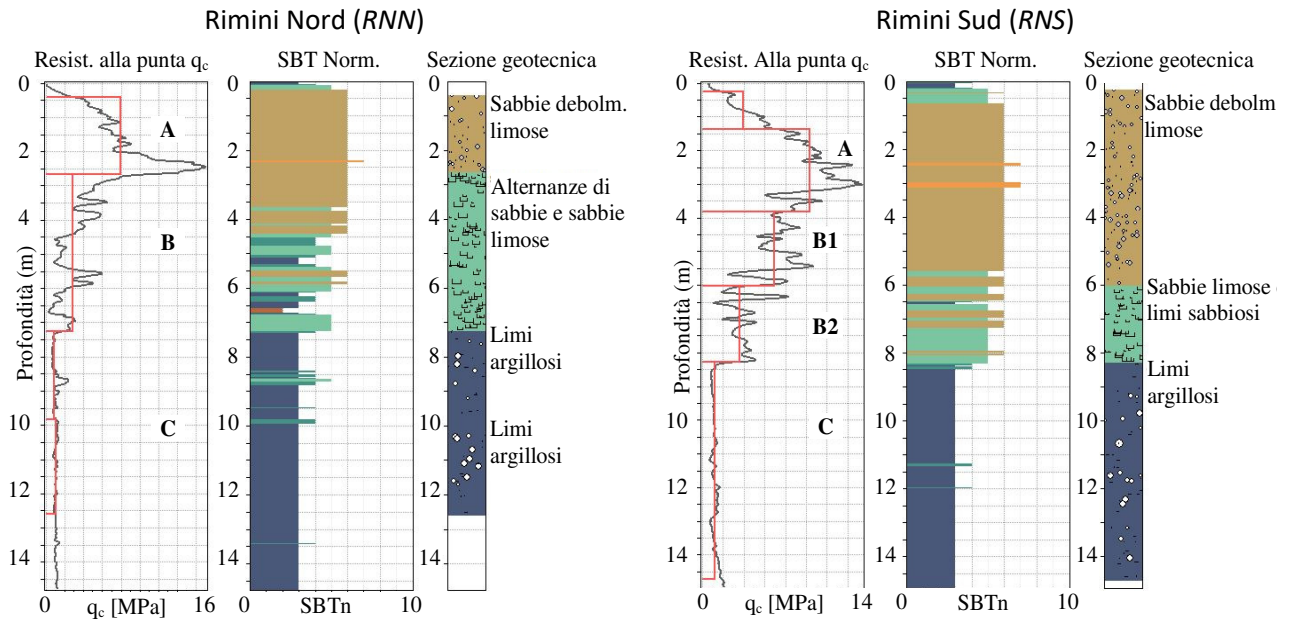
(b)



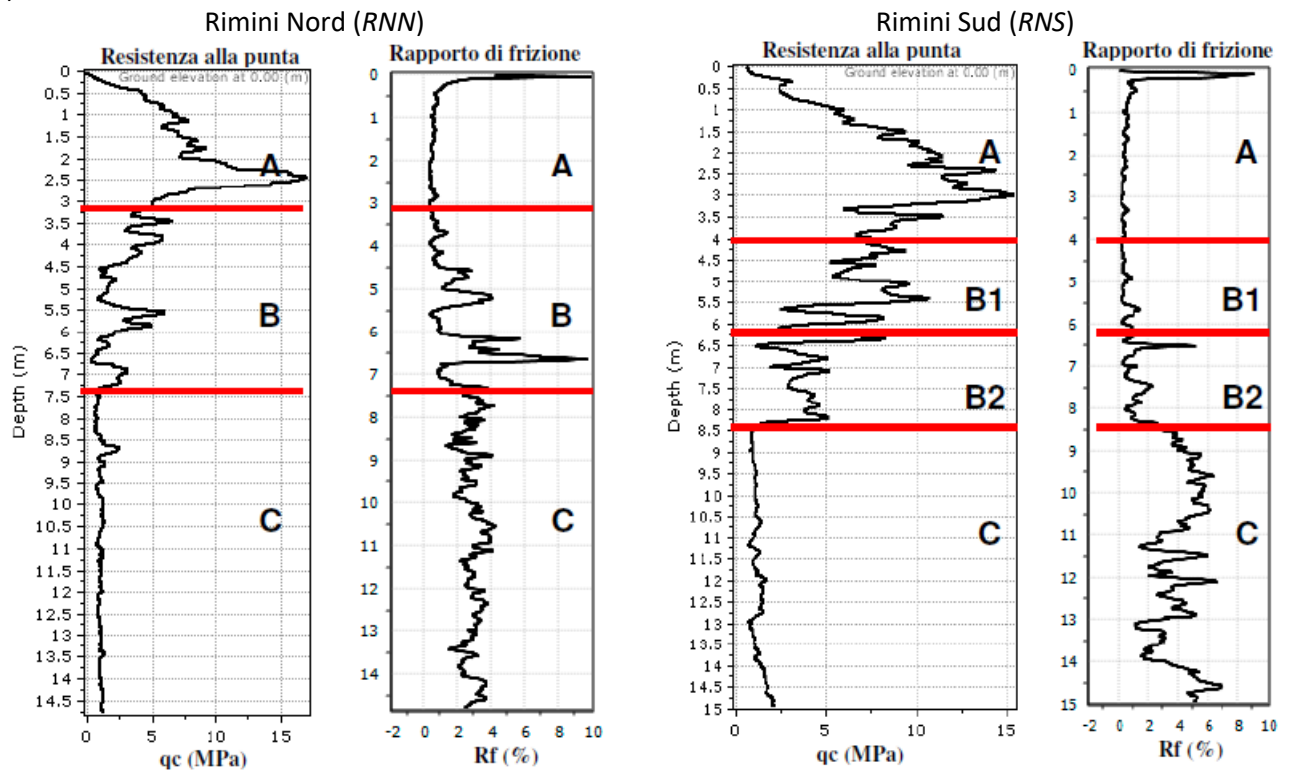
(c)

Figura 4.3 - (a) Assetto dei depositi costieri (tratta da Merli A., 2019) con rappresentazione delle prove in sito utilizzate, le tracce di sezione e la perimetrazione dei depositi marini costieri; (b) Tipica sezione geologica costiera (Veggiani, 1982); (c) Sezione geotecnica N2 lungo il tratto di Rimini Nord (RNN) (Merli A., 2019).





a)



b)

Figura 4.4 - a) Tipica sequenza litotecnica costiera (Unità A-B-C) per le macroaree Rimini Nord (RNN) e Rimini Sud (RNS) in termini di resistenza alla punta  $q_c$  e indice  $I_c$  SBTn (Normalized Soil Behavior Type). b) Tipico andamento di  $q_c$  e rapporto di frizione (friction ratio) riscontrabile in RNN e RNS (Merli A., 2019).

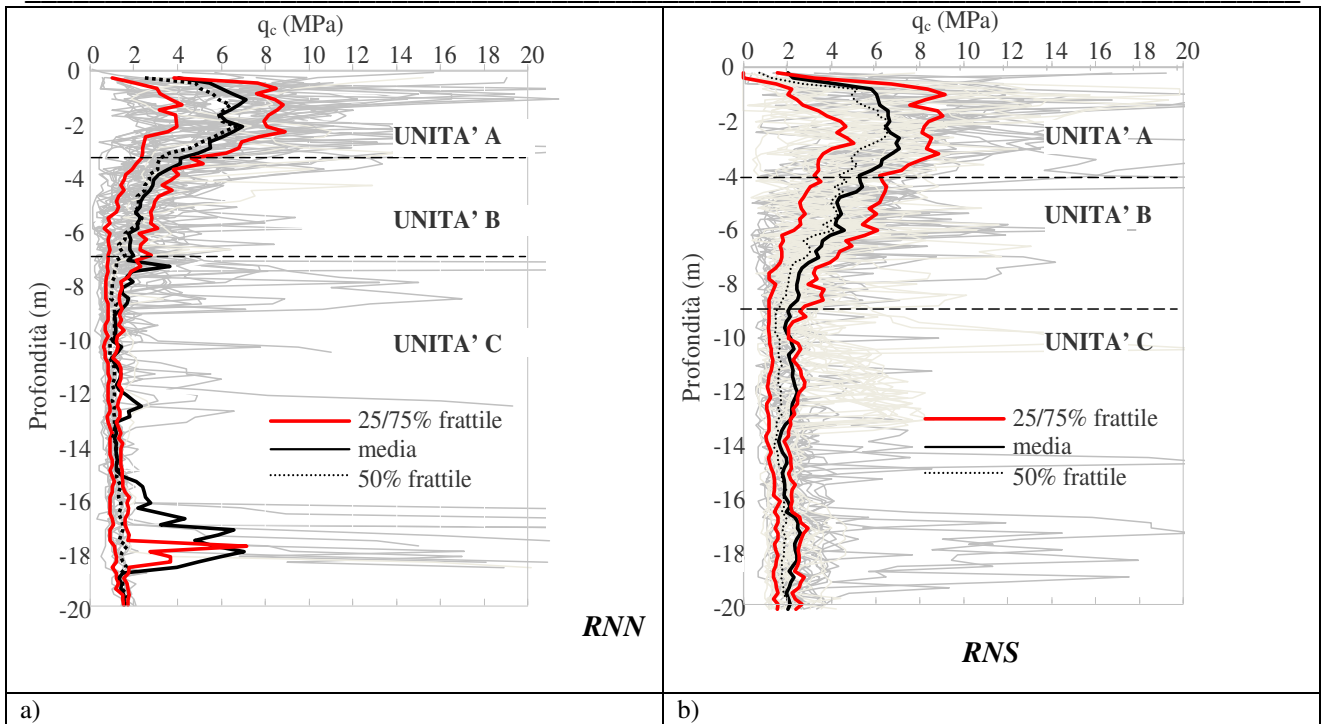


Figura 4.5 Profilo medio, 25°, 50° e 75° percentile della distribuzione di  $q_c$  sovrimposti al dataset complessivo delle CPT analizzate per le aree RNN (a) e RNS (b) (Merli A., 2019).

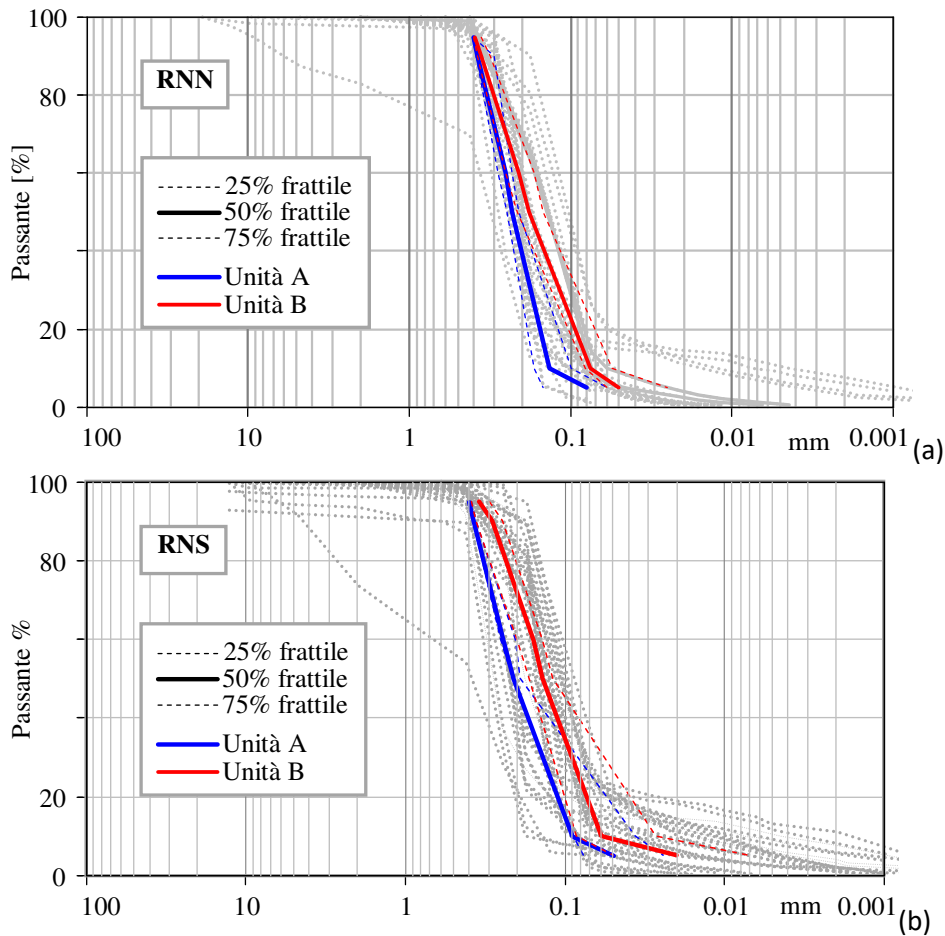


Figura 4.6 - Distribuzione granulometrica caratteristica delle Unità A e B di RNN (a) e RNS (b) (Merli A., 2019).

*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Rimini (RN)*  
Relazione Tecnico Illustrativa

La distribuzione granulometrica generale di entrambe le unità A e B (Fig. 4.6) evidenzia una tessitura generalmente un po' più fine e meno cernita per il tratto costiero di Rimini Sud (RNS) rispetto a quello di Rimini Nord (RNN).

I depositi alluvionali di letto, a livello litotecnico, vengono identificati quale Unità C, alla cui sommità possono talora presenti circoscritti orizzonti metrici di ghiaie, quali strutture relitte di paleoalveo dei corsi d'acqua locali e/o di barra di foce. Le sezioni litostratigrafiche/litotecniche superficiali di riferimento, rappresentative per i vari settori del territorio costiero studiato, unitamente alla loro ubicazione, sono riportate in allegato alla presente e denominate F-F', L-L', O-O', Q-Q', R-R', in cui le sopracitate Unità litotecniche A, B e C sono rispettivamente identificabili con i litotipi SW, SM, ML come codificati nella tabella di classificazione dei terreni (par. 2.1.9.1 degli Standard di rappresentazione e archiviazione informatica - Microzonazione sismica - Versione 4.1.1); in tali sezioni gli orizzonti ghiaiosi presenti talora al tetto dell'Unità C sono individuabili con la sigla GC. Tale assetto viene altresì schematizzato nelle colonnine stratigrafiche 2014 - 2015 - 2016 - 2017 di cui alla carta delle MOPS (Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica) ed al successivo Par. 6.3.

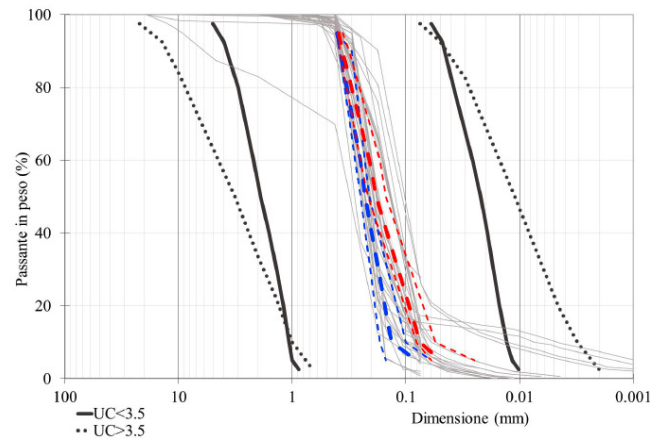
Tali terreni superficiali costieri, secondo il criterio geologico di Youd e Perkins (1978), basato su natura ed età del deposito, presentano una moderata-alta suscettibilità alla liquefazione (vedi fig. 4.7).

Tipo di deposito	Probabilità di liquefazione di depositi sedimentari durante terremoti Strong Motion			
	< 500 anni	Olocene	Pleistocene	Pre-Pleistocene
<b>a) Depositi continentali</b>				
Canale fluviale	Molto alta	Alta	Bassa	Molto bassa
Pianura di esondazione	Alta	Moderata	Bassa	Molto bassa
Pianura e conoidi alluvionali	Alta	Moderata	Bassa	Molto bassa
Spianate e terrazzi marini		Bassa	Bassa	Molto bassa
Deltaiici	Alta	Moderata	Bassa	Molto bassa
Lacustri	Alta	Moderata	Bassa	Molto bassa
Dune	Alta	Moderata	Bassa	Molto bassa
Loess	Alta	Alta	Alta	Sconosciuta
Terreni residuali	Bassa	Bassa	Molto bassa	Molto bassa
<b>b) Zone costiere</b>				
Deltaiici	Molto alta	Alta	Bassa	Molto bassa
Di estuario	Alta	Moderata	Bassa	Molto bassa
Di spiaggia	Alta	Moderata	Bassa	Molto bassa
Lagunari	Alta	Moderata	Bassa	Molto bassa
<b>c) Riempimenti artificiali</b>				
Non compattati	Molto alta			
Compattati	Bassa			

Figura 4.7 - Criterio geologico di verifica della suscettibilità alla liquefazione secondo Youd e Perkins (1978).

Come evidenziato anche in Merli A. (Tesi di dottorato, 2019), è evidente come le sabbie litorali di entrambe le unità A e B, sia a nord che a sud del porto canale (rispettivamente RNN e RNS), ricadano entro i fusi granulometrici di potenziale liquefazione (vedi Fig. 4.8).

**FUSI GRANULOMETRICI DI SUSCETTIBILITA' ALLA LIQUEFAZIONE  
- TRATTO RNN -**



a)

**FUSI GRANULOMETRICI DI SUSCETTIBILITA' ALLA LIQUEFAZIONE  
- TRATTO RNS -**

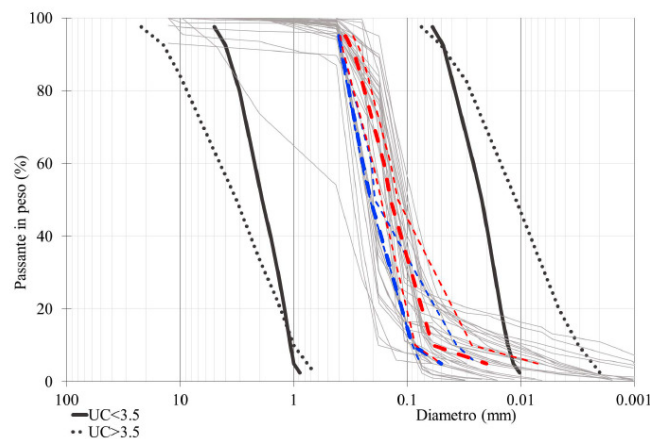


Figura 4.8 - Fusi granulometrici di suscettibilità alla liquefazione (Tsuchida, 1970) per le zone RNN (a) e RNS (b).

### MACROAREE ALLUVIONALI

I depositi continentali sono per lo più sedimentati per opera delle acque del Fiume Marecchia, principale corso d'acqua del riminese, che con le improvvise e notevoli piene ha originato alternanze di ghiaie più o meno grossolane, limi, argille e sabbie. Gli spessori maggiori si hanno nella zona nord di Rimini (fino a 300 mt), mentre a sud dell'abitato il substrato si solleva bruscamente passando a spessori di poche decine di metri. Soprattutto nel settore centrale e settentrionale della piana alluvionale e costiera, nell'ambito dei depositi di copertura superficiali, si rilevano frequenti strutture ghiaiose di paleolaveo (vedi figura 4.9 sottostante). Essi formano corpi a geometria nastriforme, larghi qualche centinaio di metri, che incidono con contatto netto ed erosivo le tracimazioni fluviali adiacenti (canali singoli di piana alluvionale).

Talora i singoli depositi di canale si saldano lateralmente e verticalmente e formano dei corpi composti con geometria d'insieme relativamente tabulare e spessore fino a 15 metri.

Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Rimini (RN)  
Relazione Tecnico Illustrativa

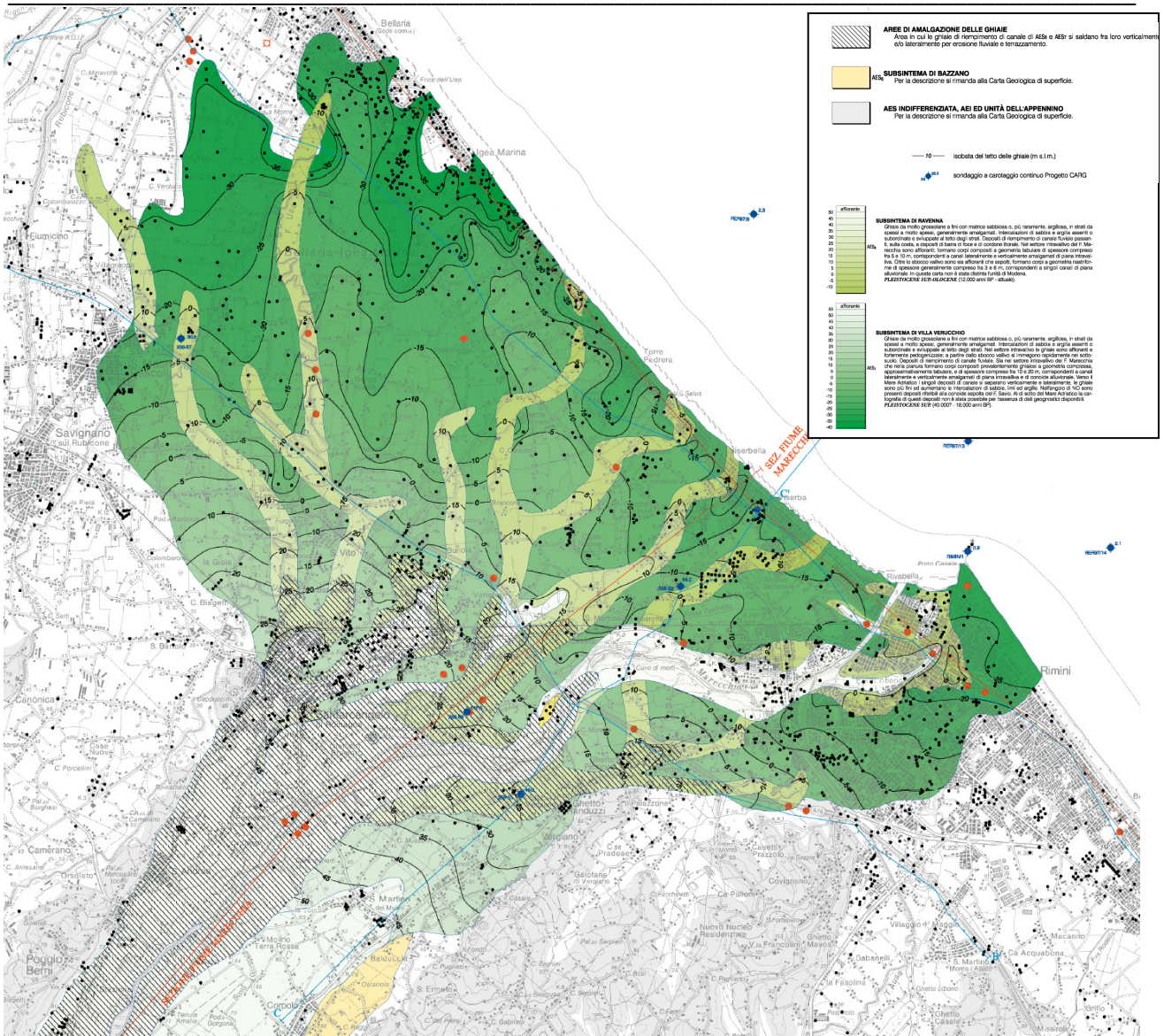


Figura 4.9 – Estratto della carta del tetto delle ghiaie della conoide alluvionale del Fiume Marecchia.

Depositi alluvionali di minore entità si hanno per opera del Fiume Uso che in territorio riminese si interdigita con quelli del Fiume Marecchia. I depositi dei Torrenti Ausa e Marano presentano granulometrie più fini, soprattutto sabbiose e limose, con spessori dell'ordine delle poche decine di metri. I depositi alluvionali appartengono al Sintema Emiliano - Romagnolo superiore (AES), all'interno del quale vengono individuati il Subsistema di Ravenna (AES<sub>8</sub>) e l'Unità di Modena (AES<sub>8a</sub>), costituiti essenzialmente da materiali grossolani (sabbie e ghiaie) alternati a materiali a granulometria più fine (limi e argille); questi ultimi, in corrispondenza del terrazzo superiore, occupano la parte più superficiale del deposito. In profondità ed al crescere dell'età dei cicli deposizionali (e corrispondenza dei terrazzi più alti, presenti a tratti a margine delle valli alluvionali), sono rilevabili orizzonti appartenenti al Subsistema di Villa Verucchio (AES<sub>7</sub>) ed al Subsistema di Bazzano (AES<sub>6</sub>).

L'insieme dei depositi ghiaiosi e sabbiosi di canale fluviale, affioranti e sepolti lungo la valle del F. Marecchia, a ridosso dello sbocco vallivo e nella pianura antistante, costituisce un serbatoio idrico di notevole importanza, ampiamente sfruttato sia per fini pubblici (idropotabili), che privati (agricoli, industriali, zootecnici).

La conoide del F. Marecchia è infatti costituita da una zona apicale in cui le ghiaie sono amalgamate tra loro e formano un acquifero freatico monostrato compreso tra la superficie topografica ed il substrato marino prevalentemente argilloso. La zona di amalgamazione delle ghiaie è quella in cui si verifica la ricarica diretta di tutta la conoide, sia dalle infiltrazioni efficaci, sia dall'alveo.

A valle della zona di amalgamazione i diversi lobi di conoide si separano e tra essi si interpongono dei depositi fini di spessore crescente procedendo verso mare. I diversi acquiferi sono quindi disconnessi dalla superficie e acquisiscono tutti condizioni di artesianità. I principali acquiferi, ovvero quelli più spessi ed arealmente più continui, corrispondono alle porzioni regressive terminali dei cicli deposizionali riconosciuti nel sottosuolo, caratterizzate per l'appunto dallo sviluppo di estesi lobi di conoide alluvionale.

Gli acquitardi più estesi corrispondono invece alla argille e limi presenti nella parte inferiore di ciascuna unità idrostratigrafica di sottosuolo. Le Unità Idrostratigrafiche presenti in sito sono infatti formate da più sequenze deposizionali caratterizzate da alternanze cicliche di depositi fini, o aquitardi (presenti alla base) e grossolani (al tetto) molto spessi sede degli acquiferi. Una sequenza deposizionale è una successione di sedimenti geneticamente legati tra loro (sono depositi durante lo stesso intervallo di tempo e con meccanismi della sedimentazione legati tra loro), compresi alla base e al tetto da superfici di discontinuità della sedimentazione e da superfici di continuità ad esse correlate.

All'interno di ciascun "Gruppo Acquifero", partendo dalla superficie, vengono distinti diversi "Complessi Acquiferi" gerarchicamente inferiori (a cui comunque corrisponde un'unità stratigrafica della Carta Geologica) identificate dal nome del Gruppo Acquifero di appartenenza, seguito da un numero progressivo (A0, A1 ecc.).

Per quanto riguarda la corrispondenza tra le unità geologiche, a cui i diversi corpi ghiaiosi sono attribuiti e quelle idrostratigrafiche, si fa riferimento alla sottostante Tabella 4.1 (tratta da Severi et al., 2014).

AES	AES8	GRUPPO ACQUIFERO A	COMPLESSO ACQUIFERO A0
	AES7		COMPLESSO ACQUIFERO A1
	AES6		COMPLESSO ACQUIFERO A2
	AES indistinto		COMPLESSO ACQUIFERO A3+A4
AEI		GRUPPO ACQUIFERO B	
IMO		GRUPPO ACQUIFERO C	

*Tabella 4.1 – Corrispondenza tra Unità Geologiche e Unità Idrostratigrafiche*

Inoltre la conoide alluvionale, in funzione dell'assetto e interconnessione dei livelli ghiaiosi e del rapporto con le zone di alimentazione entro il bacino di ricarica, viene distinta in tre zone principali denominate da monte verso valle rispettivamente come: pianura intravalliva, conoide amalgamata e conoide multistrato (vedi figura 4.10 a e b).

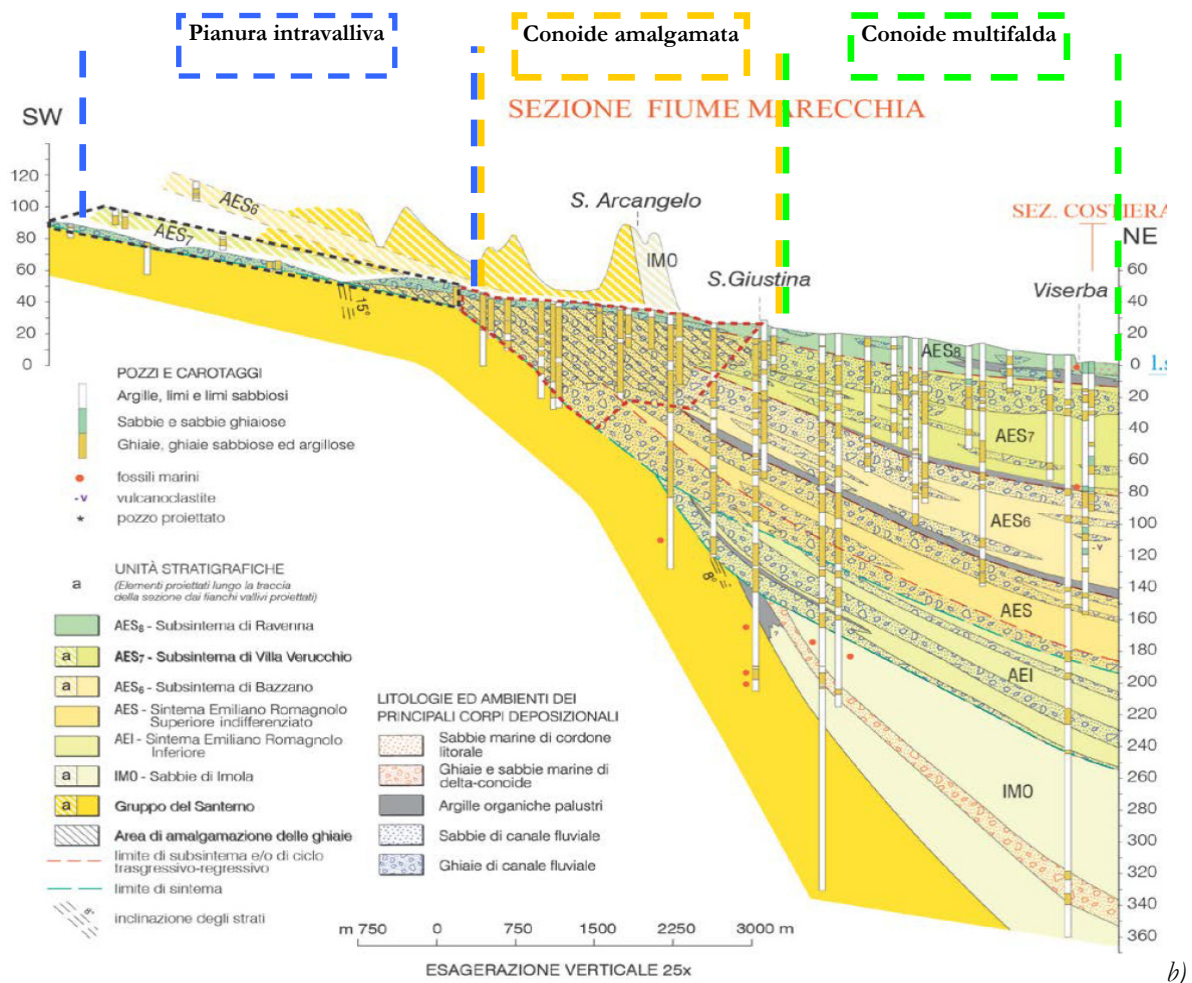
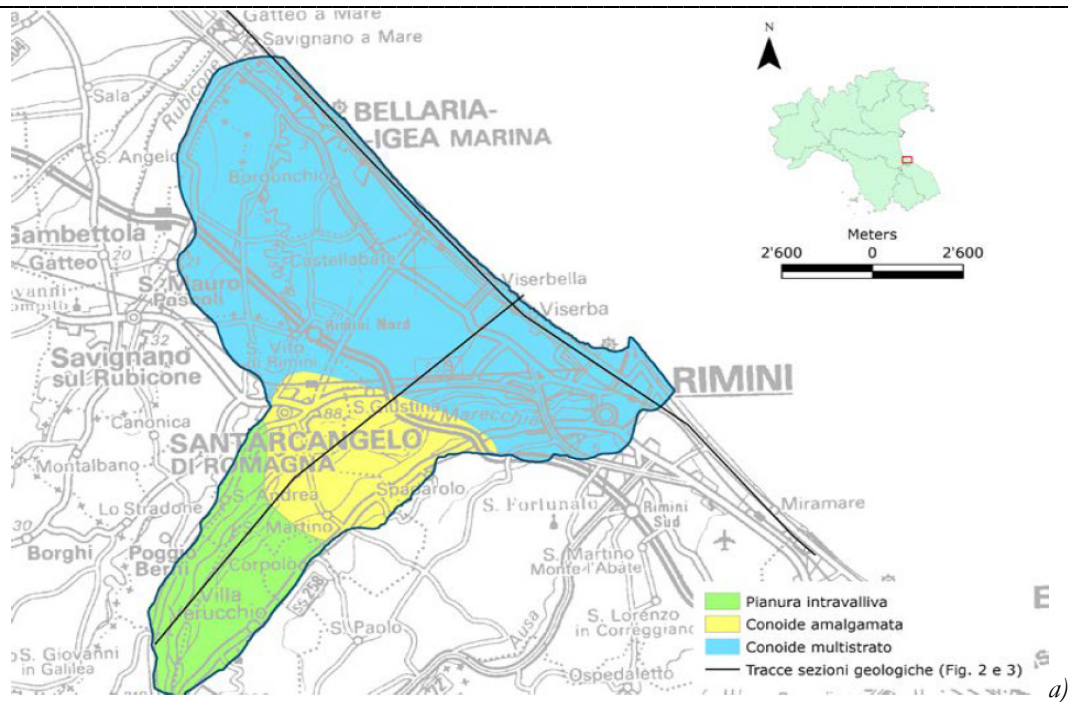


Figura 4.10 – Ambiti della conoide del Marecchia (a); sezione geologica rappresentativa della conoide del Marecchia perpendicolare alla costa e passante per il tratto costiero di Rimini Nord (b).

Il conoide del Fiume Marecchia ha una forma vagamente ellittica con inflessione verso la destra idrografica ed ha uno spessore dei materiali alluvionali che varia da circa 2 mt all'altezza dell'apice a Ponte Verucchio, a circa 230 mt nella zona di piana e costiera di Rimini Nord. La diffusione dei materiali pselitici e psammitici costituiti da ghiaie e sabbie grossolane, consente una notevole permeabilità sia verticale che orizzontale con conseguente comunicazione tra i livelli più superficiali della falda acquifera e valorizzazione delle portate in emungimento. La falda acquifera assume caratteri di spiccata freaticità per i primi per i primi 20-30 mt di profondità dal p.c. e semiartesianità/artesianità a profondità maggiori a causa dei primi consistenti strati di materiali a granulometria fine avente una notevole impermeabilità e continuità.

L'alternanza poi di livelli a diversa permeabilità determina condizioni di artesianità a varia profondità in relazione con le tre falde acquifere profonde, che appaiono non comunicanti per la discontinuità dei vari corpi idrogeologici grossolani che le inglobano, essendo questi isolati da potenti strati di depositi fini che li avvolgono quasi sempre completamente preservandoli anche dal punto di vista batteriologico e parzialmente dal punto di vista chimico.

Le quattro fondamentali falde acquifere congiuntamente alle due probabili molto profonde, sembrano sufficientemente protette da spessori di materiali fini impermeabili, ad esclusione di quella più superficiale a maggiore permeabilità verticale che risulta essere anche la maggiormente sfruttata e quindi anche la più esposta all'azione di agenti inquinanti di natura chimica e organica.

In particolare le quattro principali geometrie di falde acquifere rinvenute ad esclusione della falda superficiale, sono distinguibili nel modo seguente: una prima più superficiale dai 30 ai 50 mt di profondità dal p.c., una seconda dai 55 ai 65 mt di profondità dal p.c., una terza da 70 a 90 mt di profondità dal p.c. con un lieve intervallo di discontinuità sugli 80 mt, una quarta tra i 100 ed i 110 mt di profondità dal p.c.

L'alimentazione di queste falde distribuite nell'area della conoide sembra avvenire quasi esclusivamente ad opera di acque fluenti lungo il corso del Fiume Marecchia e di superficie a valle della stretta di Ponte Verucchio e subordinatamente ad opera di numerose sorgenti, a volte confluenti in corsi d'acqua laterali al corso d'acqua principale, disposte secondo l'asse Villa Verucchio - Poggio Berni - Santarcangelo di Romagna e relative a falde acquifere inserite nella sabbie e limi del Pliocene superiore e nei conglomerati regressivi plio-pleistocenici. Seguono poi nell'ordine altri fattori quali le precipitazioni meteoriche almeno per la falda più superficiale ed altri ancora scarsamente influenti.

## MACROAREA COLLINARE

Nelle zone collinari i terreni del substrato geologico sono ricoperti da coltri di alterazione e depositi quaternari (depositi di frana, di versante ed eluvio-colluviali) di variabile spessore, generalmente crescente dalla sommità dei rilievi verso il piede del versante, mediamente compreso tra i 3 ed i 7 m, ove si ritrova il maggior spessore. Alla stregua delle coltri di alterazione i posto, in corrispondenza delle aree in studio, si rinvencono anche alcuni depositi detritici di versante e/o di accumulo eluvio-colluviale, prettamente attestati



su tratti di versante conformati ad impluvio morfologico, anch'essi con spessore massimo sino a 7 m. I movimenti gravitativi rilevati, di tipo sia attivo che quiescente, presentano una dinamica prevalente per scorrimento e spessori massimi sino a 7 m, solitamente nella parte bassa del versante; tali movimenti, in presenza di particolari condizioni al contorno (pendenza del versante, circolazioni idriche nel sottosuolo, sovraccarichi, ecc.) tendono ad innescarsi ed a svilupparsi all'interno degli orizzonti a minor resistenza geomeccanica quali le coltri alterate o i depositi eluvio/colluviali e/o di versante, presentando una natura litologica prevalentemente limo-argillosa.

Le unità geologiche di base della conoide alluvionale così come quelle affioranti sulle aree collinari in studio sono di età Plio-Pleistocenica e rappresentate, cronologicamente dalle più recenti a quelle più antiche, dalle Sabbie di Imola (IMO), le Arenarie e Argille di Savignano (SVG) e la Formazione delle Argille Azzurre (FAA) nelle sue litofacies "pelitico arenacea" (FAA2pa) e "arenaceo-pelitica" (FAA2ap).

Si vuol segnalare altresì la presenza di numerose cavità di tipo antropico scavate storicamente nel primo sottosuolo arenaceo in corrispondenza del rilievo di Covignano, quale pratica diffusa dagli abitanti in quell'area, di cui però si hanno scarse informazioni circa ubicazione, sviluppo, caratteristiche geometriche, stabilità, ecc.

Di seguito si fornisce una descrizione dettagliata delle formazioni geologiche presenti nei territori studiati, tratta dal Catalogo dei Dati Geografici del Servizio Geologico e Sismico della Regione Emilia Romagna.

## DEPOSITI QUATERNARI CONTINENTALI

### **a1 Frane attive**

Depositi di litotipi eterogenei più o meno caotici, delle dimensioni dai blocchi alle argille, con contenuto in matrice variabile; frane di diverse tipologie con evidenze di movimenti in atto o recenti.

### **a2 Frane quiescenti**

Depositi di litotipi eterogenei più o meno caotici, delle dimensioni dai blocchi alle argille, con contenuto in matrice variabile; frane di diverse tipologie senza evidenze di movimenti in atto o recenti.

### **a3 Detriti di versante**

Depositi eterometrici, angolosi, con matrice in proporzione variabile, a luoghi stratificati e/o cementati. Origine gravitativa e/o ruscellamento.

### **a4 Depositi eluvio-colluviali**

Depositi eterometrici, spesso siltoso-sabbiosi, generalmente privi di strutture sedimentarie e non cementati.

### **b1 Alluvioni attuali**

Depositi dei fondovalle attuali, eterometrici (dalle ghiaie alle argille), che costituiscono le forme di letto dei fiumi e che vengono rimaneggiati durante gli eventi alluvionali principali.

<b>SINTEMA EMILIANO - ROMAGNOLO - SUPERIORE (AES).</b>
--

Sabbie e ghiaie con subordinati limi argillosi costituenti terrazzi intravallivi e conoidi, talora con indizi di pedogenesi, e i depositi attualmente in evoluzione nei fondovalle.

Sintema parzialmente suddiviso in subsintemi limitati, in affioramento, dalle principali scarpate di terrazzo fluviale e paleosuoli e, nel sottosuolo della pianura, da bruschi contatti fra depositi trasgressivi marino-marginali e palustri su depositi di conoide e di piana alluvionale. Contatto inferiore erosivo e discordante sui vari terreni prequaternari.

*Pleistocene superiore-Olocene*

**AES8 - Subsintema di Ravenna.**

Depositi alluvionali eterometrici dati da ciottoli, sabbie e limi. Corrisponde nelle aree intravallive ai depositi terrazzati più bassi. Rientrano in questa unità anche le alluvioni attualmente in evoluzione in alveo e quelle del primo terrazzo, talora fissate da arbusti. Limite superiore coincidente con il piano topografico, dato da suoli variabili da non calcarei a calcarei. I suoli non calcarei e scarsamente calcarei hanno, al tetto, colore bruno scuro e bruno scuro giallastro, spessore dell'orizzonte decarbonatato da 0,3 ad 1 m e contengono reperti archeologici di età dal Neolitico al Romano. I suoli calcarei appartengono all'unità AES8a.

*Pleistocene superiore-Olocene*

**AES8a - Unità di Modena.**

Depositi alluvionali eterometrici dati da ciottoli, sabbie e limi. Limite superiore sempre affiorante e coincidente con il piano topografico dato da un suolo calcareo di colore bruno olivastro e bruno grigiastro al tetto. Limite inferiore dato da una superficie di erosione fluviale nelle aree intravallive.

*Olocene*

**Subsintema di Villa Verucchio (AES7)**

ghiaie, sabbie, limi ed argille di origine fluviale affioranti nei settori intravallivi. Nella valle del F. Marecchia ghiaie di canale fluviale prevalenti (piana intravalliva e conoide alluvionale) organizzate in un solo ordine di terrazzo con inclinazione di c.a. 10 per mille: Limite superiore dato da un suolo non calcareo spesso fino a 2 m di colore bruno scuro e bruno rossastro (7,5-5YR). Limite inferiore dato, in affioramento, da una superficie di erosione fluviale che incide AES6 ed i depositi marini preesistenti.

*Pleistocene medio-superiore*

**Subsintema di Bazzano (AES6)**

ghiaie, sabbie, limi ed argille di origine fluviale affioranti nei settori intravallivi. Nella valle del F. Marecchia ghiaie di canale fluviale passanti a limi ed argille di origine fluviale e/o eluvio-colluviale di versante (piana intravalliva e conoide alluvionale) organizzate in un solo ordine di terrazzo con inclinazione di c.a. 18 per mille. Limite superiore coincidente, in affioramento, con il piano topografico e dato da 2 suoli non calcarei sovrapposti: uno inferiore sviluppato su ghiaie (colore bruno scuro; 7,5YR) e uno superiore, policiclico, sviluppato su limi ed argille (colore giallo olivastro; 2,5Y); spessore complessivo del fronte di alterazione di 5-6 m. Limite inferiore dato da una superficie di erosione fluviale che incide, in discordanza, i depositi marini preesistenti ;

*Pleistocene medio;*

## SUCCESIONE NEOGENICO-QUATERNARIA DEL MARGINE PADANO

### **SABBIE DI IMOLA (IMO)**

Arenarie e sabbie da medie a finissime, generalmente poco cementate, in strati spessi e molto spessi, mal definiti, frequentemente amalgamati fra loro, con livelli di ghiaia contenente abbondanti ciottoli silicei. Stratificazione incrociata ad alto e basso angolo, piano-parallela e con strutture tipo hummocky. Sono presenti rare intercalazioni, centimetriche e decimetriche, di peliti, talora fortemente bioturbate, con locali laminazioni ondulate tipo ripples da onda.

Nella parte alta, sono localmente presenti intercalazioni conglomeratiche a matrice sabbiosa (IMOa) con ciottoli derivanti da unità liguridi e dalla successione epiligure.

Potenza massima affiorante circa 60 metri, superiore ai 150 m nel sottosuolo.

Limite inferiore discordante su SVG e SVGa. Limite superiore erosivo discordante con AEI e AES.

Depositi di ambiente litorale.

*Pleistocene medio (0,8-0,65 MA)*

### **ARENARIE E ARGILLE DI SAVIGNANO (SVG)**

Alternanza di strati sottili e molto sottili, raramente medi, di argille grigie chiare, beige all'alterazione, e arenarie fini e finissime, poco cementate, talora lenticolari, A/P da  $\ll 1$  crescente verso l'alto e lateralmente; verso SW l'aumento delle arenarie è tale da permettere la distinzione di una litofacies sabbiosa (SVGa).

Potenza massima affiorante circa 200 metri.

Limite inferiore graduale su AAS per aumento della frazione pelitica. Limite superiore graduale, parzialmente eteropico, con SVGa e discordante con IMO.

Depositi di piattaforma.

*Pleistocene inferiore*

### **Litofacies della Grotta Rossa (SVGa)**

Arenarie medie e fini, mal cernite, in strati spessi e molto spessi frequentemente amalgamati, con tritume conchigliare associato a laminazione ondulata. Sono presenti intercalazioni metriche e decimetriche di peliti grigio-azzurre contenenti faune marino-marginali.

Potenza estremamente variabile, fino ad una massimo di circa 100 metri.

Limite inferiore graduale rapido, parzialmente eteropico, con SVG. Limite superiore discordante con IMO.

*Pleistocene inferiore*

### **FORMAZIONE DELLE ARGILLE AZZURRE (FAA)**

Argille di colore grigio-azzurro con rare intercalazioni di arenarie giallastre in letti da sottili a spessi, e argille marnose e siltose grigie in letti sottili e molto sottili.

Sono fossilifere ricche in foraminiferi e macrofossili, spesso bioturbate, a stratificazione poco marcata. Sono talora diffusi slumps con olistoliti di gesso derivati da unità evaporitiche. Limite inferiore netto, probabilmente discontinuo, su FAA2; paraconcordante su FCO. Depositi di scarpata e base scarpata. Potenza complessiva affiorante di circa 700 m.

*Piacenziano-Gelasiano*

**Membro arenaceo di Borello (FAA2).**

Membro interamente suddiviso in litofacies caratterizzate da variabilità del rapporto A/P e spessore medio degli strati, che si ripetono a più altezze stratigrafiche e mostrano rapporti di eteropia. Passaggio rapido a FAA. Spessore estremamente variabile, raggiunge i 1000 m e localmente si riduce fino ad annullarsi.

*Pliocene inferiore*

**FAA2pa - litofacies pelitico-arenacea.**

Alternanza tra argille e argille sabbiose grigio azzurre, ricche in foraminiferi e macrofossili (Lamellibranchi, Scafopodi, radioli di Echinidi etc. ), spesso bioturbate, a stratificazione poco marcata, con alterazione biancastra e con veli e laminazioni sabbiose; rari gli strati di sabbie, grigio giallastre gialle generalmente molto sottili. Rapporto A/P generalmente < 1/2..

**FAA2ap - Litofacies arenaceo-pelitica**

Alternanze di argille sabbiose grige, localmente marnose, fortemente fossilifere, biancastre all'alterazione, e arenarie silicoclastiche grigio-giallastre in livelli sottili e medi, poco cementate, con A/P variabile da 1/2 a 2; talora arenarie prevalenti in strati da spessi a molto spessi, mal definiti, a laminazione inclinata e con livelli di tritume conchigliare; sono presenti livelli siltosi; le arenarie, solitamente poco cementate presentano nuclei a maggiore cementazione (cogoli).

Di seguito si riporta altresì una sintesi grafica degli assetti geologico-strutturali e dell'assetto cronostratigrafico del Sistema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES), rappresentativi per la definizione del contesto geologico delle aree in studio, dalle zone di crinale più rilevate sino ai fondovalle (fig. 4.11-4.12-4.13). Le sezioni geologiche rappresentative vengono riportate in allegato, mentre la relativa traccia viene individuata planimetricamente nella Carta Geologico-Tecnica.

**SCHEMA DI INQUADRAMENTO REGIONALE**

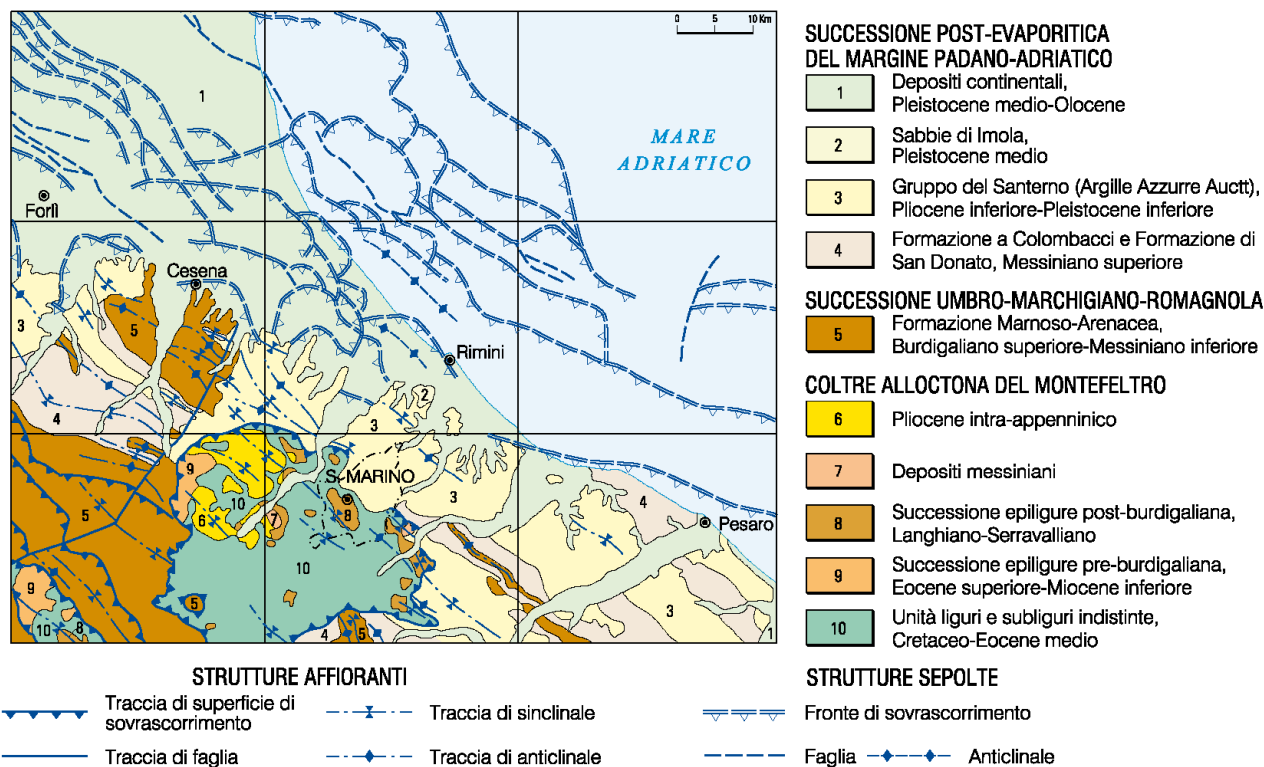
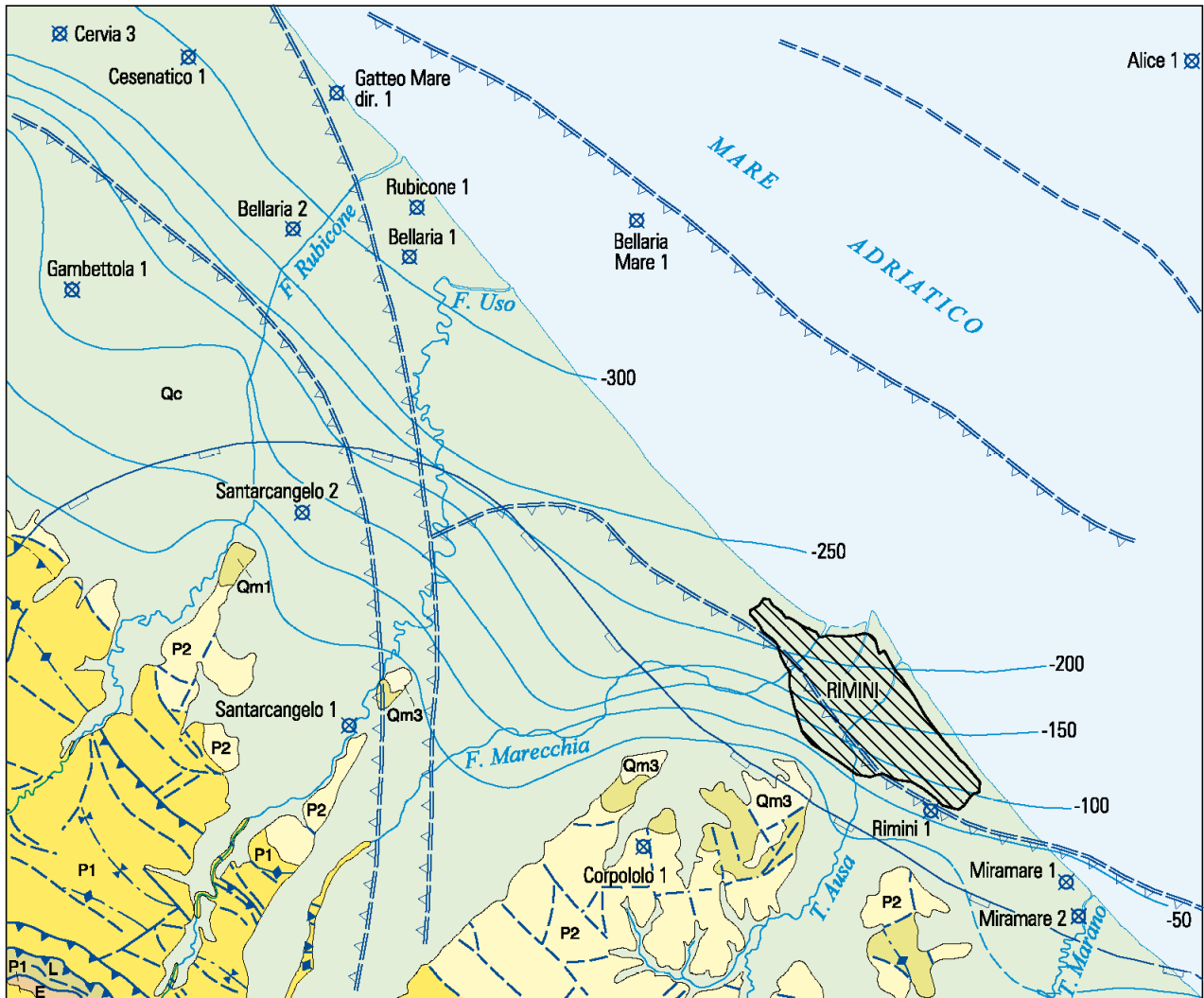


Figura 4.11 – Schema di inquadramento generale – progetto CARG (Foglio 526 Rimini)

**SCHEMA TETTONICO**

Scala 1:200.000



	Linea di costa		Qc	Depositi continentali del Pleistocene medio-Attuale (AEI+AES)
	Limite stratigrafico inconforme		Qm3	Depositi litorali del Pleistocene medio (IMO)
	Faglia certa e presunta		Qm1	Depositi marini del Pleistocene inferiore (SVG)
	Sovrascorrimento certo e presunto		P2	Depositi marini del Pliocene medio-superiore (TCO+AAS)
	Traccia di sup. assiale di anticlinale		P1	Depositi marini del Pliocene inferiore (AAI+BOE)
	Traccia di sup. assiale di sinclinale		E	Successione Epiligure (SMN+AQV)
	Fronte MAE sepolto certo e incerto		L	Liguridi s.l. (MEA+MLL)
	Sovrascorrimento sepolto			Urbanizzato
	Faglia sepolta			Mare
	-100 Isobate base AEI+AES con quota l.m.			
	Pozzo AGIP			

Figura 4.12 – Schema tettonico generale – progetto CARG (Foglio 526 Rimini)

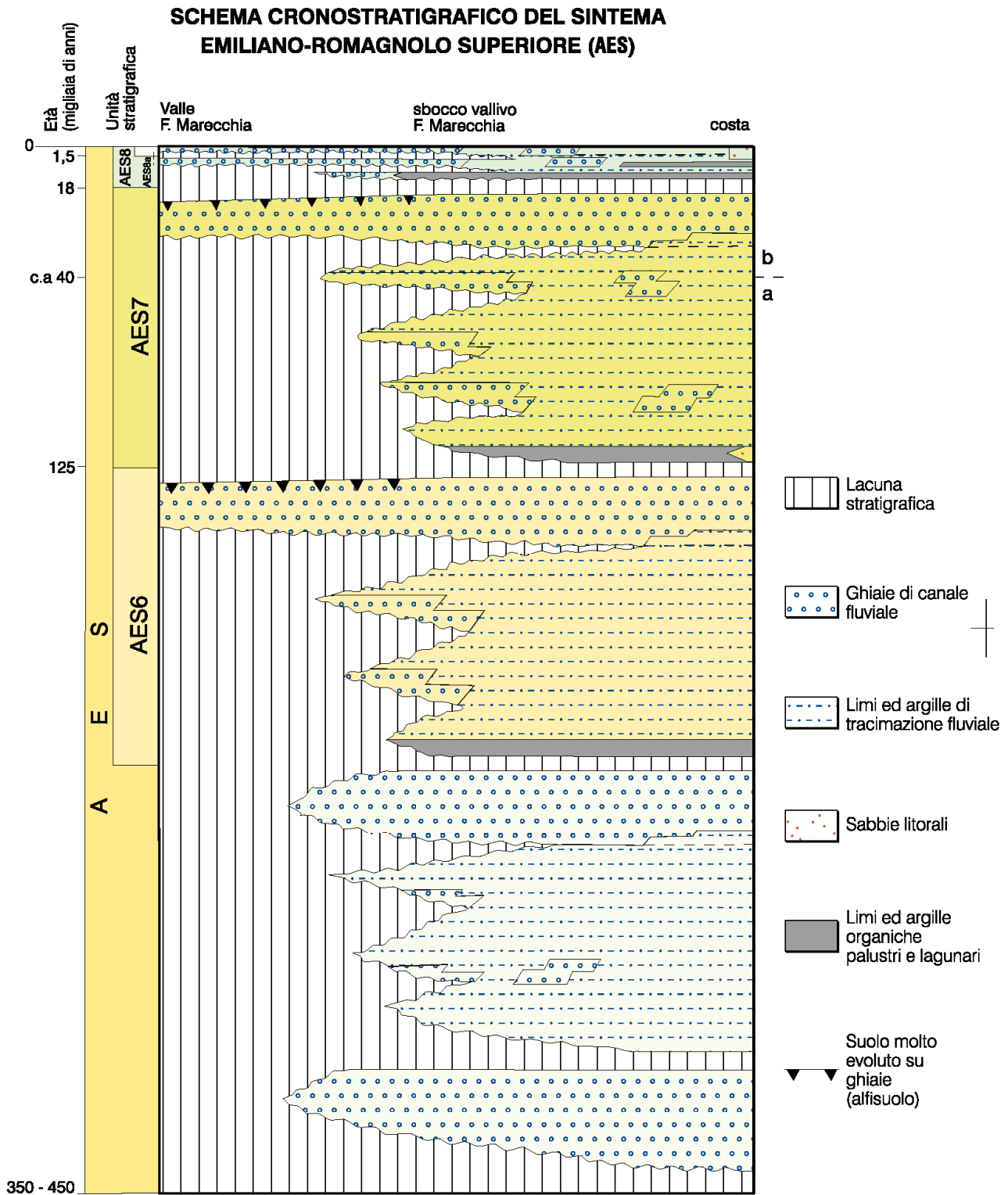


Figura 4.13 – Schema cronostatigrafico del Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES), Foglio 256 Rimini-CARG

## 5. DATI GEOTECNICI E GEOFISICI

Le indagini realizzate ex novo, associate a quelle degli strumenti urbanistici ed a quelle realizzate da privati e dalla Regione Emilia Romagna, hanno permesso di delineare un quadro conoscitivo preliminare del territorio, indispensabile sia per le analisi di I e II livello che di approfondimento di Livello III della Microzonazione Sismica.

Nel corso degli anni, le amministrazioni hanno sia realizzato nuove indagini (per lo più finalizzate all'edilizia pubblica) sia raccolto ed archiviato indagini dell'edilizia privata, così come la Regione Emilia Romagna ha supportato una serie di prove volte alla conoscenza del territorio. Anche in occasione del presente studio sono state condotte ulteriori prove geognostico-geofisiche ad integrazione del quadro conoscitivo e delle esigenze dell'amministrazione.

In dettaglio, si tratta di complessive N. 1374 prove selezionate, di cui N. 1000 di tipo geotecnico e N. 374 di tipo geofisico, per un totale di N.1357 prove puntuali (compresi array 2D) e n. 13 in array lineare distribuite sul territorio in studio (fig. 5.1).

IND. GEOGNOSTICHE	
TIPO	NUMERO
CPT	368
CPTe	62
CPTU	77
DL	2
DMT	5
DN	1
DP	5
DS	19
PA	105
S	312
SC	7
SMS	21
CR	16

IND. GEOFIS./DINAM.	
TIPO	NUMERO
CH	2
DH	19
MASW	5
REMI	7
SR	3
ESAC_SPAC	26
HVSR	287
SCPT	19
SDMT	4
CH	2

<b>TOTALE</b>	<b>374</b>
---------------	------------

<b>TOTALE</b>	<b>1000</b>
---------------	-------------

Ad integrazione delle prove di archivio sono stati realizzati ex novo: n. 2 sondaggi meccanici con prelievo di campioni, n. 3 prove CPT, n. 1 prova DPSH, n. 6 prove HVSR, N. 33 prove CPTe, n. 1 prova SCPT, N. 1 prova Down Hole, n. 2 prove ESAC/SPAC, prove di laboratorio terre (caratterizzazioni, granulometrie, indici, ecc.), prove TRXCIU, prove di laboratorio dinamico (prove CR) e ciclico TRXC (vedi prove in allegato 1 e 2).

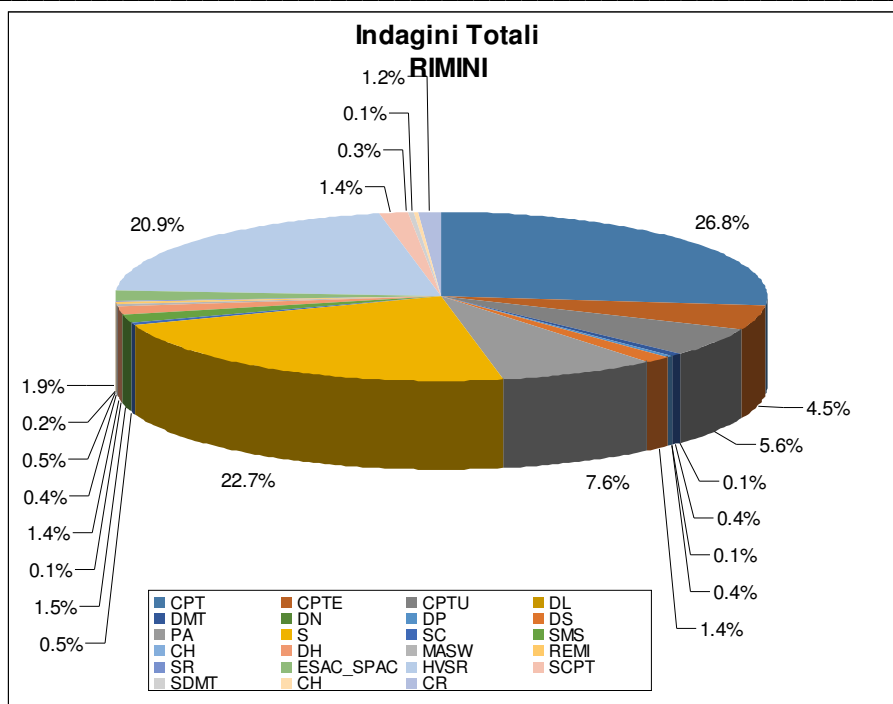


Figura 5.1 – Totale indagini geognostiche e geofisiche distribuite sul territorio del comune di Rimini ed utilizzate per lo studio di MS.

Tutte le tipologie di prospezioni sia integrative che pregresse sono state classificate e archiviate all'interno di un sistema informativo territoriale (G.I.S.) come previsto dagli standard di rappresentazione e archiviazione dati per la Microzonazione Sismica versione 4.1.1.

([http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/standard\\_studi\\_ms.wp](http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/standard_studi_ms.wp)).

Nella “Carta delle Indagini”, in allegato alla relazione, è possibile visualizzare l’ubicazione delle differenti indagini in sito; i risultati di ciascuna prova e le modalità di esecuzione sono riportate, a mezzo di semplici “report”, nel data-base associato alla mappa.

### 5.1. Indagini di tipo geofisico

L’analisi dei fenomeni di amplificazione locale coincide con lo studio degli effetti di risonanza legati alle onde trasversali o di taglio. Per tale ragione, quantificare l’andamento delle velocità di propagazione di questa tipologia di onde nel primo sottosuolo (profilo Vs) rappresenta un’informazione essenziale ai fini della caratterizzazione meccanica (in campo dinamico) dei terreni. Stime del profilo Vs vengono realizzate in sito attraverso appropriate prospezioni di tipo geofisico condotte, in base alle condizioni logistiche e alle profondità da esplorare, con differenti modalità esecutive:

**Indagini sismiche di tipo diretto:** Come dice il nome stesso questa tipologia di prospezioni ha il non trascurabile vantaggio di fornire una stima “diretta” delle velocità delle onde S. La tecnica d’indagine consiste nel generare, attraverso una sorgente artificiale (colpo di martello o piccoli esplosivi) un treno



d'onde nel sottosuolo e misurare i tempi di arrivo della perturbazione in corrispondenza di una serie di sensori (geofoni) posti sulla superficie del terreno (indagine di sismica a rifrazione) o all'interno di un foro di perforazione appositamente attrezzato (indagine down-hole, con cono sismico e cross-hole). I principali svantaggi di tali metodologie risiedono, sia nell'esiguo volume di sottosuolo esplorato, sia nei costi d'indagine relativamente alti. Tuttavia tali tecniche risultano essere quelle a maggiore accuratezza e ripetibilità.

**Indagini sismiche di tipo indiretto:** Sono metodologie basate sull'analisi delle proprietà dispersive delle onde Superficiali (onde di Rayleigh) nei mezzi stratificati. Lo scopo di questa tipologia di prospezioni è risalire ad una funzione caratteristica del terreno (curva di dispersione) univocamente correlata alla struttura meccanico-stratigrafica del sito. Considerando che le onde Superficiali sono essenzialmente un prodotto delle onde di Volume e in particolar modo delle onde trasversali (S) è possibile, a partire dalla curva di dispersione, risalire in maniera indiretta al profilo di velocità  $V_s$  attraverso opportune procedure numeriche di inversione dati.

Le indagini di tipo indiretto vengono spesso diversificate, in base alla sorgente energizzante utilizzata per sollecitare i sensori, in "attive" e "passive":

Indirette Attive: Come le più comuni tecniche dirette, sfruttano sorgenti di tipo artificiale (colpo di martello) e una distribuzione lineare dei sensori sul terreno (MASW). Il principale vantaggio di questa tipologia di acquisizione consiste, oltre alla velocità ed al basso costo della prova, nell'ottima risoluzione che si ottiene nel caratterizzare gli strati di terreno maggiormente superficiali.

Indirette Passive: Utilizzano come fonte di energia la continua vibrazione del terreno, sia di origine antropica sia naturale, definita Rumore Sismico Ambientale o semplicemente Vibrazione Ambientale. I rilievi di tipo passivo sono generalmente realizzati attraverso distribuzioni bidimensionali dei sensori e raggiungono profondità di esplorazione dell'ordine delle centinaia di metri. Il principale svantaggio di questa tipologia di prova consiste in una scarsa risoluzione per gli strati più superficiali e in un'ambiguità interpretativa, spesso, non trascurabile. Tuttavia, tali indagini, se associate ad una conoscenza preliminare delle condizioni del sito che ne "guidi" l'interpretazione, risultano essere strumenti conoscitivi molto potenti. La sismica passiva può essere applicata su stendimenti monodimensionali che prevedono l'utilizzo congiunto di più sensori (elaborazione Re.Mi. – refraction microtremors - Louie, 2001) oppure stendimenti bidimensionali a interspaziatura geofonica anche variabile, a formare una vera e propria antenna sismica di significative dimensioni, elaborandone i dati registrati con tecnica ESAC per la computazione della curva di dispersione legata alle onde di Rayleigh (Ohuri et al, 2002). può essere inoltre, realizzata attraverso un'unica stazione di misura. Questa ultima tecnica, conosciuta come metodologia HVSr (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*), differentemente da ogni altra prospezione di tipo indiretto non ha lo scopo di ricavare le proprietà dispersive dei materiali bensì le modalità di vibrazione del terreno (Nakamura 1983-2008). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare, infatti, le principali frequenze di vibrazione del suolo (fra cui la più

importante “f0”, detta frequenza fondamentale) e sfruttarle per scopi stratigrafici. Tale tecnica consente di effettuare altresì interpretazioni congiunte con altri metodi geofisici e la conoscenza di vincoli stratigrafici per la definizione di profili profondi di Vs. Inoltre è possibile invertire le curve HVSR creando una serie di modelli sintetici da confrontare con quello sperimentale fino a considerare ottimale il modello teorico più prossimo alle curve sperimentali, basato sulla propagazione delle onde di Rayleigh e di Love nel modo fondamentale e superiori.

Dall’analisi congiunta di prove sismiche attive in media alta risoluzione, sulla scorta delle conoscenze stratigrafiche locali da prove geognostiche in sito, sono stati stimati i valori di VsH (i profili associati alle misure sono visualizzabili nei report associati al DB della Microzonazione Sismica) utilizzati per le carte di MS delle Vs e dei fattori di amplificazione attesi mediante approccio semplificato tabellare.

## **5.2. Indagini di tipo geognostico/geotecnico**

Le indagini geognostiche in sito sono costituite da sondaggi meccanici a carotaggio continuo, prove CPT con punta meccanica, elettrica e talora piezocono, infine da prove penetrometriche dinamiche e, talora, stratigrafie di pozzi per lo sfruttamento delle acque di falda.

I sondaggi meccanici (indagini geognostiche di tipo diretto) hanno consentito di valutare l’effettivo assetto stratigrafico dei terreni sino alle profondità raggiunte e, talora, il prelievo di campioni e relative analisi di laboratorio per la caratterizzazione granulometrica nonché dei parametri di resistenza meccanica e deformabilità. Tale metodologia ha consentito di attraversare gli orizzonti competenti e ghiaiosi spesso presenti nel primo sottosuolo alluvionale.

Al proposito anche le stratigrafie dei pozzi per acqua hanno consentito di superare gli orizzonti ghiaiosi raggiungendo talora profondità elevate.

Le prove penetrometriche (indagini geognostiche di tipo indiretto) risultano spinte a profondità variabile, spesso sino a rifiuto nel substrato geotecnico, consentendo di desumere i caratteri stratigrafici e di resistenza meccanica alla penetrazione.

La caratterizzazione geomeccanica delle coperture ed i relativi spessori risultano di estrema importanza anche per l’elaborazione ed interpretazione delle prove geofisiche limitrofe.

Tra le indagini geotecniche sono riportate anche prove di laboratorio in colonna risonante e triassiali cicliche, di particolare interesse comprendere il comportamento dinamico dei terreni nel campo delle basse ed elevate deformazioni.

La campagna geognostica realizzata “ex-novo” e le numerose informazioni pregresse hanno quindi permesso di definire un chiaro quadro litostratigrafico e geomeccanico delle aree in esame (l’ubicazione di ciascuna prova è visualizzabile nella Carta delle Indagini ed i risultati di ciascuna prova sono riportati nell’apposito database secondo le modalità definite negli standard di archiviazione dei dati).

## 6. MODELLO DI SOTTOSUOLO

### *6.1. Andamento delle Vs nel sottosuolo*

Come evidenziato nell'inquadramento geologico (Capitolo 4) le profondità del substrato geologico attese per l'area di studio vanno dall'ordine della decina di metri sino a centinaia di metri di profondità nella zona più profonda della conoide del Marecchia. Data la quantità di informazioni geofisiche distribuite sul territorio si sono sfruttate le prove HVSR congiuntamente ai dati geognostici profondi per individuare i picchi di frequenza di maggior rilevanza per la risposta sismica locale, tra cui quelli associabili ad interfacce compatibili con un bedrock geofisico. Invece per caratterizzare i depositi di copertura (e talora del bedrock geologico) in termini di valori di velocità delle onde di taglio (profili Vs), si è potuto fare riferimento sia a prove di sismica attiva in foro (a cui si è riconosciuto maggior peso e coerenza) che a indagini sismiche indirette attive (tipo MASW, Rifrazione), passive in Array (tipo Re.Mi – ESAC) o stazione singola (HVSR). Chiaramente sviluppando lo studio di I e II Livello tramite approccio semplificato tabellare si è data priorità, ove possibile (es. in assenza di orizzonti ghiaiosi superficiali), alle misure effettuate in foro ed in array per la definizione dei profili di velocità e la stima di Vseq sino alle profondità richieste dai modelli di riferimento per la stima dei fattori di amplificazione; tuttavia ove assenti si è fatto riferimento ai valori stimati tramite inversione delle curve H/V. In presenza di coperture di elevato spessore, le tabelle utilizzate hanno previsto l'utilizzo di valori di velocità equivalente sino a 30 mt di profondità (VS30), mentre per profondità inferiori, soprattutto in corrispondenza dei rilievi collinari e presso le prime zone pedecollinari, si sono stimati valori di Vseq sino all'interfaccia copertura-substrato formazionale (generalmente caratterizzato da un sensibile incremento di rigidità sismica sebbene con  $V_s \ll 800$  m/s).

**I risultati ottenuti per i diversi siti in studio sono visualizzabili nei report associati alla Carta delle Vs e delle Indagini (Data-Base- Microzonazione Sismica).** Diversamente, per lo sviluppo dei modelli di sottosuolo utili alle analisi di RSL per gli approfondimenti di III Livello lungo la costa, si è data priorità alle prove sismiche in foro (SCPT-DH-CH) eseguite in corrispondenza/prossimità di prove in Array bidimensionale (ESAC/SPAC) ed HVSR, al fine di elaborare profili di Vs tramite *inversione congiunta*. Tale modalità di analisi consente di ottenere un'interpretazione del sottosuolo con idonea risoluzione sismostratigrafica sino ad elevate profondità e, all'occorrenza, stimare con buona approssimazione la profondità del bedrock sismico e la sua velocità rappresentativa.

Generalmente le inversioni di velocità non portano ad un ad un unico modello di velocità (non esiste l'univocità della soluzione), pertanto si sono scelti i profili che avessero le seguenti caratteristiche:

- la miglior compatibilità tra dato sperimentale e teorico
- maggior coerenza con l'assetto geologico di sito (da evidenze dirette e dati di bibliografia)
- profondità del substrato sismico prossimo ai valori attesi per il sito di studio.

I modelli  $V_s$ , determinati con le modalità appena descritte, sono stati ulteriormente “ottimizzati” aggiungendo un ulteriore vincolo alle procedure di inversione, ovvero utilizzare la stratigrafia sismica superficiale ad alta risoluzione derivata dalle indagini sismiche in foro (Down-Hole, Cross-Hole e Coni Sismici) effettuate in sito o nelle immediate vicinanze.

Pertanto, sulla scorta di tali elaborazioni (e dei dati di correlazione presenti nel database ed in bibliografia), il tratto costiero è stato suddiviso secondo 10 zone rappresentative (vedi figura 5.2), caratterizzate da modelli di sottosuolo e profili di  $V_s$  caratteristici (figura 5.3), con individuazione del bedrock sismico, utilizzati per le successive modellazioni di RSL, al fine di addivenire alle azioni sismiche di progetto per la stima dei fattori di amplificazione attesi e per le successive analisi di liquefazione.

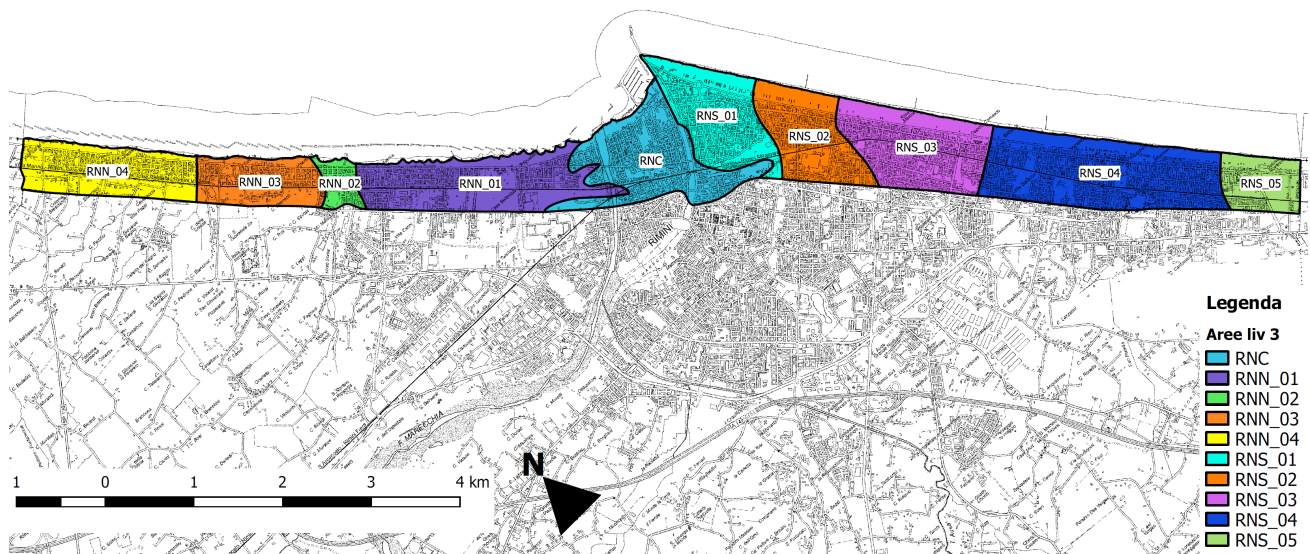
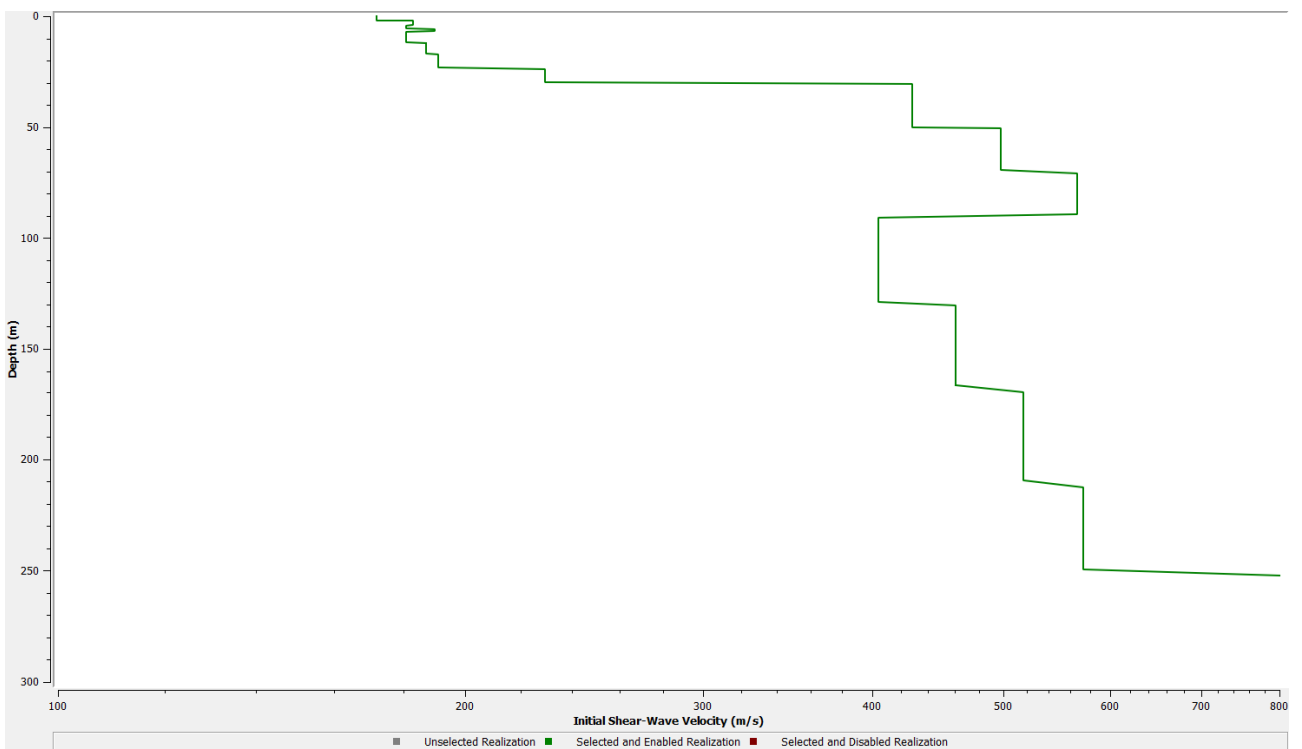


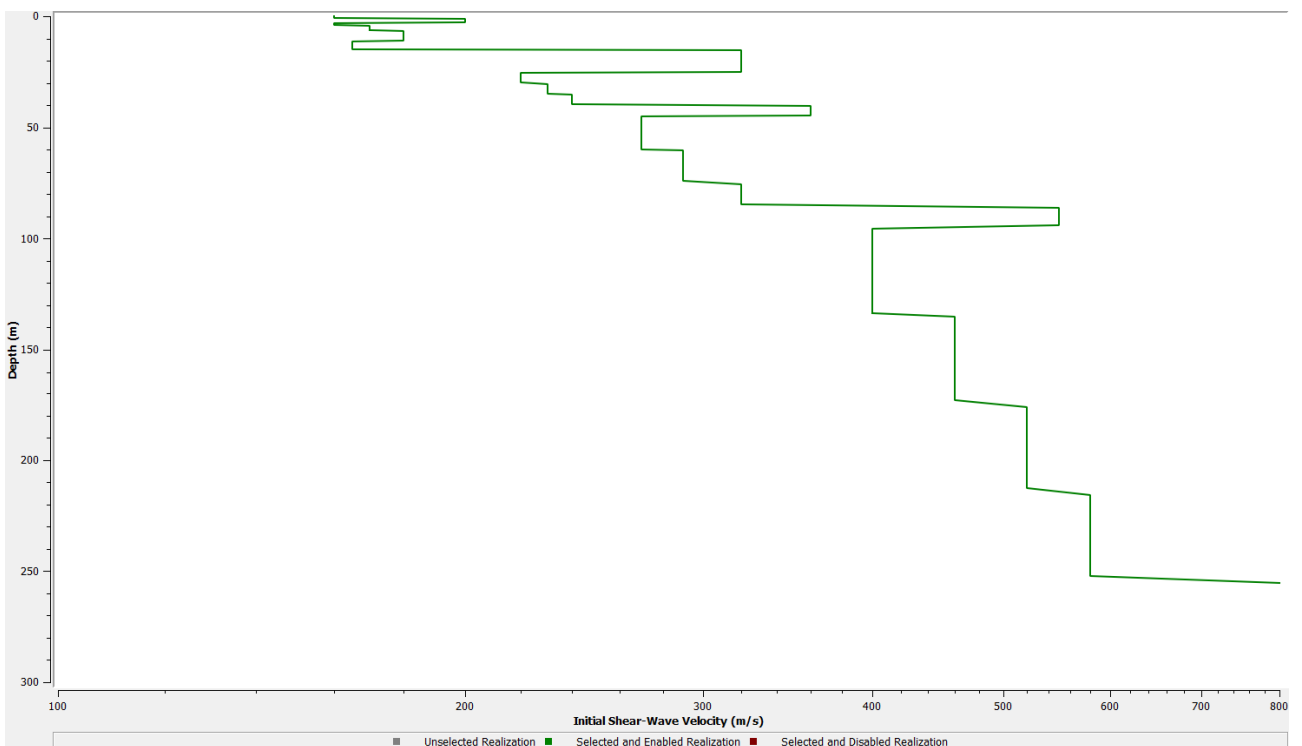
Figura 5.2- Zone a comportamento dinamico rappresentativo per le RSL lungo il tratto costiero studiato.

In particolare muovendosi lungocosta da N verso S, l'interfaccia con il bedrock sismico è stata individuata circa al contatto tra la copertura deposizionale del Sintema AEI ed il substrato geologico formazionale IMO, generalmente individuabile nei picchi di frequenza H/V significativi compresi tra 0.4-0.6 Hz; solamente in corrispondenza delle zone RNS 04 e 05 il contrasto di impedenza significativo risulta individuabile a profondità maggiori di tale interfaccia, all'interno del substrato formazionale.

Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Rimini (RN)  
Relazione Tecnico Illustrativa

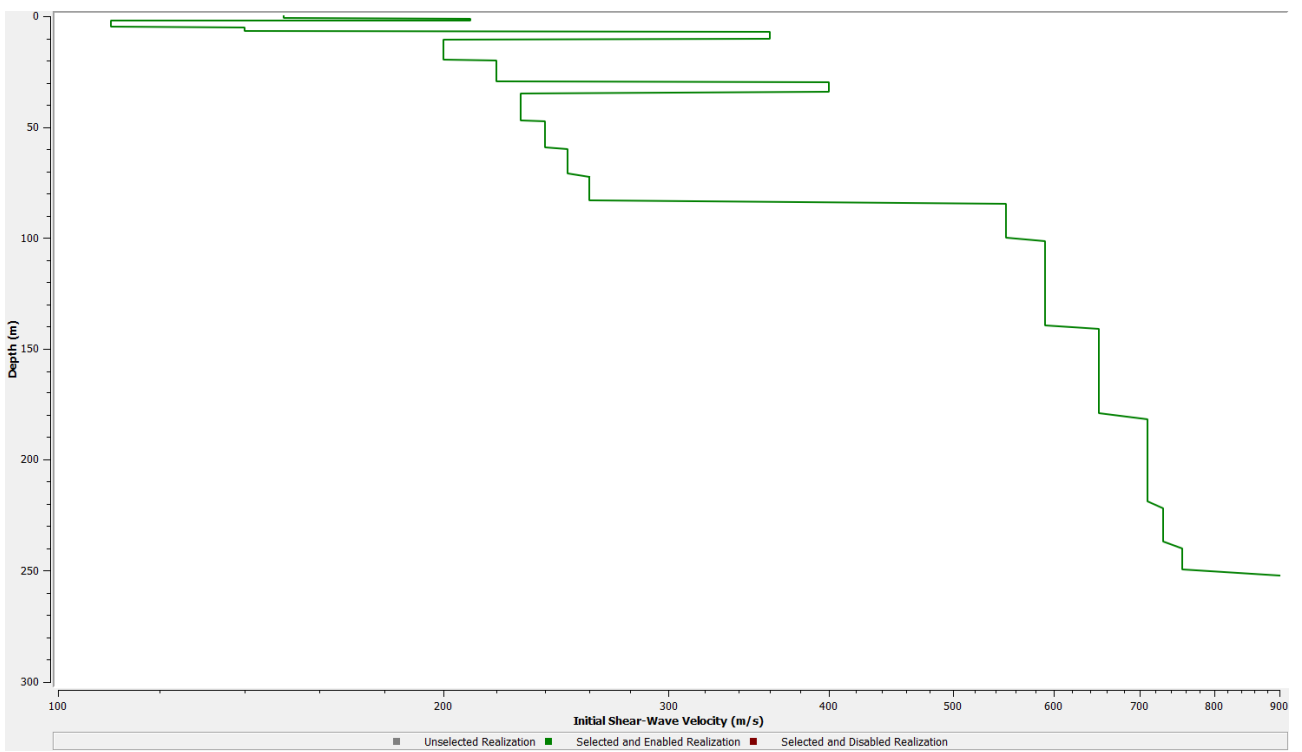


**Zona RNN\_04**

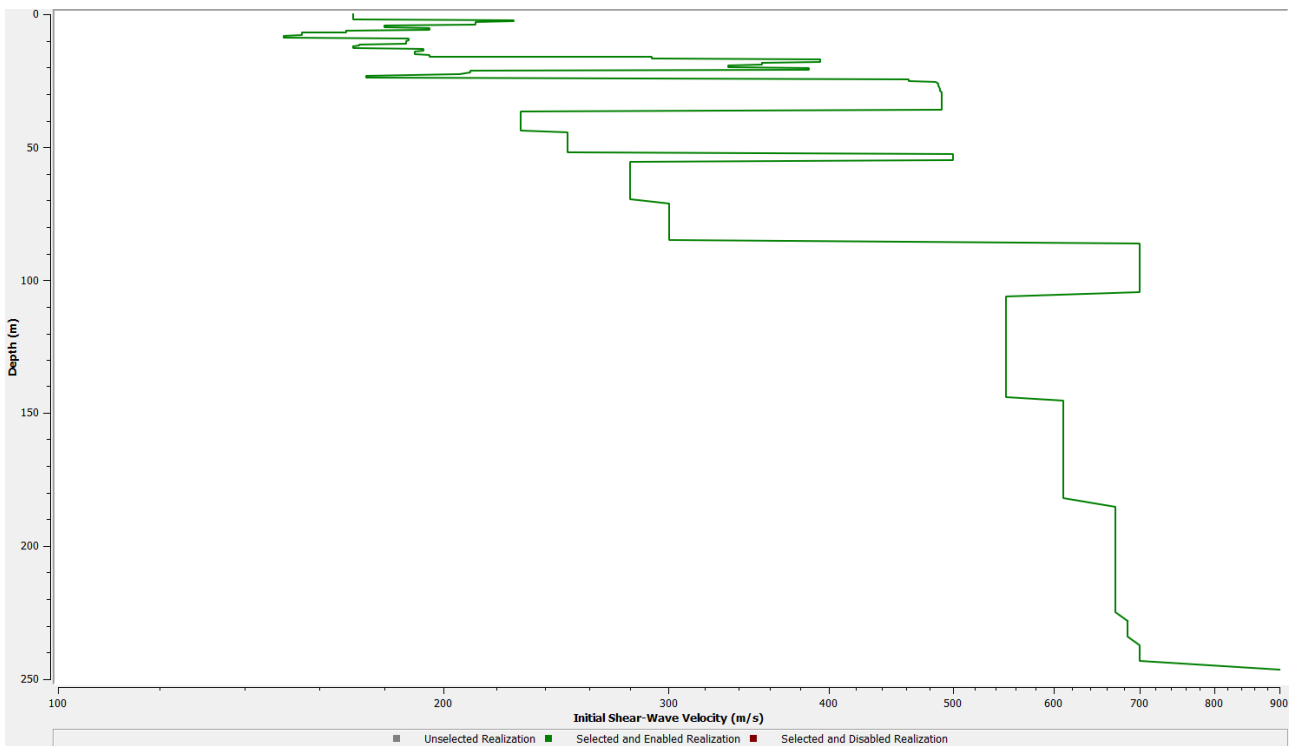


**Zona RNN\_03**

Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Rimini (RN)  
Relazione Tecnico Illustrativa

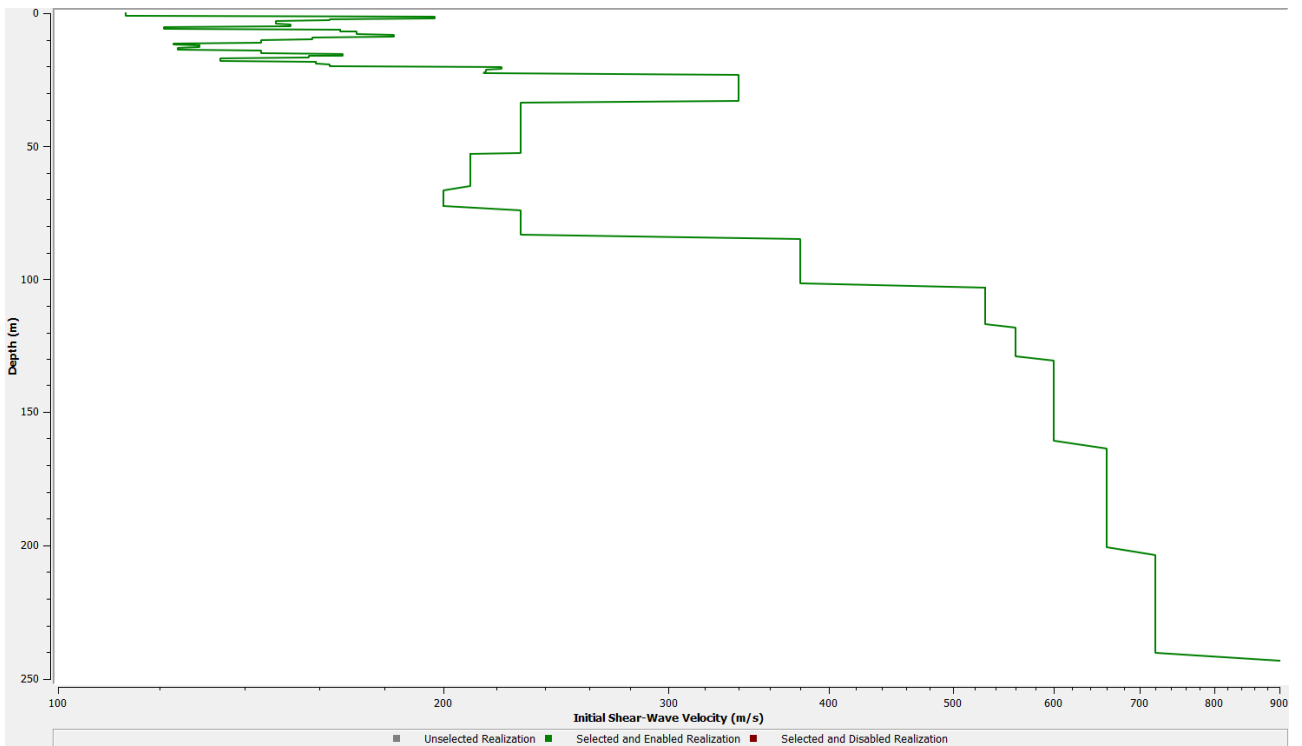


**Zona RNN\_02**

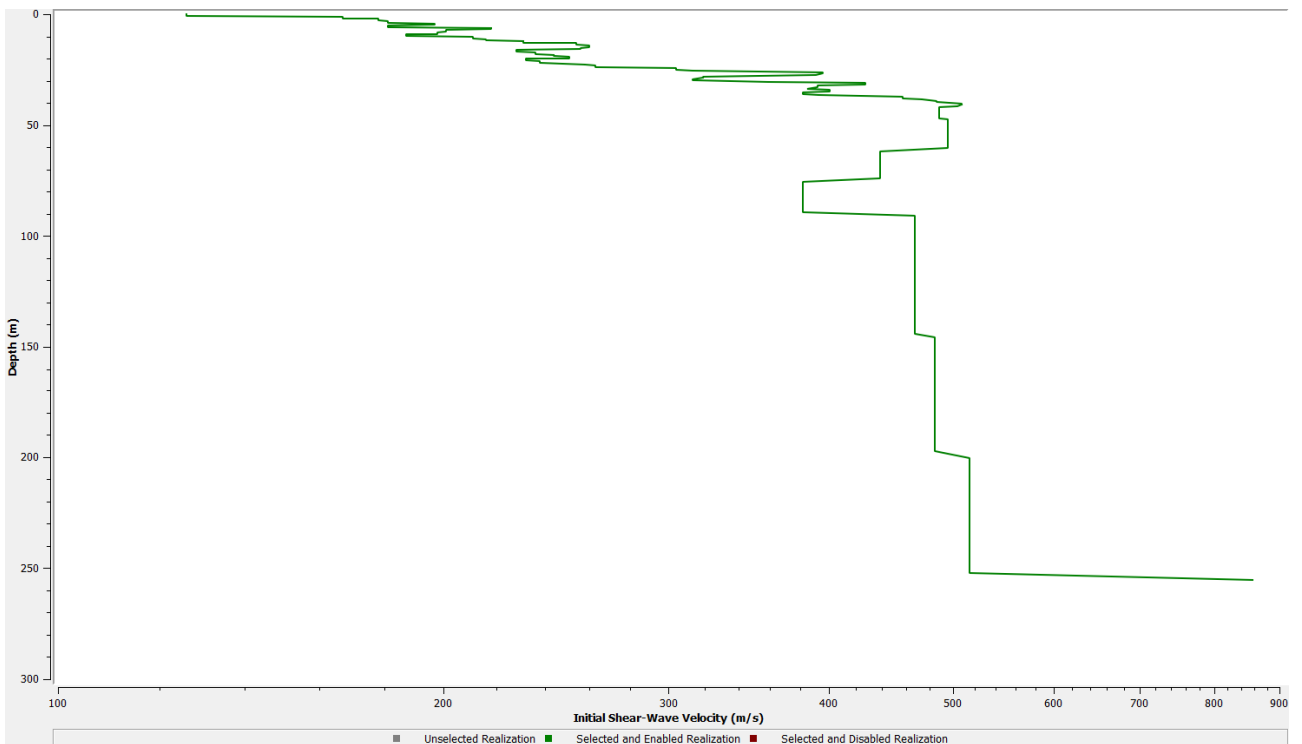


**Zona RNN\_01**

Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Rimini (RN)  
Relazione Tecnico Illustrativa

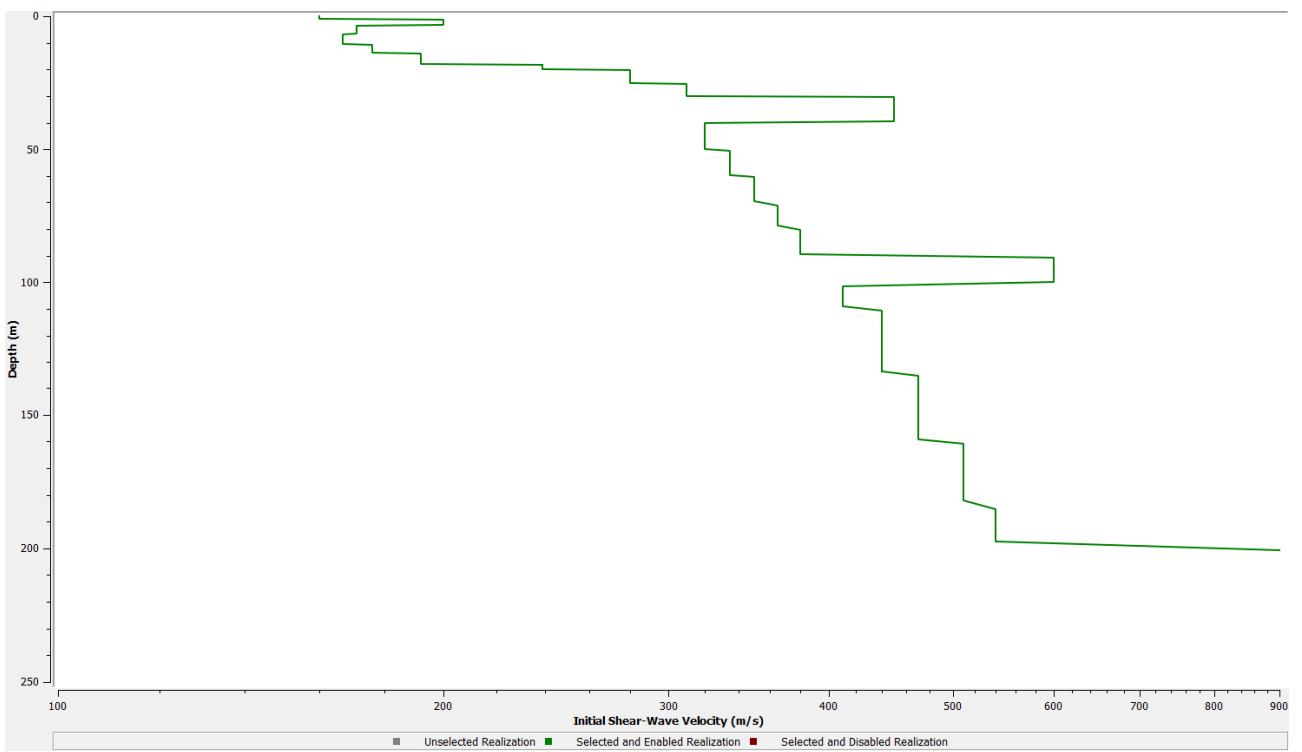


**Zona RNC**

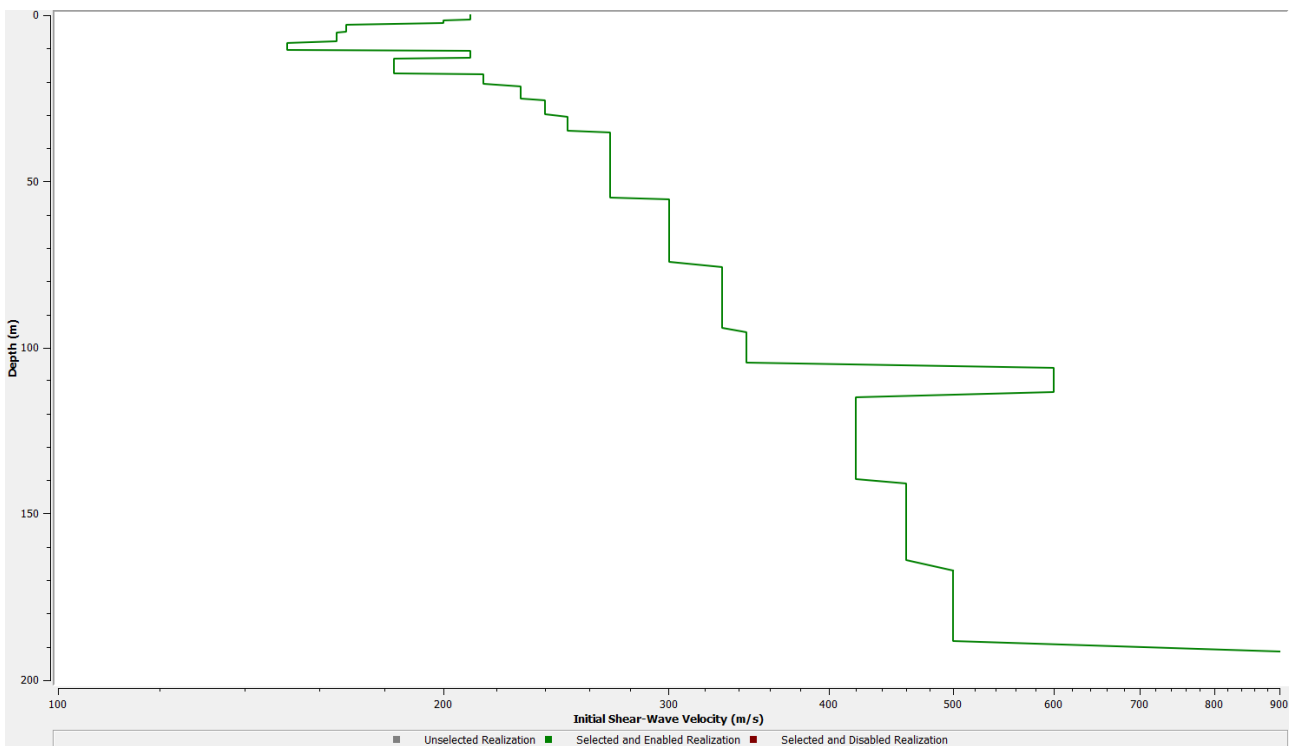


**Zona RNS\_01**

Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Rimini (RN)  
Relazione Tecnico Illustrativa

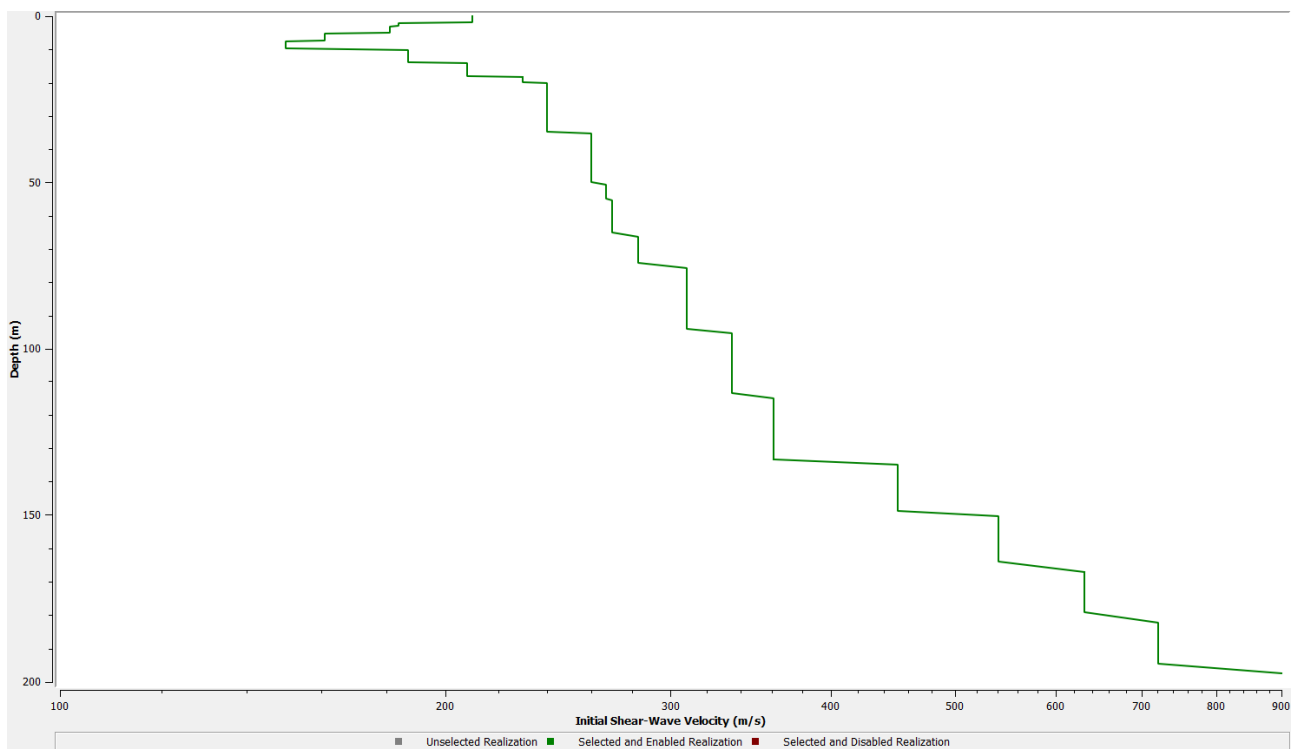


**Zona RNS\_02**

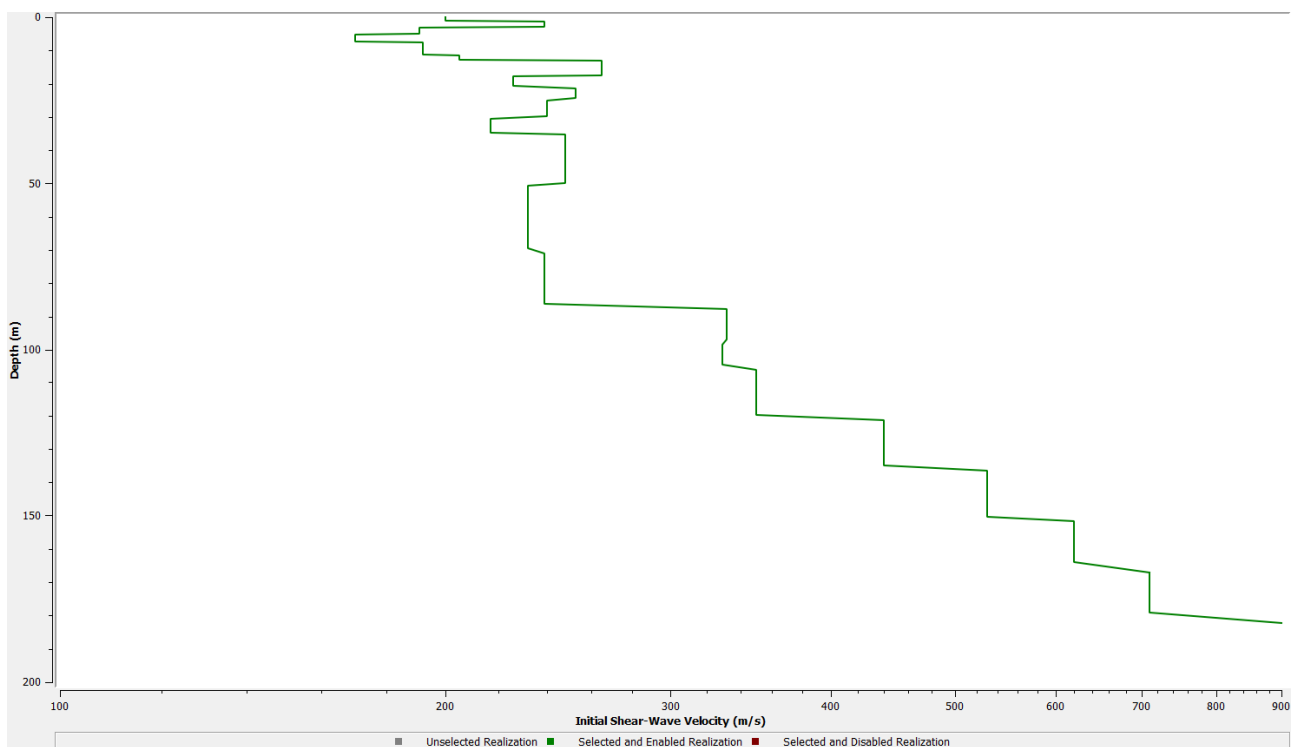


**Zona RNS\_03**





### Zona RNS\_04



### Zona RNS\_05

Figura 5.3- Profili di Vs rappresentativi per ciascuna zona di RSL in cui è stato suddiviso il tratto costiero in studio, in successione da N verso S.

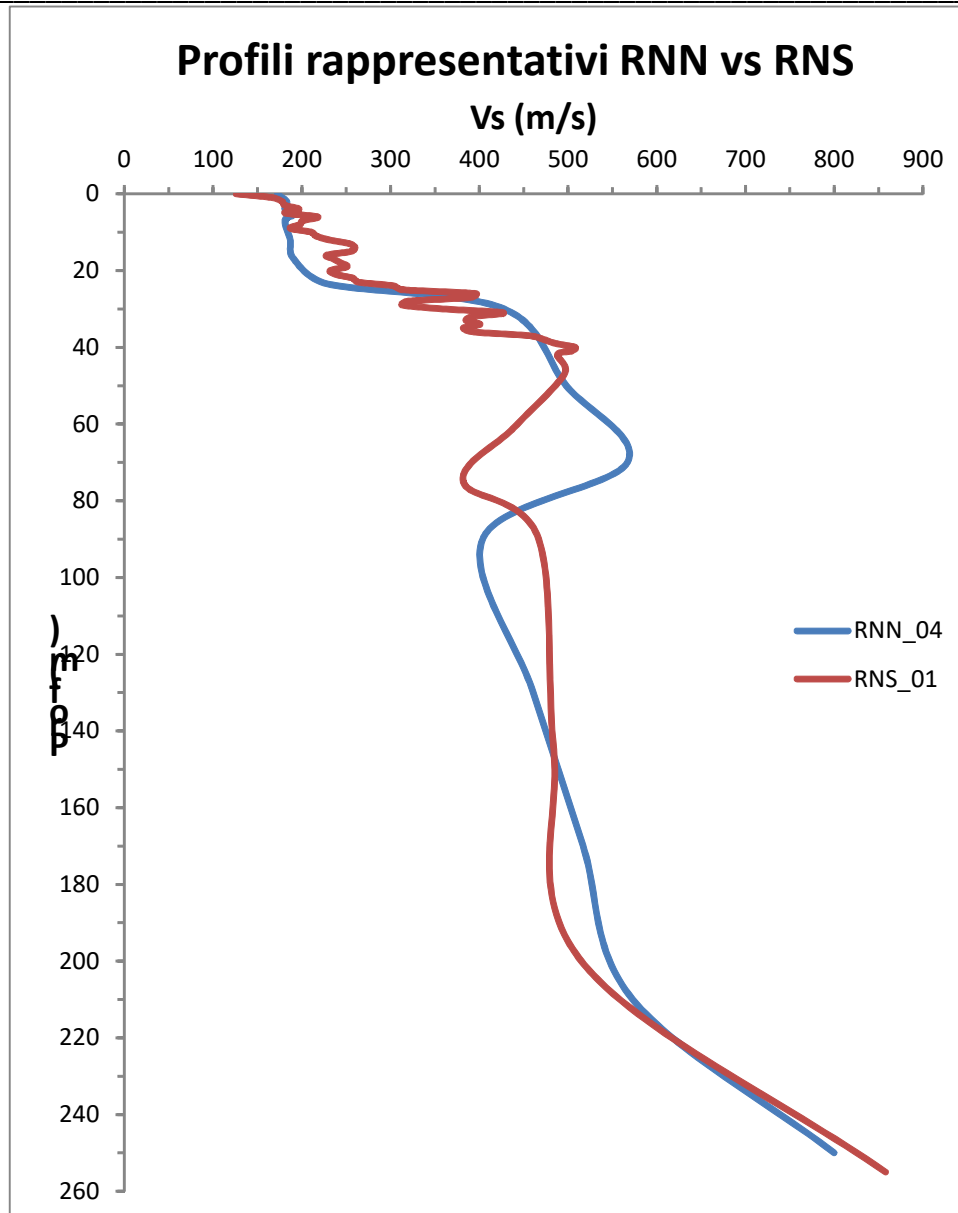


Figura 5.4- Profili di Vs rappresentativi di confronto fra zone caratteristiche di RNN e RNS (RNN\_04 vs RNS\_01).

## 7. INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE

L'areale studiato risulta caratterizzato da un assetto geologico/morfologico estremamente articolato e spazialmente variabile, passando da ambiti costieri a contesti alluvionali e quindi collinari e relative aree di transizione, contesti frequentemente caratterizzati da assenza di evidenze o affioramenti geologici superficiali. La ricostruzioni di tali assetti richiede, pertanto, una diffusa e capillare rete di informazioni geognostiche, talora non sempre possibile, soprattutto nelle aree meno urbanizzate e quelle collinari.

A livello geologico altri elementi di incertezza sono relativi all'elevato spessore dei depositi di copertura alluvionale lungo la fascia pedecollinare e costiera, interessata da frequenti ed articolate interdigitazioni di litotipi differenti, talora sino a diverse centinaia di metri di profondità, ampliando i margini di incertezza sull'interpretazione degli assetti geologici profondi. Diversamente gli assetti geologici superficiali, soprattutto lungo la fascia costiera, si ritengono adeguatamente investigati, a meno di anomalie geologiche/morfogenetiche locali, determinate soprattutto dall'azione dei corsi d'acqua locali ed in prossimità delle relative foci.

Tale aspetto riveste particolare importanza anche per quanto riguarda poi la definizione dei modelli geofisici e di comportamento dinamico di riferimento; infatti la mancanza di un adeguato numero e distribuzione di sondaggi sufficientemente profondi e relative indagini geofisiche dirette in foro, nelle aree alluvionali e costiere *non consente di rilevare "direttamente"* la posizione e caratteristiche del bedrock sismico così come definito e richiesto dalle norme di settore. Pertanto ivi è stato possibile solo attraverso l'utilizzo di metodi di indagine congiunta (soventi indiretti), basati sul prevalente utilizzo di rumore ambientale quale forzante/eccitazione energetica. Chiaramente tali metodi e le relative metodologie di elaborazione, portano con se una certa aliquota di incertezze attribuibili sia a fattori strumentali quanto ai modelli numerici interpretativi; per cui nelle analisi di tali dati sperimentali e relative valutazioni di sintesi si ritiene sempre e comunque estremamente necessario attribuire un significativo peso alle conoscenze/evidenze geologiche disponibili ed alla coerenza con il modello geologico di riferimento.

Il programma delle indagini geotecniche va perciò commisurato, oltre che al problema sismico e geotecnico, anche ai codici di calcolo impiegati nelle analisi numeriche (Microzonazione Sismica di livello superiore al 1°) nonché all'accuratezza dei modelli utili ad affrontare le diverse problematiche di pericolosità sismica (analisi della risposta sismica locale, stima del potenziale di liquefazione, analisi della stabilità dei pendii, valutazione dei cedimenti).

## **8. METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI**

Nella prima fase di studio, sono stati acquisiti tutti i dati bibliografici e d'archivio riguardanti la cartografia geologica, geomorfologica, e le indagini geognostiche pregresse nel Comune di Rimini. Nella seconda fase sono state definite, di concerto con l'amministrazione comunale ed in funzione delle risorse disponibili agli approfondimenti di indagine, le aree da sottoporre con maggior attenzione allo studio di Microzonazione Sismica; chiaramente l'attenzione prioritaria è stata volta alle zone urbanizzate ed urbanizzabili così come previste nei piani urbanistici comunali e/o di previsione, definendo quindi i settori territorio sul quale eseguire la campagna di nuove indagini geognostiche/geofisiche di approfondimento per le finalità di MS.

Chiaramente tali indagini sono state progettate e pianificate nell'ottica di un perfezionamento ed approfondimento, per quanto possibile, delle conoscenze sui vari assetti geologici e, quindi, per la partizione

del territorio di interesse in macro/microzone a comportamento sismico omogeneo sulla scorta di una base di dati sufficientemente robusta.

Quindi i dati sperimentali di nuova e mirata acquisizione, così come quelli derivati dagli archivi pubblici e privati (ritenuti adeguatamente rappresentativi), sono stati utilizzati per analizzare problematiche di MS attraverso modelli numerici di riconosciuta validità scientifica nonché secondo le procedure ed indicazioni raccomandate dalle linee guida regionali e della Protezione Civile.

I risultati di tali elaborazioni sono stati esplicitati, quindi, attraverso le basi dati numeriche allegate al presente studio e gli elaborati grafici di sintesi richiamati al successivo Par. 9.

## **9. ELABORATI CARTOGRAFICI**

### **9.1 MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO I**

#### ***9.1.1 Carta Geologico-Tecnica***

La “Carta Geologico-Tecnica” rappresenta un modello integrato di sottosuolo funzionale alle valutazioni sismiche legate agli studi di Microzonazione Sismica, che permette di individuare in modo semplice ed efficace, i rapporti stratigrafici tra le litologie che rappresentano il substrato formazionale e le coperture.

Tale elaborato, in generale, è costruito in base ad un’attenta valutazione delle Carte Geologiche e Litologiche di riferimento e da un’accurata analisi delle prove geognostiche, geotecniche e geofisiche a disposizione.

In dettaglio, la carta viene costruita codificando le litologie e le formazioni affioranti in differenti unità litotecniche specificate dagli standard di archiviazione informatica 4.1 allegati alle linee guida “Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica”.

Nel caso specifico, è necessario ricordare (come già descritto al capitolo 4) che i depositi di superficie affioranti nelle aree di studio risulteranno sostanzialmente omogenei in funzione delle MACROAREE di appartenenza (LITORALE, ALLUVIONALE, COLLINARE), in virtù degli ambiti de posizionali, processi sedimentari e aspetti litogenetici caratteristici.

Pertanto mentre i depositi superficiali litorali sono prettamente assimilabili a depositi recenti di Piana costiera, fronte deltizia e piana di sabbia prevalentemente riferibili all’Unità AES8a, mentre la macroarea alluvionale è rappresentata da unità geo-litologiche alluvionali, rappresentate dal Sub-Sintema di Ravenna (AES<sub>8</sub>), di Villa Verucchio (AES7) e in minor misura di Bazzano (AES6); infine nella macroarea collinare dominano i terreni appartenenti alle formazioni geologiche plio-pleistoceniche della SUCCESSIONE NEOGENICO-QUATERNARIA DEL MARGINE PADANO congiuntamente a depositi di copertura di natura eluvio-colluviale, depositi di versante e di accumulo gravitativo.

Pertanto, per ottenere un Carta Geologico-Tecnica che rappresentasse adeguatamente le condizioni del territorio in esame, è stato scelto di procedere come segue:

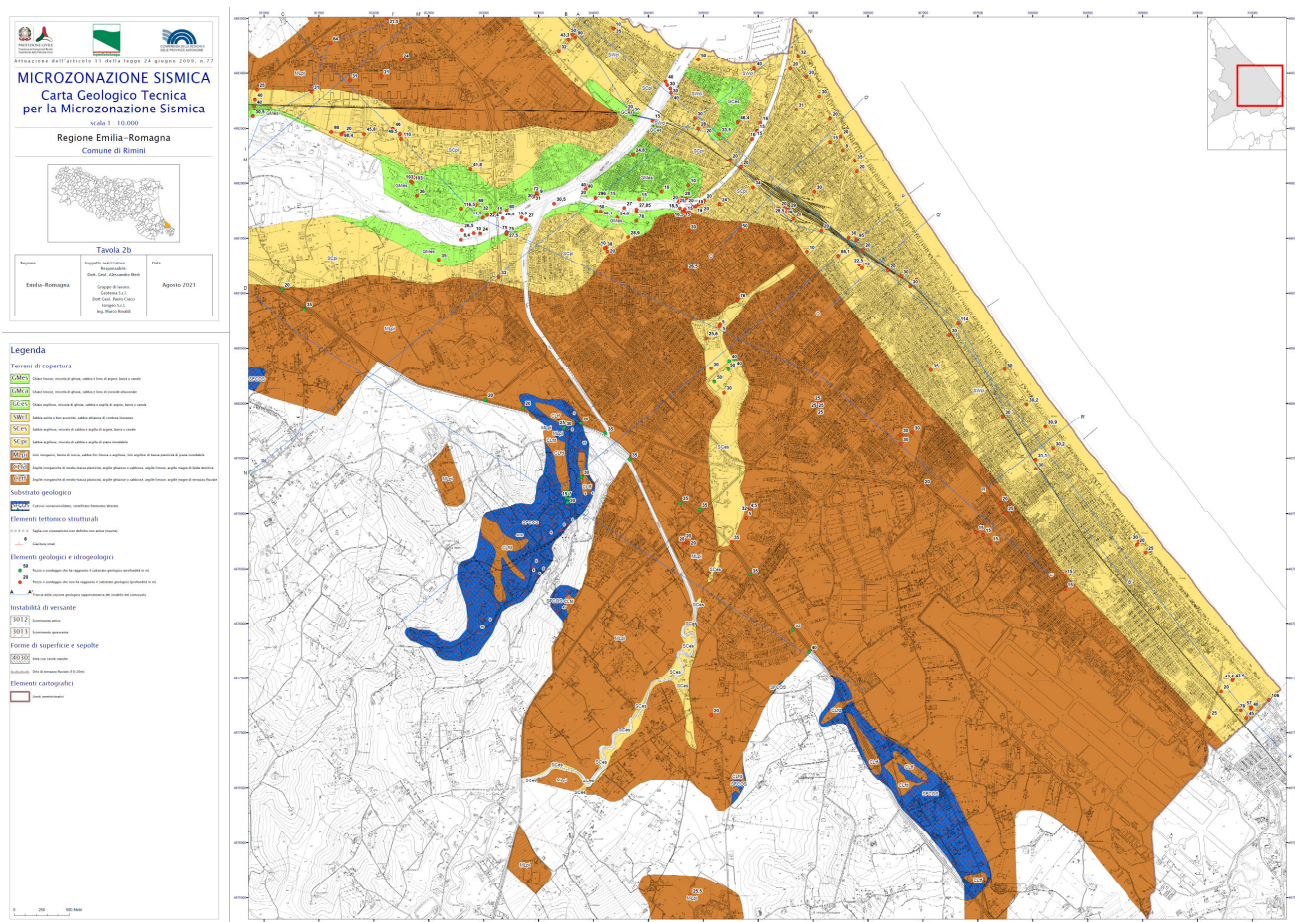
- Dai risultati dei numerosi dati geognostici sono state estrapolate le stratigrafie che consentivano di caratterizzare ed individuare con certezza (ove possibile) la posizione del substrato geotecnico;
- Per i settori di pianura con substrato profondo ci si è avvalsi di dati e informazioni desumibili dalle sezioni geologiche profonde CARG e dagli studi sulla conoide del Marecchia;
- E' stata valutata, in ciascun log stratigrafico estrapolato, la litologia prevalente, la natura geologica e il possibile ambiente deposizionale;
- Le differenti litologie evidenziate, derivate dai dati puntuali di sondaggio, sono state interpolate in pianta per ottenere una realistica distribuzione sul territorio;
- Ciascuna litologia (ed ovviamente ciascun poligono ad essa associato) è stato codificato in unità litotecnica per la realizzazione della Carta Geologico-Tecnica.
- Sono stati cartografati i rari affioramenti del substrato marino visibili in corrispondenza di scarpate o scavi, prevalentemente antropici, lungo le sponde di erosione fluviali od in corrispondenza delle zone in dissesto.
- Sono stati cartografati i terreni di copertura (con spessori > 3 metri) suddivisi su base granulometrica con l'indicazione dell'ambiente genetico/deposizionale.
- Sono state cartografate le instabilità di versante con distinzione dello stato di attività e della tipologia di movimento.
- Sono state cartografate le forme di superficie e sepolte (es. conoidi alluvionali e falde detritiche).
- Sono stati cartografati gli elementi tettonico strutturali quali faglie, assi sinclinali ed assi anticlinali.
- Sono stati cartografati gli orli di terrazzo fluviale.

Questi dati si sono resi necessari alla definizione del modello geologico del sottosuolo per l'intero territorio e propedeutici per la definizione in chiave sismica degli effetti attesi al suolo.

In ciascuna carta sono inoltre rappresentate le tracce delle sezioni litotecniche (di superficie e profonde) elaborate e/o ritenute rappresentative per l'ambito comunale, generalmente ortogonali fra loro e passanti per gli abitati principali. Tali sezioni, sviluppate a partire dal modello digitale del terreno e lungo una rete di sondaggi, vengono rappresentate in allegato alla presente relazione ed a scala varia, in funzione del grado di risoluzione necessario ad illustrare l'assetto locale, permettendo di definire gli andamenti e lineamenti geologici principali nonché di definire le dinamiche evolutive dell'area e gli aspetti geomorfologici e strutturali salienti.

In particolare, mentre le sezioni litotecniche superficiali costiere (denominate F-F', L-L', O-O', Q-Q', R-R') risultano particolarmente importanti per la definizione delle problematiche legate al potenziale di liquefazione dei depositi sabbiosi costieri, le sezioni geologiche profonde risultano un importante ausilio per la stima della profondità del bedrock geologico lungo la costa e attraverso la conoide del Marecchia, nonché

un robusto riferimento per la correlazione dei picchi di frequenza H/V con strutture geologiche profonde e, all'occorrenza, poter individuare il bedrock sismico di riferimento nei vari punti di verifica.



*Figura 9.1.1 – Miniatura esemplificativa di una Carta Geologico-Tecnica*

### **9.1.2 Carta delle Frequenze Naturali del Terreno**

Sulla base dei risultati delle registrazioni a stazione singola HVSR, ritenute più rappresentative (sia di nuova realizzazione che pregresse), si è sviluppata la mappa delle Frequenze Naturali dei terreni dell'ambito comunale studiato. In particolare, data la diffusa presenza di un substrato geologico profondo si è conferito maggior peso alle misure effettuate con dispositivi di registrazione a bassa frequenza di risonanza strumentale.

Nonostante, comunemente, negli studi di Microzonazione Sismica venga prodotta un'unica carta delle Frequenza Naturali, è stato scelto in questo caso di rilasciare 4 differenti elaborati (range di frequenze) per non perdere importanti informazioni legate a massimi risonanti secondari, talora significativi per l'assetto geologico locale e/o in presenza di spessi depositi di copertura con importanti orizzonti risonanti interclusi (es. orizzonti ghiaiosi di rilevante spessore ed estensione, talora coalescenti, presenti spesso in prossimità del tetto di ogni sistema).

Al fine di chiarire quanto appena espresso viene di seguito riportato un esempio sui criteri di elaborazione adottati; talora, a seguito degli effetti di smorzamento indotti da depositi soffici e profondi e/o dalla presenza di situazioni stratigrafiche con inversioni di velocità, il giudizio e la definizione dei picchi di frequenza sono stati guidati anche dal reciproco andamento delle singole componenti verticali ed orizzontali del moto registrato. In figura 9.1.2 è riportata, a titolo di esempio, la misura 099014P527HVSR604.

Ad es. la misura con codice 099014P527HVSR604, così come la maggior parte dei rilievi realizzati, è caratterizzata da più massimi in Frequenza. Quello a massima ampiezza e di minor valore in frequenza viene indicato come F0 che, nell'esempio, presenta una frequenza di circa 0.5 con ampiezza media di circa 2.1.

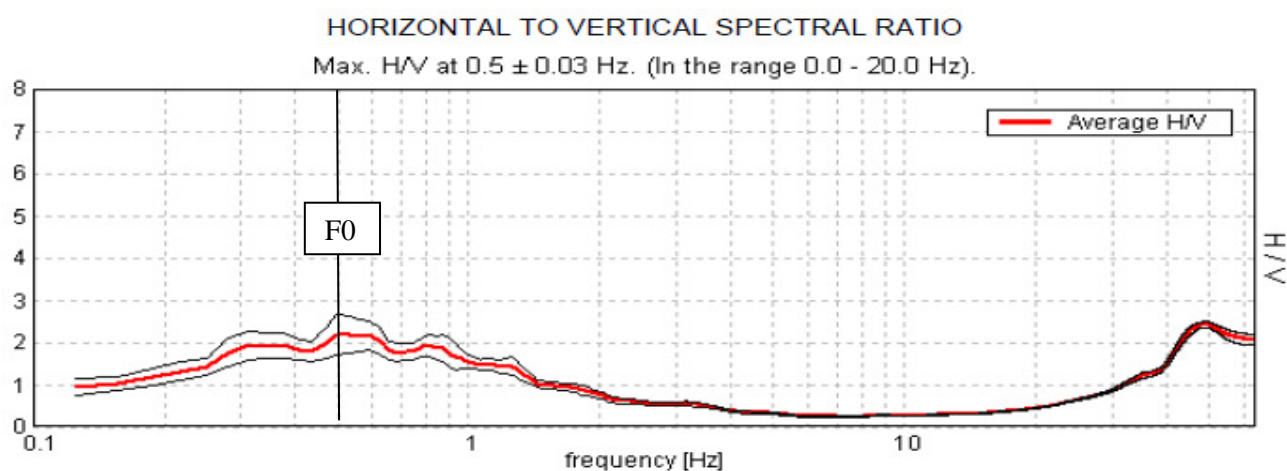


Figura 9.1.2-Curva dei rapporti spettrali relativa alla registrazione 099014P527HVSR604.

Tutti i picchi di frequenza rappresentativi ricadono nell'intervallo di Frequenze ingegneristico di risonanza delle strutture (compreso all'incirca tra 0.5 e 15 Hz) e, dunque, risultano potenzialmente pericolosi per fenomenologie di amplificazione locale o, comunque, di alterazione del moto sismico atteso. Il picco a più bassa frequenza F0 indica il "contrasto d'impedenza sismico" più significativo in profondità ed a cui è associata la maggior aliquota di trasferimento dell'energia del moto vibratorio/sismico e, pertanto, risulta informativo ai fini della ricostruzione del substrato sismico dell'area. Inoltre tutti i valori di frequenza individuati con tale tecnica, essendo il frutto di medie statistiche, sono affetti da una deviazione standard che ne può comportare uno scostamento talora di entità pari al 20-25% del valore definito.

Nella definizione dei picchi/range di frequenza rappresentativi si è tenuto in considerazione quanto già emerso in occasione dello studio di microzonazione sismica a supporto del PSC di Rimini (stesura 2011) ed in significativa coerenza con le analisi e modelli definiti in Mascandola et al., 2019. Al proposito, quale elemento distintivo riconoscibile su tutto il territorio, si constata la presenza in bassissima frequenza, di un massimo con ampiezza variabile da misura a misura, presente in quasi tutte le acquisizioni a stazione singola realizzate nel Comune. Tuttavia un modesto trend di incremento nel valore assoluto di f0 è generalmente rilevabile procedendo lungo costa verso sud (in prossimità del confine comunale con Riccione) e nell'entroterra verso SW, coerentemente allo sviluppo dell'alto strutturale individuabile nelle sezioni

geologiche profonde in prossimità del margine comunale e zone pedecollinari meridionali ed all'andamento delle isobate della Base AEI-AES rappresentate in Figura 4.12 (prog. CARG).

Pertanto sebbene la DGR 630/2019 e successivo aggiornamento DGR 476/2021 suggerisca determinati ambiti di frequenza a livello generale, data l'estensione territoriale e la grande variabilità degli assetti geologici ivi presenti, si potrà fare riferimento alle specifiche carte che rappresentano in modo omogeneo i valori di  $F_0$  all'occorrenza rilevati in ciascun punto di misura. Invece per una stima indicativa delle profondità associabili a ciascun valore di frequenza ci si potrà riferire ai range rappresentativi riportati al par. 3.1.1 della succitata DGR e successivo aggiornamento.

Lo schema interpretativo per la stesura delle mappe di frequenza prevede che la frequenza fondamentale dell'area, indicata con codice  $F_0$ , rappresenti la frequenza significativa più bassa ed a maggior ampiezza fra tutte quelle riscontrate. Diversamente i valori di ampiezza rappresentativi per ciascuna classe di frequenza, vengono illustrati tramite diversa colorazione dei simboli secondo specifici range caratteristici per l'area (es. vedi figura 6.3).

#### Punti di misura della frequenza ( $f_0$ )

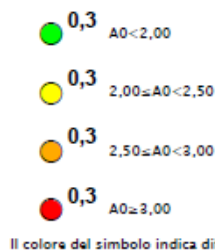


Figura 6.3 - Codifiche per la visualizzazione in mappa delle Frequenze e della Ampiezze individuate dai rilievi HVSR.

In base a quanto esposto in figura 6.4 ne viene riportata un esempio in miniatura della tavola.

E' necessario precisare che, talora, esistono anche ulteriori massimi con frequenza  $F > 10-16$  Hz che, diversamente dai precedenti, non sono stati caratterizzati perché ritenuti non particolarmente significativi per la pericolosità sismica dell'area. Questa tipologia di massimi rappresenterebbe infatti contrasti di impedenza molto superficiali che, in relazione al normale piano di fondazione degli edifici, è ragionevolmente non significativo.

E' opportuno comunque ricordare che esiste abbondante letteratura comprovante il fatto che l'ampiezza del picco H/V, pur essendo legata all'entità del contrasto di impedenza tra strati, non è correlabile all'amplificazione sismica in modo semplice (cfr. Mucciarelli e Gallipoli, 2001; SESAME, 2005 e referenze ivi contenute) e può essere sensibilmente influenzata da altre variabili naturali e strumentali.



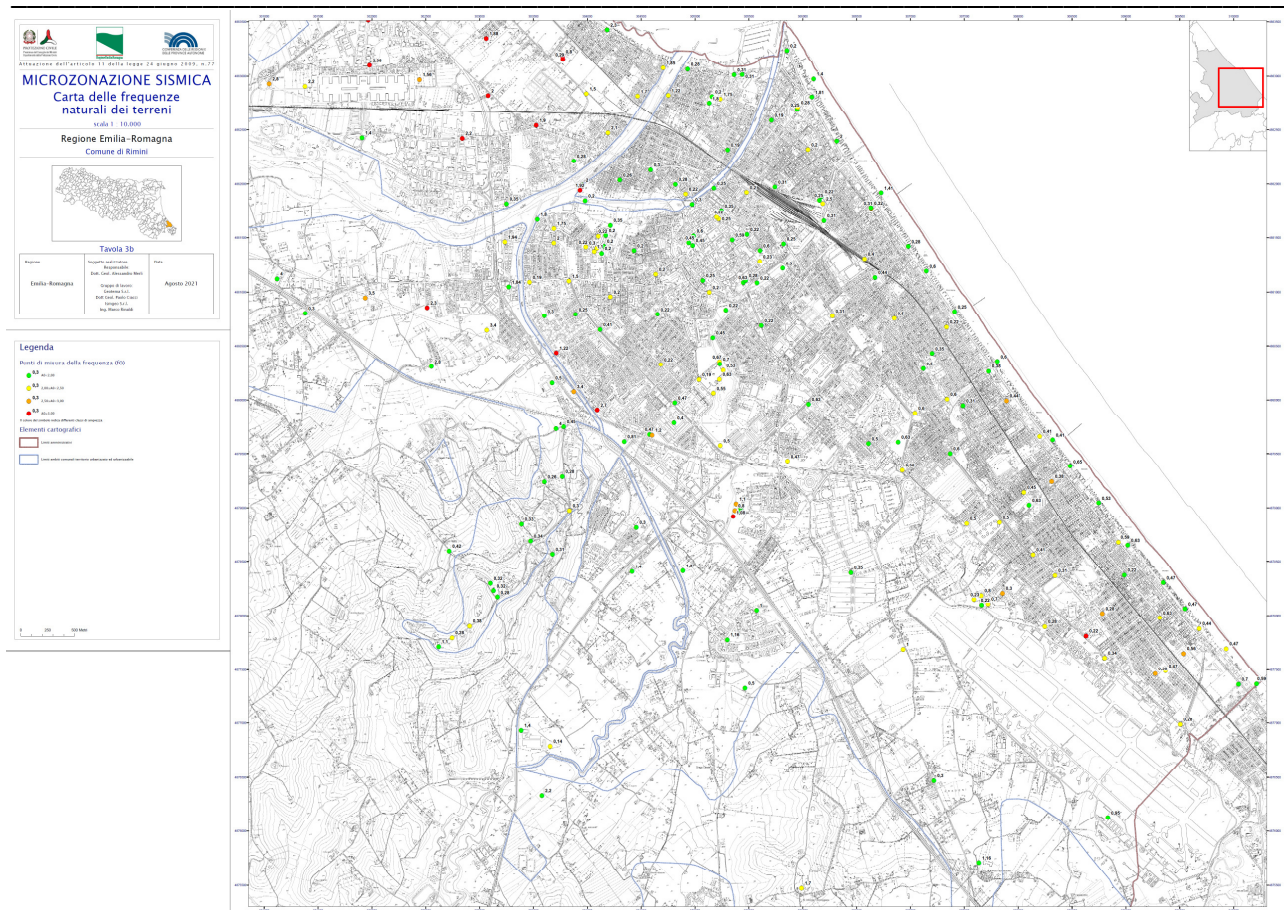


Figura 9.1.4 – Miniatura esemplificativa di una Mappa delle Frequenze Naturali dei Terreni (F0).

### 9.1.3 Carta delle MOPS (Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica)

La carta delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica di Livello 1 costituisce il documento fondamentale di questo livello di approfondimento. La carta individua le microzone ove, sulla base di osservazioni geologiche e geomorfologiche e delle valutazioni dei dati litostratigrafici è prevedibile l'occorrenza di diversi tipi di effetti prodotti dall'azione sismica (amplificazioni, instabilità di versante, liquefazione, ecc...). Sulla base degli elementi geologico-morfologici individuati, precedentemente descritti e già riportati nella Carta Geologico Tecnica e delle colonne litostratigrafiche desumibili dalle prove geognostiche, è stata redatta la Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica, restituita a scala 1:10.000.

In funzione delle informazioni rappresentate, la legenda è distinta nelle seguenti parti:

- Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali.
- Zone suscettibili di instabilità.
- Forme di superficie e sepolte.
- Tracce di sezione topografica.
- Punti di misura del rumore ambientale.

*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Rimini (RN)*  
Relazione Tecnico Illustrativa

In riferimento agli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica del Dipartimento di Protezione Civile e gli Standard di rappresentazione e archiviazione informatica MS versione. 4.1, sono state individuate e delimitate le zone a comportamento equivalente in occasione di sollecitazione sismica.

Per la copertura dell'area di studio sono state sviluppate 3 tavole dell'elaborato MOPS di cui nel seguito se ne riporta una miniatura.

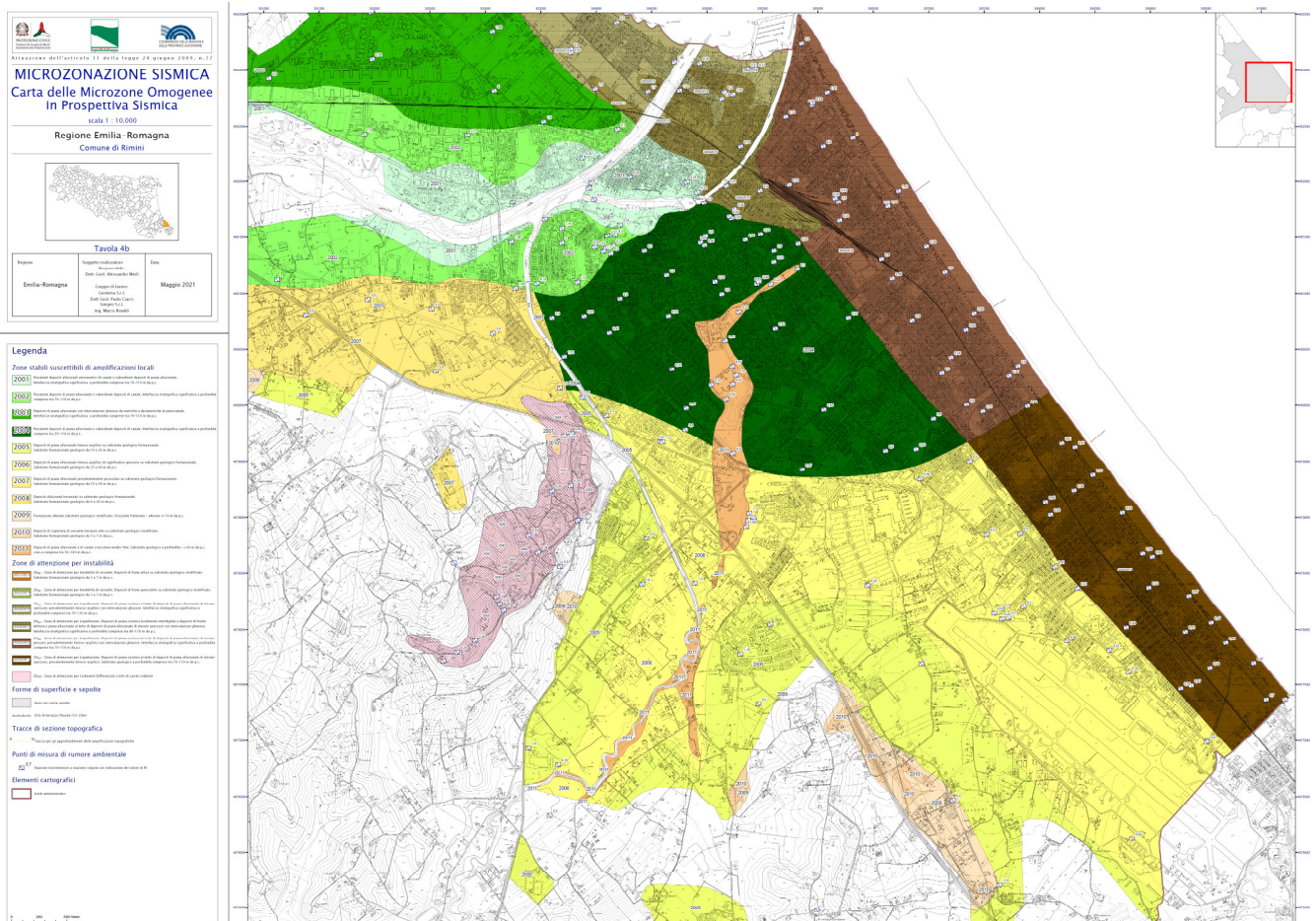


Figura 9.1.5 - Miniatura esemplificativa di una Carta delle MOPS.

Le microzone possono essere classificate in tre categorie:

- a) zone stabili, nelle quali non si ipotizzano effetti locali di rilievo di alcuna natura (substrato geologico in affioramento con morfologia pianeggiante o poco inclinata – pendii con inclinazione inferiore a circa 15°);
- b) zone stabili suscettibili di amplificazioni locali, nelle quali sono attese amplificazioni del moto sismico, per effetto dell'assetto litostratigrafico e morfologico locale;
- c) zone suscettibili di instabilità, nelle quali gli effetti sismici attesi e predominanti sono riconducibili a deformazioni permanenti nel territorio. I principali tipi di instabilità sono: instabilità di versante, liquefazioni, faglie attive e capaci e cedimenti differenziali.

In base a tale modalità di classificazione ed alle peculiarità del territorio studiato si possono trarre le seguenti considerazioni:

#### Zone stabili

All'interno del territorio del territorio comunale non sono state riscontrate microzone definibili come "stabili". Questo è dovuto in particolare al fatto che non è presente in affioramento a bassa acclività il bedrock sismico ne quello geologico inalterato.

#### Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

All'interno dei territori in studio sono presenti Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali per soli motivi stratigrafici rappresentate dalle colonnine stratigrafiche con codice 2001-2002-2003-2004-2005-2006-2007-2008-2009-2010-2011-2018-2019-2020-2021. Le ultime 4 zone sono quelle costiere contraddistinte da valori di  $0 \leq IPL < 2$ .

La corrispondenza tra elementi di copertura geologico-tecnici prevalenti e le Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali della Carta delle MOPS diventano quindi le seguenti:

Zone stabili: n. 15

codice colonnina	copertura
2001	GM/ML
2002	SC
2003	CL/ML
2004	ML
2005	SC/ML
2006	ML
2007	ML/SC
2008	CL
2009	SFCOS
2010	CL
2011	SC
2018	SW
2019	SC/GC
2020	SW
2021	SW

La litologia prevalente delle coperture è sicuramente influenzata dai processi deposizionali e genetici di messa in posto dei sedimenti. Come si può notare la maggior parte delle aree stabili suscettibili di amplificazione per motivi stratigrafici appartiene alla Macroarea Alluvionale, costituita da depositi di piana alluvionale prevalentemente limoso-argillosi di significativo spessore (dell'ordine da alcune decine di metri sino ad oltre 200 mt nei settori più profondi della conoide alluvionale) con subordinati depositi di canale localmente più grossolani (strutture di canale e paleoalveo). In ambito collinare invece (rappresentato dalle colonnine 2009-2010), le coperture superficiali sono rappresentate da limi argillosi di alterazione del substrato e/o di copertura per accumulo eluvio/colluviale o detritico con spessori variabili da alcuni m (3-5 m specialmente in sommità di versante) fino a 7-10 m nelle zone di impluvio e/o di fondovalle. In tale

fattispecie vengono ricompresi altresì modesti lembi di terrazzo alto. Lungo limitati tratti sub pianeggianti di fondovalle immediatamente prospicienti le pendici dei versanti, sono inoltre presenti depositi di copertura alluvionali direttamente poggianti sul bed-rock geologico (colonnine 2005-2006-2007-2008).

#### Zone suscettibili di instabilità

Le zone suscettibili di instabilità individuate all'interno delle aree urbanizzate e urbanizzabili del comune fanno riferimento prettamente ad aree con presenza di fenomeni di instabilità gravitativa su aree collinari o di instabilità per liquefazione lungo la zona costiera. Le aree instabili per frana presentano stati di attività sia quiescenti che attivi.

Zone Instabili: n. 6

	<b>codice colonnina</b>	<b>copertura</b>
2012		CL
2013		CL
2014		SW
2015		SC/GC
2016		SW
2017		SW

Mentre le aree in dissesto individuate risultano sostanzialmente marginali alle infrastrutture ed aree urbanizzate dell'ambito collinare (e talora a case sparse), le problematiche di instabilità per liquefazione risultano interessare gran parte dell'urbanizzato e delle strutture/infrastrutture strategiche (viabilità, linea ferroviaria, stazioni ferroviarie, portocanale, scuole, caserme, ecc.) presso le località costiere, nonché parte dell'area urbana storica. A tal proposito si rammenta come a seguito degli approfondimenti di Livello III, svolti secondo scenari di pericolosità sismica definiti per un tempo di ritorno di  $T_r=475$  anni, una modesta parte (la fascia di prisma deposizionale più a ridosso della paleofalesia) delle zone individuate come 30502014, 30502015, 30502016, 30502017 ("instabili per liquefazione"), siano risultate contraddistinte da valori di potenziale di liquefazione  $0 \leq IPL \leq 2$ , generalmente indice di una bassa probabilità di occorrenza oltreché de modeste manifestazioni superficiali e ridotti cedimenti post-sismici attesi. Pertanto nelle carte di approfondimento superiore tali microzone sono state stralciate dalle zone 30502014, 30502015, 30502016, 30502017 e indicate, nel database di MS3, rispettivamente con il codice 2018, 2019, 2020, 2021.

Tuttavia si ribadisce come tali valutazioni siano afferibili solo a  $T_r \leq 475$  anni, mentre per tempi di ritorno superiori, in virtù degli assetti stratigrafici ed idrogeologici ivi rilevati, possa permanere il rischio per liquefazione.

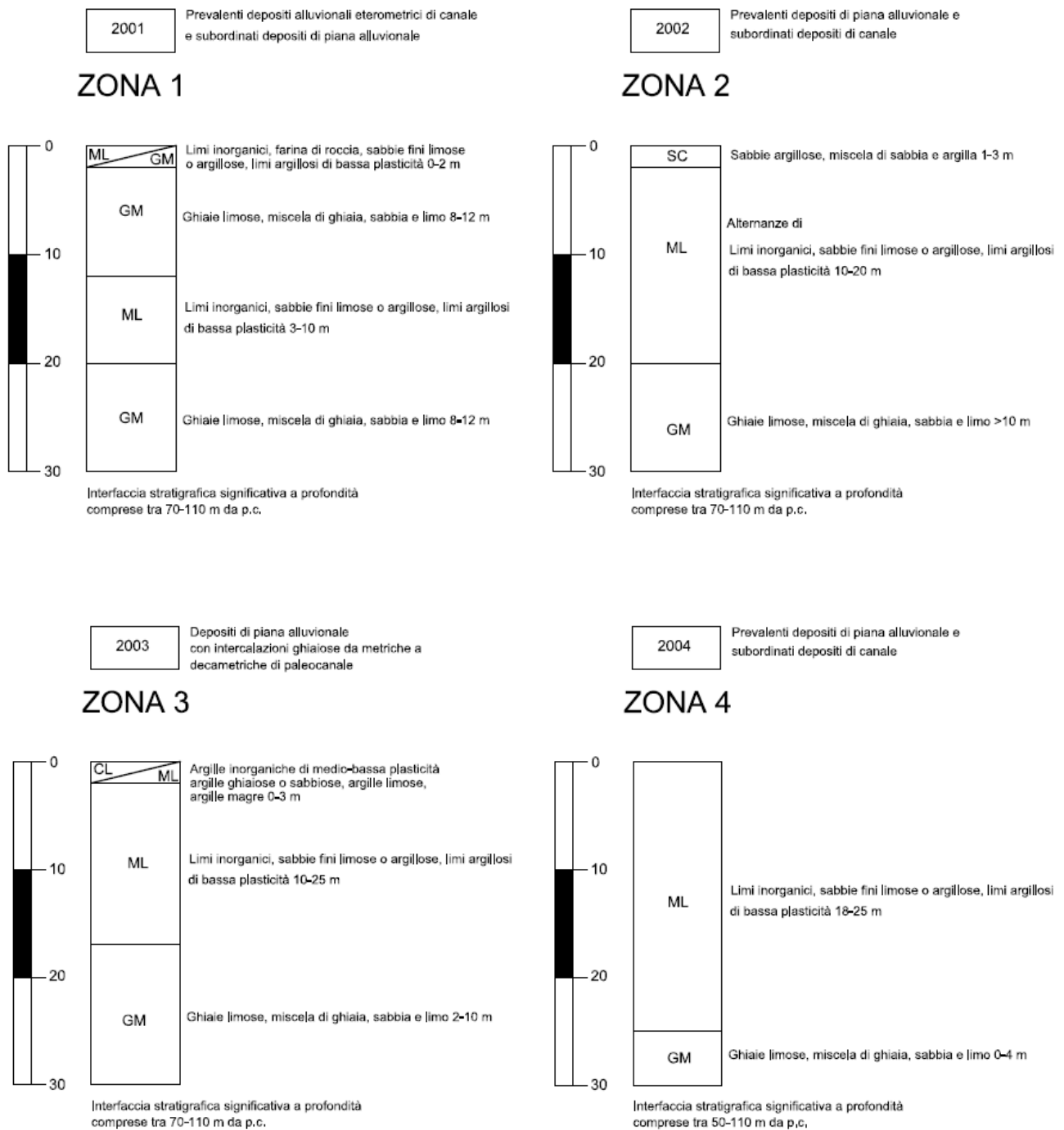
Inoltre, poiché si ha notizia di cavità antropiche, generalmente di bassa-media profondità, realizzate storicamente ed a livello puntuale nell'ambito dei terreni arenacei della località Covignano, in via cautelativa, su tutta l'area di potenziale interesse è stata segnalata la presenza di cavità sepolte; data la scarsità di informazioni disponibili e la natura puntuale degli interventi antropici, non si hanno sufficienti elementi conoscitivi per un'appropriata valutazione tecnica e stima dell'effettiva pericolosità puntuale.

Per i dettagli delle singole zonazioni si rimanda pertanto alla tavola delle MOPS.

*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Rimini (RN)*  
**Relazione Tecnico Illustrativa**

Nell'area di studio, con particolare riferimento alle zone urbanizzate ed urbanizzabili, non sono presenti elementi strutturali (faglie, ecc..) certi, in quanto dalla consultazione del database ITHACA non è stato rilevato alcun elemento tettonico attivo e capace, certo e documentato, che possa determinare effetti superficiali nelle aree urbanizzate in oggetto.

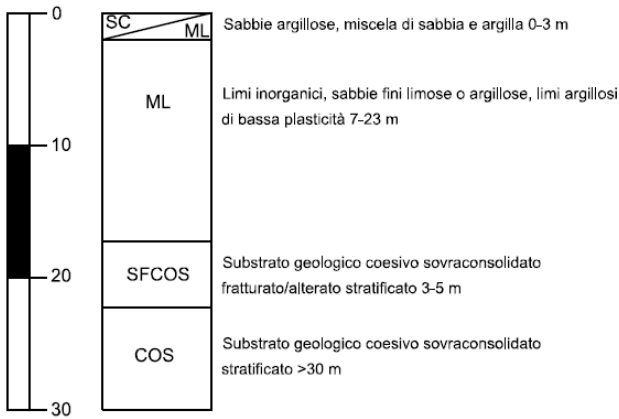
Di seguito si riporta una descrizione delle microzone omogenee in prospettiva sismica, definite per le aree in esame, con gli schemi dei rapporti litostratigrafici più significativi (ogni colonnina riporta le litologie prevalenti con una breve descrizione ed è associata ad una microzona in pianta):



*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Rimini (RN)*  
**Relazione Tecnico Illustrativa**

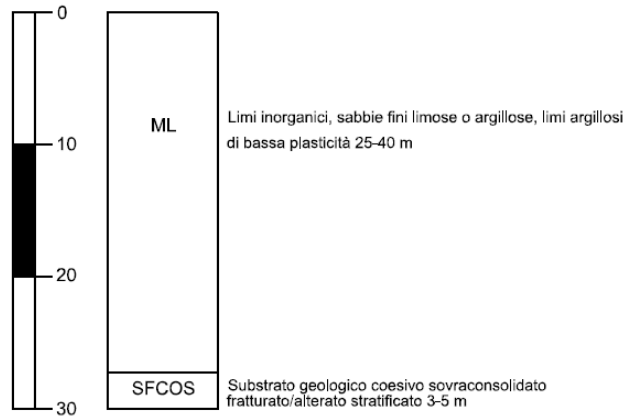
**2005** Depositi di piana alluvionale limoso-argillosi su substrato geologico formazionale

**ZONA 5**



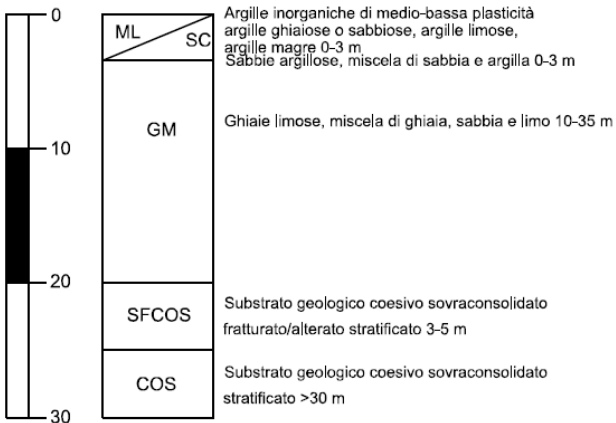
**2006** Depositi di piana alluvionale limoso-argillosi di significativo spessore su substrato geologico formazionale

**ZONA 6**



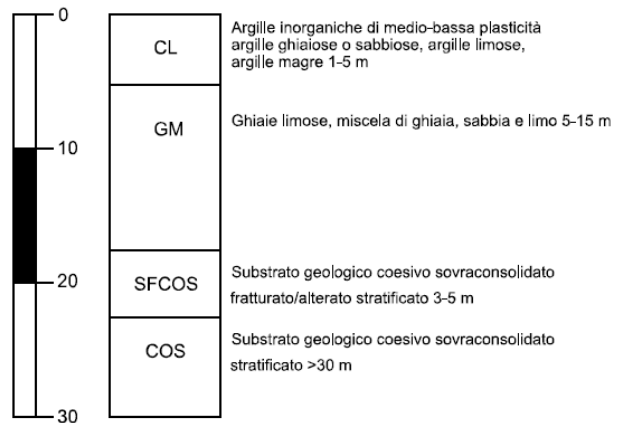
**2007** Depositi di piana alluvionale prevalentemente grossolani su substrato geologico formazionale

**ZONA 7**



**2008** Depositi alluvionali terrazzati su substrato geologico formazionale

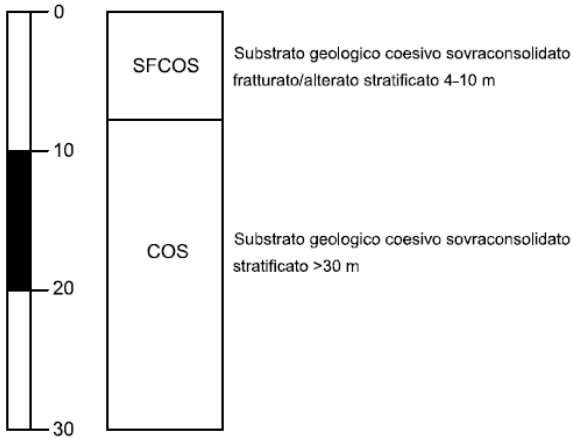
**ZONA 8**



*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Rimini (RN)*  
**Relazione Tecnico Illustrativa**

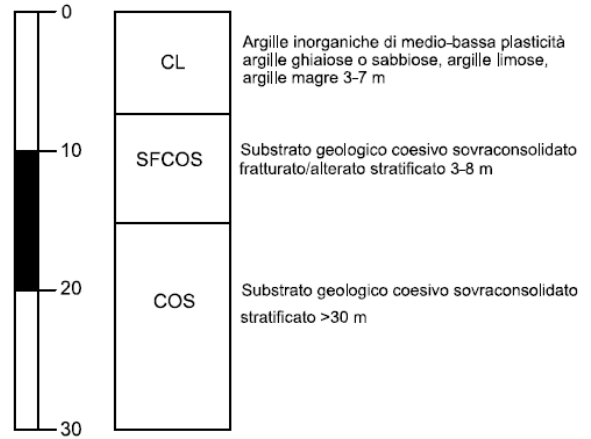
**2009** Formazione alterata su substrato geologico stratificato

**ZONA 9**



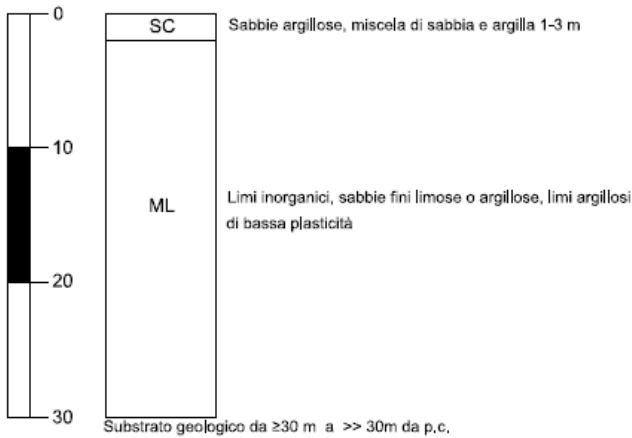
**2010** Depositi di copertura di versante/terrazzo alto su substrato geologico stratificato

**ZONA 10**



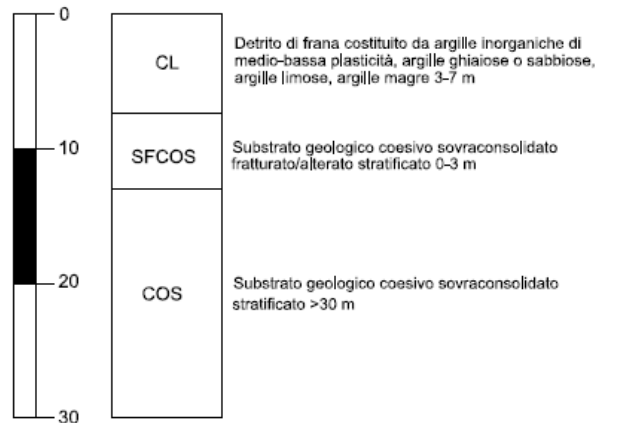
**2011** Depositi di piana alluvionale e di canale a tessitura medio-fine

**ZONA 11**



**2012** Depositi di frana attiva su substrato geologico stratificato

**ZONA 12**

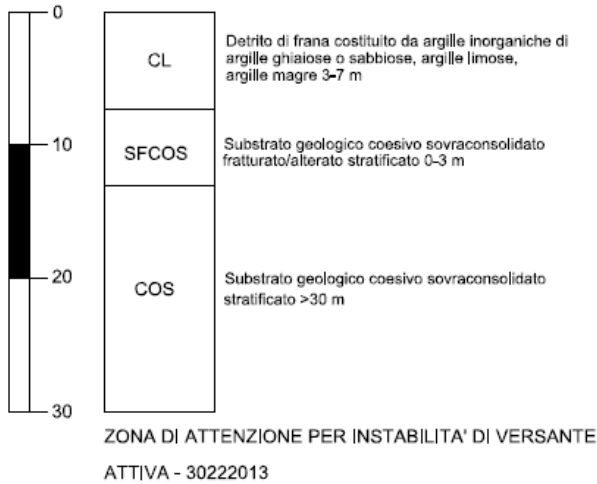


**ZONA DI ATTENZIONE PER INSTABILITA' DI VERSANTE ATTIVA - 30122012**

*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Rimini (RN)*  
**Relazione Tecnico Illustrativa**

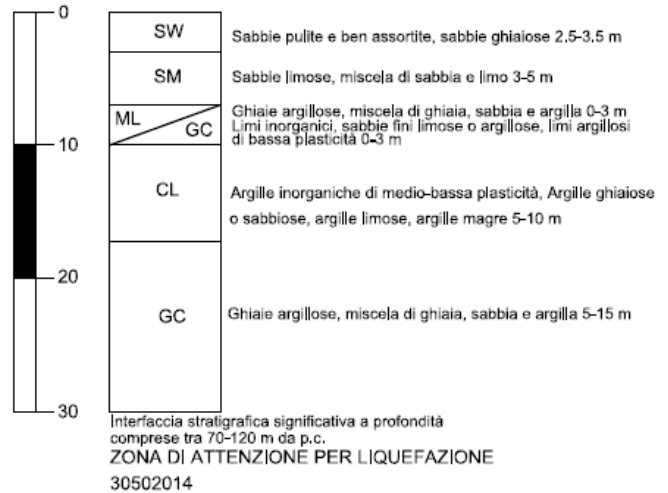
**2013** Depositi di frana quiescente su substrato geologico stratificato

**ZONA 13**



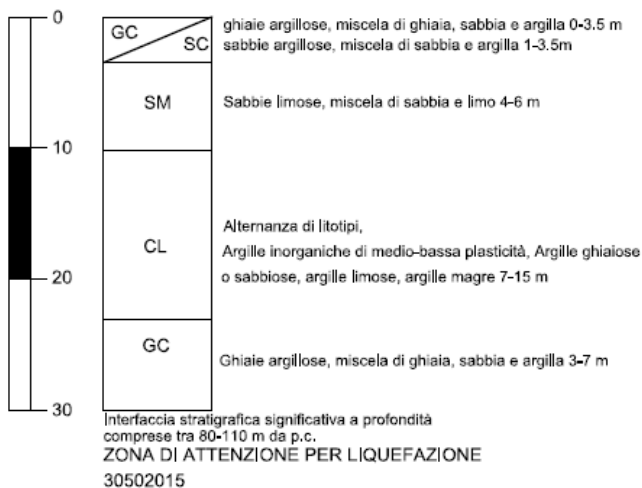
**2014** Depositi di piana costiera al tetto di depositi di piana alluvionale di elevato spessore, prevalentemente limoso-argillosi con intercalazioni ghiaiose

**ZONA 14**



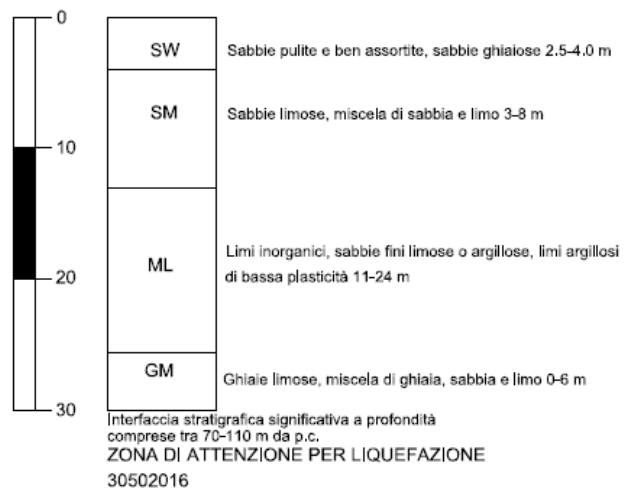
**2015** Depositi di piana costiera localmente intedigati a depositi di fronte deltizia e piana alluvionale al tetto di depositi di piana alluvionale di elevato spessore con intercalazioni ghiaiose

**ZONA 15**



**2016** Depositi di piana costiera al tetto di depositi di piana alluvionale di elevato spessore, prevalentemente limoso-argillosi con intercalazioni ghiaiose

**ZONA 16**



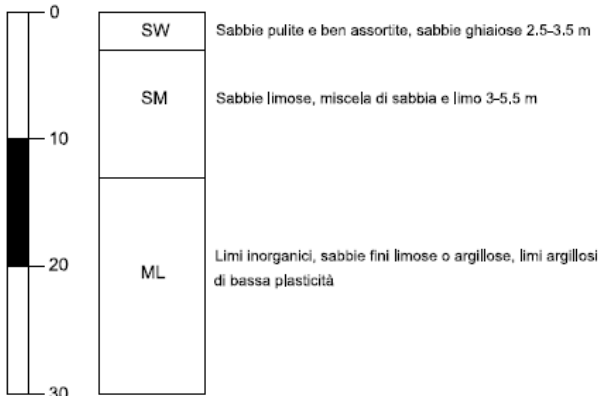


*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Rimini (RN)*  
**Relazione Tecnico Illustrativa**

2017

Depositi di piana costiera al tetto di depositi di piana alluvionale di elevato spessore, prevalentemente limoso-argillosi

**ZONA 17**

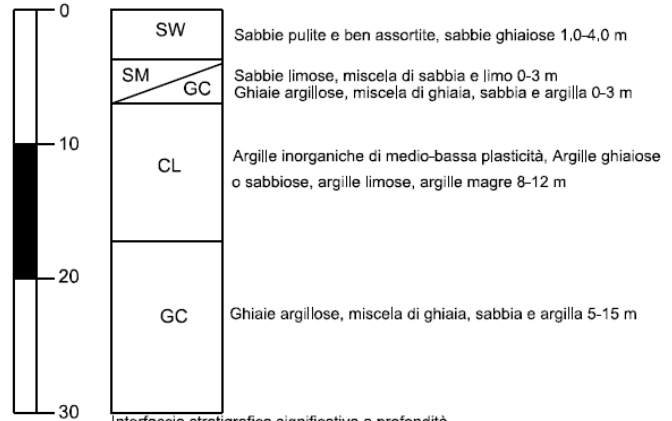


Interfaccia stratigrafica significativa a profondità comprese tra 70-110 m da p.c.  
**ZONA DI ATTENZIONE PER LIQUEFAZIONE**  
 30502017

2018

Depositi di piana costiera al tetto di depositi di piana alluvionale di elevato spessore, prevalentemente limoso-argillosi con intercalazioni ghiaiose

**ZONA 18**

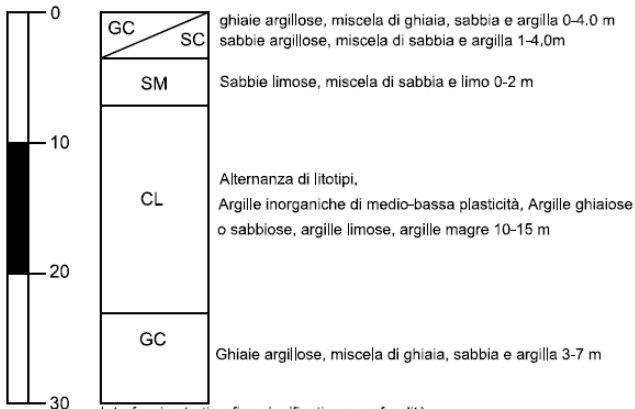


Interfaccia stratigrafica significativa a profondità comprese tra 70-120 m da p.c.

2019

Depositi di piana costiera localmente intedigati a depositi di fronte deltizia e piana alluvionale al tetto di depositi di piana alluvionale di elevato spessore con intercalazioni ghiaiose

**ZONA 19**

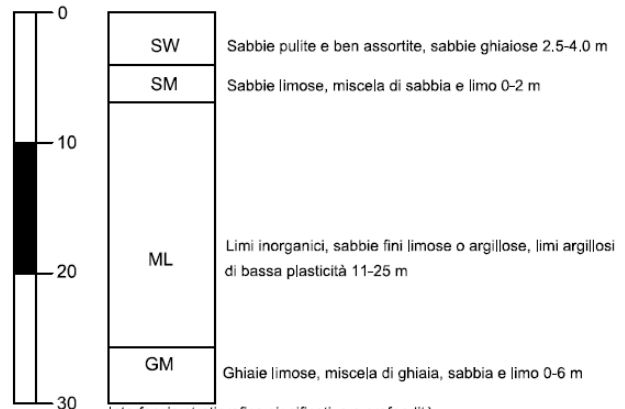


Interfaccia stratigrafica significativa a profondità comprese tra 80-110 m da p.c.

2020

Depositi di piana costiera al tetto di depositi di piana alluvionale di elevato spessore, prevalentemente limoso-argillosi con intercalazioni ghiaiose

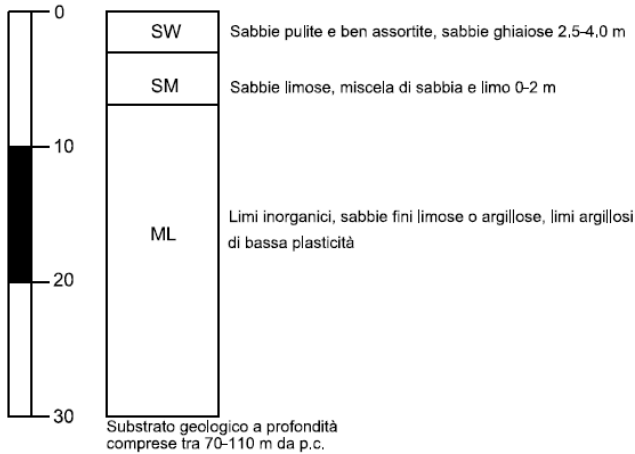
**ZONA 20**



Interfaccia stratigrafica significativa a profondità comprese tra 70-110 m da p.c.

2021 Depositi di piana costiera al tetto di depositi di piana alluvionale di elevato spessore, prevalentemente limoso-argillosi

## ZONA 21



Per tutte le zone illustrate sono attese amplificazioni del moto sismico per motivi stratigrafici e talora topografici.

A tal proposito nella carta delle MOPS vengono altresì riportate le tracce di sezione topografica utili a verificare localmente la presenza ed entità di eventuali fenomeni di amplificazione topografica. Tali fenomeni, ove ipotizzabili, sono stati successivamente quantificati tramite gli approcci semplificati indicati nelle ICMS 2008 per scarpate e versanti con conformazione a cresta (paragrafo 3.3, pag. 158-160, Volume 3).

## 9.2. MICROZONAZIONE SISMICA AL II-III LIVELLO DI ANALISI

### 9.2.1 Carta delle velocità delle onde di taglio “Vs”

Per la costruzione ed aggiornamento (durante gli approfondimenti di III Livello) della carta delle velocità delle onde di taglio sono state utilizzate le indagini di misura diretta maggiormente rappresentative che hanno consentito di raggiungere profondità generalmente  $\geq 30$  m, avvalendosi a titolo correlativo di tutte le altre prove a minor penetrazione.

I test di misura geofisica diretta utilizzati risultano suddivisi come segue:

- 58 prove Puntuali (DH, CH, SCPT, SDMT, Array 2D ed HVSR dove assenti misure dirette);
- 12 Lineari (Masw, ReMi.);

In Figura 9.2.1 è possibile osservare la distribuzione sul territorio delle differenti indagini sismiche: ogni rilievo è stato codificato come riportato negli standard di archiviazione e rappresentazione informatica 4.1 riferiti a “Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica”.

In base alle caratteristiche dei depositi di copertura ed alla profondità del substrato geologico di misura, per ciascun sito si è valutato il valore rappresentativo di Vs30 o all’occorrenza VsH (H=spessore delle coperture) in corrispondenza dei terreni collinari con coperture su substrato non rigido, caratterizzato da Vs  $\ll$  800 m/s.

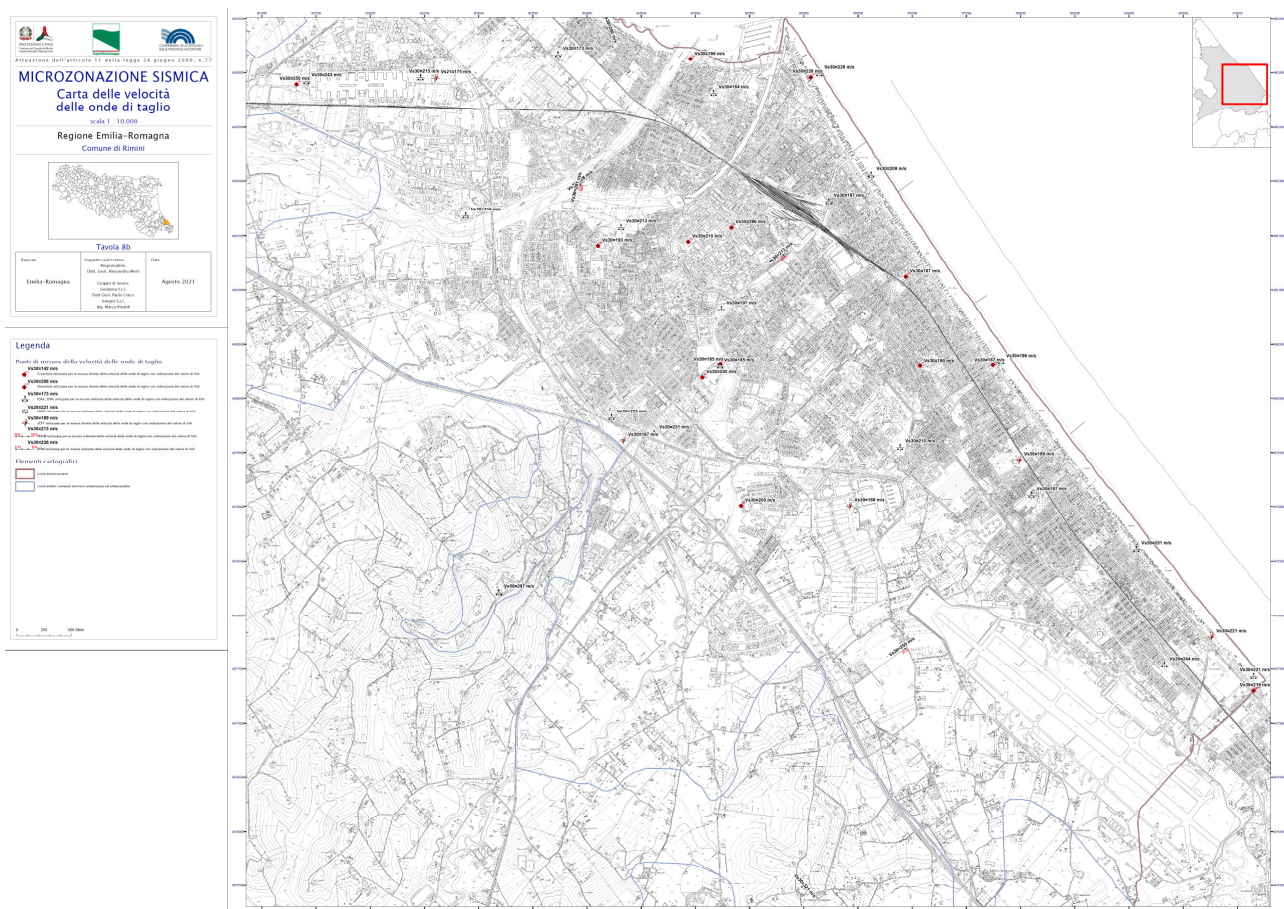


Figura 9.2.1 – Miniatura esemplificativa di una carta delle velocità delle onde di taglio VsH.

### 9.2.2 Carte dei Fattori di Amplificazione Stratigrafica

I terreni in studio di Rimini, data la conformazione ed estensione del territorio comunale, presentano caratteristiche litologiche a tratti differenti (vedi Cap. 4), talora con sensibili variazioni nelle caratteristiche fisico-meccaniche delle coperture e dei substrati geologici superficiali alterati.

A tal proposito, ai fini dell'analisi semplificata di II Livello, il territorio in studio è stato discretizzato schematizzando situazioni geologiche omogenee al fine di poter stimare in maniera consona i fattori di amplificazione sismica tramite metodo semplificato tabellare proposto nella DGR 630/2019 come aggiornata dalla DGR 476/2021 e successiva integrazione DGR 564/2021. Quindi sulla base della descrizione del contesto geologico di applicazione di ciascuna tabella e delle profondità attese per il substrato, si sono utilizzati i parametri di amplificazione definiti nelle tabelle denominate: Appennino (coperture su substrato non rigido), Margine A, Margine B, Pianura 1 e Pianura 2. In figura 9.2.2 viene illustrato lo schema di applicazione delle tabelle succitate per i diversi ambiti geologici.

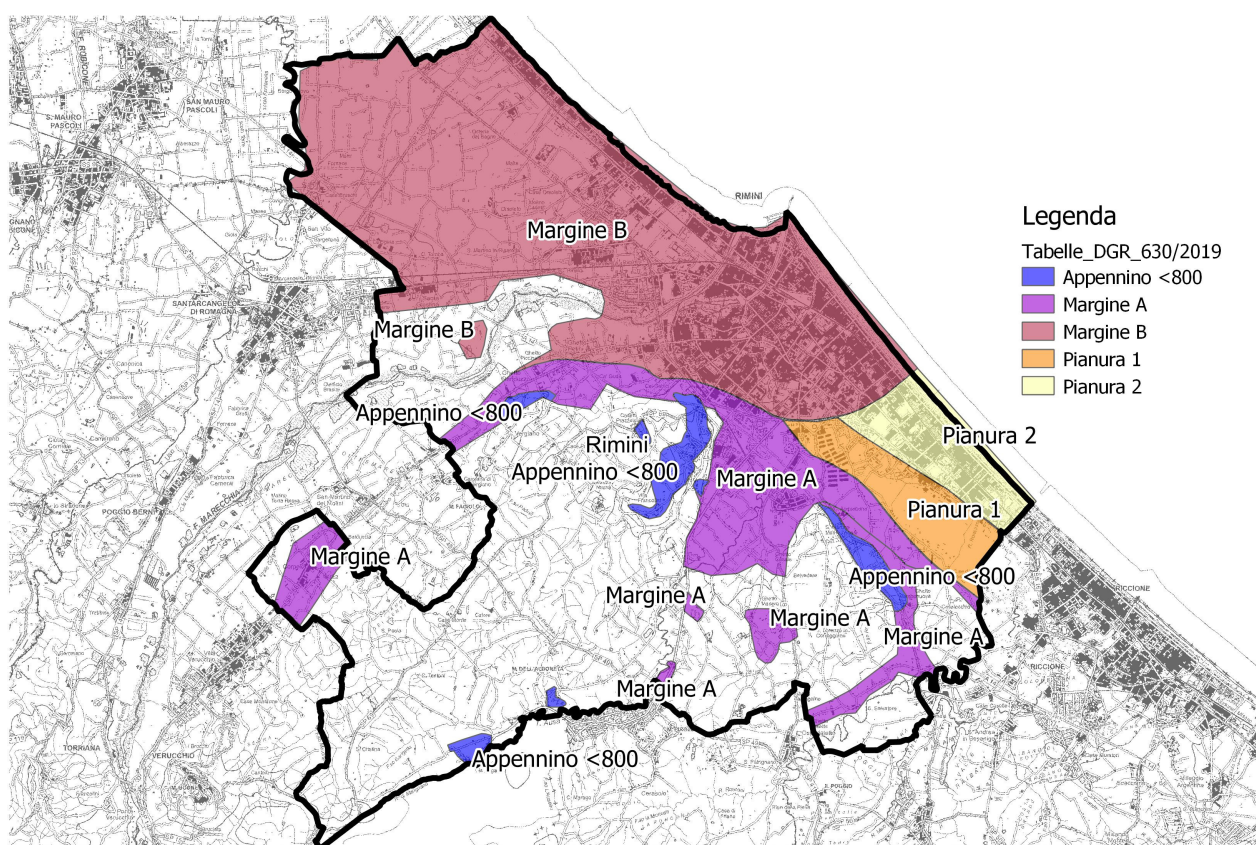


Figura 9.2.2 – Schema di applicazione delle tabelle di approccio semplificato per la stima dei fattori di amplificazione sismica nei diversi ambiti geologici del territorio comunale.

In ambito collinare, per cogliere in modo maggiormente significativo a livello locale la variazione dei fattori di amplificazione (FA) in funzione degli effetti stratigrafici, l'assegnazione di tali coefficienti è stata definita attraverso la stima puntuale del parametro di velocità equivalente  $V_{sH}$ , secondo la seguente formulazione:

$$V_{sH} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N h_i/V_{si}}$$
dove N è il numero di strati del profilo sismico corrispondenti alla copertura, H è lo spessore totale (in m) dei terreni di copertura o profondità del tetto del substrato,  $h_i$  = spessore (in m) dello strato i-esimo (fino al substrato),  $V_{si}$  = velocità (in m/s) dello strato i-esimo (fino al substrato).

In particolare, date le caratteristiche di rigidità sismica delle formazioni geologiche locali, per la stima di H si è assunta la profondità del tetto del substrato “non rigido”, ovvero il substrato geologico inalterato contraddistinto da una  $V_s \ll 800$  m/s.

Un cenno particolare merita anche la modalità di applicazione dei parametri relativi alla Tabella “Margine A” in quanto, nei contesti pedecollinari, data la modesta variabilità dello spessore dei depositi di copertura su materiali di base più rigidi (generalmente compreso tra 25 e 40 m), si è optato di adottare il parametro  $V_{s30}$  (valore di profondità massima), al fine di ottenere una lettura omogenea e calibrata sullo specifico contesto geologico/territoriale.

Per tutte le altre tabelle (Margine B, Pianura 1 e Pianura 2) ci si è avvalsi del valore di  $V_{s30}$  per la stima dei fattori di amplificazione sismica di ciascuna relativa microzona.

Tali scelte sono state guidate anche sulla scorta delle considerazioni ed esperienze illustrate nello studio “Revisione della suddivisione del territorio regionale in ambiti geo-litologici omogenei (A. Tento, L. Martelli, A. Marcellini, 2015)”, alla base della definizione delle nuove tabelle di approccio semplificato per MS2.

Gli ambiti vengono quindi caratterizzati dai seguenti Fattori di amplificazione per effetto stratigrafico che intervengono sulle ampiezze spettrali (in accelerazione e velocità):

$F_{PGA} = PGA/PGA0$ , dove  $PGA0$  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;

$FA = SA/SA0$ , dove  $SA0$  è l'integrale dello spettro di risposta in accelerazione al suolo di riferimento e  $SA$  è l'integrale dello spettro di risposta in accelerazione alla superficie del sito per prefissati intervalli di periodi T:  $SA1$  per  $0,1s \leq T \leq 0,5s$ ,  $SA2$  per  $0,4s \leq T \leq 0,8s$ ,  $SA3$  per  $0,7s \leq T \leq 1,1s$ ,  $SA4$  per  $0,5s \leq T \leq 1,5s$ ;

$FH = SI/SI0$ , dove  $SI0$  è l'integrale dello spettro di risposta in velocità (Intensità di Housner) al suolo di riferimento e  $SI$  l'integrale dello spettro di risposta in velocità (o corrispondente grandezza di Intensità di Housner) alla superficie del sito per prefissati intervalli di periodi T:  $SI1$  per  $0,1s \leq T \leq 0,5s$ ,  $SI2$  per  $0,5s \leq T \leq 1,0s$ ,  $SI3$  per  $0,5s \leq T \leq 1,5s$ .

*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Rimini (RN)*  
**Relazione Tecnico Illustrativa**

A tal proposito si evidenzia come per gli ambiti caratterizzati dalle Tabelle Appennino e Margine A, in virtù degli spessori delle copertura e della tipologia di risposta sismica caratteristica, non vengano definiti i fattori di amplificazione SA4 ed SI3, venendo pertanto stralciati dalle relative carte di MS2.

In dettaglio, le 8 carte di Microzonazione di II Livello (Fa-PGA - Fa\_SA1 - Fa\_SA2 - Fa\_SA3 - Fa\_SA4 - Fa\_SII - Fa\_SI2 - Fa\_SI3) sono state costruite come segue:

- A ciascuna Microzona individuata nella carta delle MOPS è stato assegnato, in base ai rilievi disponibili riportati nella mappa delle velocità, un unico valore rappresentativo di Vs. Tale valore è stato assegnato in termini di Vs30 o VsH (in funzione del contesto geologico e profondità del bedrock geofisico o contrasti di impedenza significativi); al proposito si rileva come rigidzze proprie di substrati con Vs $\geq$ 800 m/s si possano riscontrare solo a profondità elevate.
- In base a ciascun valore Vs assegnato alle varie zone (Vs30 o VsH) è stato successivamente possibile identificare e/o accoppiare Microzone con caratteristiche dinamiche simili, suddividendo il territorio in zone a caratteristiche amplificative omogenee.
- In base agli abachi proposti nella DGR 630/2019 come aggiornata dalla *DGR 476/2021 e successiva integrazione DGR 564/2021* (riportati in Figura 9.2.3) denominati rispettivamente A 2.1.1 “APPENNINO” (per substrato non rigido con Vs  $\ll$  800 m/s) - A 2.1.2: “PIANURA 1”, “PIANURA 2” - “MARGINE di Tipo A” e “MARGINE di Tipo B”, sono stati quindi assegnati i Fattori di Amplificazione corrispondenti alla classe di Vs30 o VsH precedentemente determinata.

VsH (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700	VsH (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700	VsH (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
5	2.3	2.0	1.6	1.5	1.4	1.3	1.3	1.2	1.2		5	1.6	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.3		5	2.1	1.7	1.5	1.4	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	
10	2.3	2.2	2.0	1.8	1.6	1.4	1.3	1.3	1.2		10	2.3	1.8	1.5	1.4	1.4	1.4	1.4	1.3	1.3		10	2.6	2.3	1.9	1.6	1.5	1.4	1.3	1.3	1.3	
15	2.2	2.2	2.1	2.0	1.8	1.6	1.4	1.3	1.2		15	2.8	2.3	1.9	1.5	1.4	1.4	1.4	1.4	1.3		15	2.7	2.6	2.3	1.9	1.6	1.5	1.4	1.3	1.3	
20	2.1	2.1	2.1	2.0	1.9	1.7	1.5	1.4	1.2		20	3.2	2.9	2.3	1.8	1.5	1.5	1.4	1.4	1.3		20	2.6	2.6	2.4	2.1	1.8	1.6	1.5	1.4	1.3	
25	2.1	2.1	2.1	2.0	1.9	1.8	1.6	1.4	1.3		25	3.4	3.2	2.7	2.0	1.7	1.5	1.5	1.4	1.3		25	2.6	2.6	2.5	2.3	2.0	1.7	1.6	1.4	1.3	
30	2.1	2.1	2.0	1.9	1.8	1.6	1.4	1.3			30	3.3	2.9	2.3	1.9	1.6	1.5	1.4	1.4			30	2.4	2.4	2.3	2.1	1.8	1.6	1.5	1.3		
35	2.1	2.1	2.0	1.9	1.8	1.6	1.5	1.4	1.2		35	3.3	3.0	2.5	2.1	1.8	1.6	1.5	1.4	1.2		35	2.4	2.4	2.3	2.2	1.9	1.7	1.5	1.4	1.2	
40	2.0	2.0	2.0	1.9	1.8	1.6	1.5	1.4	1.2		40	3.2	3.1	2.7	2.3	2.0	1.7	1.5	1.4	1.2		40	2.2	2.2	2.2	2.2	2.0	1.8	1.6	1.4	1.2	
50	1.9	1.9	1.9	1.9	1.8	1.6	1.5	1.4	1.2		50	3.0	3.0	2.8	2.5	2.2	1.9	1.7	1.5	1.3		50	2.1	2.1	2.1	2.1	2.0	1.8	1.6	1.5	1.3	
<b>Fattore di Amplificazione PGA</b>											<b>Fattore di Amplificazione SA2 (0,4s<math>\leq</math>T<math>\leq</math>0,8s)</b>											<b>Fattore di Amplificazione SII (0,1s<math>\leq</math>T<math>\leq</math>0,5s)</b>										
VsH (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700	VsH (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700	VsH (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700
5	2.2	1.8	1.5	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.2		5	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3		5	1.4	1.4	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	
10	2.5	2.3	1.9	1.7	1.5	1.4	1.3	1.3	1.2		10	1.6	1.5	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3		10	1.8	1.6	1.4	1.4	1.3	1.4	1.3	1.3	1.3	
15	2.5	2.5	2.2	1.9	1.7	1.5	1.4	1.3	1.2		15	1.9	1.7	1.5	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3		15	2.3	1.9	1.6	1.4	1.4	1.4	1.3	1.3	1.3	
20	2.4	2.4	2.3	2.1	1.8	1.6	1.5	1.3	1.3		20	2.4	2.1	1.6	1.4	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3		20	2.9	2.6	1.9	1.6	1.4	1.4	1.4	1.3	1.3	
25	2.4	2.4	2.3	2.2	2.0	1.7	1.6	1.4	1.3		25	3.4	2.5	1.9	1.5	1.4	1.4	1.3	1.3	1.3		25	3.6	3.0	2.3	1.7	1.5	1.4	1.4	1.4	1.3	
30	2.3	2.3	2.2	2.0	1.8	1.6	1.5	1.3			30	3.0	2.3	1.7	1.5	1.4	1.4	1.3	1.3			30	3.3	2.7	1.9	1.7	1.5	1.4	1.4	1.3		
35	2.2	2.2	2.2	2.1	1.9	1.7	1.5	1.4	1.2		35	3.3	2.7	1.9	1.6	1.5	1.4	1.3	1.3	1.1		35	3.5	3.0	2.2	1.8	1.6	1.5	1.4	1.3	1.1	
40	2.1	2.1	2.1	2.1	1.9	1.7	1.5	1.4	1.2		40	3.6	3.1	2.2	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2		40	3.5	3.2	2.6	2.0	1.8	1.6	1.5	1.4	1.2	
50	2.0	2.0	2.0	2.0	1.9	1.7	1.5	1.4	1.2		50	3.6	3.4	2.9	2.1	1.8	1.6	1.5	1.4	1.2		50	3.3	3.3	3.0	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5	1.3	
<b>Fattore di Amplificazione SA1 (0,1s<math>\leq</math>T<math>\leq</math>0,5s)</b>											<b>Fattore di Amplificazione SA3 (0,7s<math>\leq</math>T<math>\leq</math>1,1s)</b>											<b>Fattore di Amplificazione SI2 (0,5s<math>\leq</math>T<math>\leq</math>1,0s)</b>										

a)

**Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Rimini (RN)**  
**Relazione Tecnico Illustrativa**

V <sub>S30</sub> (m/s) →	150	200	250	300	350	400
PGA	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,5

Fattore di Amplificazione **PGA**

V <sub>S30</sub> (m/s) →	150	200	250	300	350	400
SA1	1,8	1,8	1,8	1,7	1,6	1,5
SA2	2,6	2,5	2,4	2,2	2,0	1,9
SA3	3,2	3,2	3,0	2,7	2,5	2,2
SA4	3,1	3,0	2,7	2,4	2,2	2,0

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)

V <sub>S30</sub> (m/s) →	150	200	250	300	350	400
PGA	1,7	1,7	1,7	1,6	1,5	1,5

Fattore di Amplificazione **PGA**

V <sub>S30</sub> (m/s) →	150	200	250	300	350	400
SA1	1,8	1,8	1,8	1,7	1,6	1,5
SA2	2,7	2,7	2,4	2,1	1,9	1,8
SA3	3,3	3,2	2,8	2,5	2,3	2,1
SA4	3,3	3,1	2,7	2,4	2,1	1,9

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)

V <sub>S30</sub> (m/s) →	150	200	250	300	350	400
SI1	1,9	1,9	1,9	1,8	1,6	1,5
SI2	3,0	2,9	2,7	2,5	2,3	2,1
SI3	3,4	3,2	2,8	2,5	2,2	2,0

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

V <sub>S30</sub> (m/s) →	150	200	250	300	350	400
SI1	2,0	2,0	1,9	1,8	1,7	1,6
SI2	3,1	3,0	2,7	2,4	2,1	2,0
SI3	3,6	3,3	2,9	2,5	2,2	2,0

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

V <sub>SH</sub> (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400
5	2,3	2,1	1,8	1,5		
10	2,3	2,2	2,0	1,8		
15	2,1	2,1	2,0	1,8		
20	2,1	2,1	2,0	1,9		
25	2,0	2,0	2,0	1,9		
30	1,9	1,9	1,9	1,9		

Fattore di Amplificazione **PGA**

V <sub>SH</sub> (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400
5	1,9	1,7	1,7	1,6		
10	2,7	2,2	1,9	1,8		
15	3,3	2,9	2,3	2,0		
20	3,4	3,1	2,6	2,2		
25	3,3	3,2	2,8	2,4		
30	3,1	3,1	2,8	2,5		

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

V <sub>SH</sub> (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400
5	2,2	1,9	1,7	1,6		
10	2,6	2,4	2,0	1,8		
15	2,6	2,5	2,2	1,9		
20	2,5	2,5	2,3	2,0		
25	2,3	2,3	2,2	2,1		
30	2,1	2,1	2,1	2,0		

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

V <sub>SH</sub> (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400
5	2,3	2,0	1,7	1,5		
10	2,5	2,3	2,0	1,8		
15	2,4	2,4	2,1	1,9		
20	2,3	2,3	2,1	2,0		
25	2,2	2,2	2,1	2,0		
30	2,0	2,0	2,0	1,9		

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

V <sub>SH</sub> (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400
5	1,6	1,6	1,6	1,6		
10	2,0	1,8	1,7	1,7		
15	2,9	2,3	2,0	1,9		
20	3,4	2,8	2,3	2,0		
25	3,9	3,4	2,7	2,3		
30	3,8	3,6	3,0	2,5		

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

V <sub>SH</sub> (m/s) → H (m) ↓	150	200	250	300	350	400
5	1,8	1,7	1,6	1,6		
10	2,3	2,0	1,8	1,7		
15	3,2	2,6	2,1	2,0		
20	3,5	3,1	2,5	2,1		
25	3,7	3,4	2,8	2,4		
30	3,6	3,5	3,0	2,6		

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

V <sub>S30</sub> (m/s) →	150	200	250	300	350	400
PGA	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5

Fattore di Amplificazione **PGA**

V <sub>S30</sub> (m/s) →	150	200	250	300	350	400
SA1	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,5
SA2	2,6	2,6	2,3	2,1	1,9	1,7
SA3	3,1	2,9	2,7	2,4	2,3	2,1
SA4	3,0	2,9	2,6	2,3	2,1	1,9

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

V <sub>S30</sub> (m/s) →	150	200	250	300	350	400
SI1	1,9	1,9	1,9	1,8	1,7	1,6
SI2	2,9	2,8	2,5	2,3	2,1	2,0
SI3	3,3	3,1	2,7	2,4	2,2	2,0

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

**Figura 9.2.3 - Abachi definiti dalla Regione Emilia Romagna per il calcolo dei Fattori di Amplificazione al II livello di analisi di Microzonazione Sismica: “Appennino” per substrato non rigido con VS<<800 m/s (a), Pianura 1 (b), Pianura 2 (c), Margine di tipo A (d), Margine di tipo B (e).**

Quindi gli elaborati finali sono stati realizzati accoppiando aree con valori di FA simili, come riportato negli standard di rappresentazione e archiviazione informatica 4.1 in allegato alle linee guida per la Microzonazione Sismica. In Figura 9.2.4 vengono mostrate le classi di colore assegnate per ciascun range di amplificazione ottenuto.








Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali (classe del parametro di amplificazione), <sup>14</sup>	
	1.1 - 1.2
	1.3 - 1.4
	1.5 - 1.6
	1.7 - 1.8
	1.9 - 2.0
	2.1 - 2.2
	2.3 - 2.4
	2.5 - 3.0
	3.1 - 3.5
	>3,5

Figura 9.2.4-Classi di colore riferite ai Fattori di Amplificazione (Standard di rappresentazione e archiviazione informatica. MS. Versione 4.1).

Per ciascuna microzona, tramite specifiche etichette sovrimposte a livello grafico, è stato altresì riportato il relativo valore numerico del Fa ottenuto sia per le zone stabili che di attenzione per instabilità, nonostante possano essere caratterizzate da complessi fenomeni di amplificazione sismica e, spesso, da forti deformazioni e condizioni di comportamento non lineare, per cui è opportuno svolgere approfondite verifiche tramite specifici approfondimenti di III Livello.

In linea generale nelle aree di piana alluvionale e costiera, data la profondità del bedrock e la natura/rigidezza dei depositi superficiali, i fattori di amplificazione (sia in accelerazione che in velocità) tendono a risultare maggiormente correlati tra loro, sia nei range spettrali di media-alta frequenza (PGA, 0.1-0.5s, 0.5-1.0s, 0.7-1.1s) che a bassa frequenza (0.5-1.5s). Una differenza progressivamente maggiore si riscontra tra le zone costiere ed alluvionali presenti a Nord e a Sud del portocanale, in quest'ultimo caso prevalentemente per l'assenza di intercalazioni ghiaiose di significative dimensioni all'interno delle alluvioni normal consolidate e per il progressivo assottigliamento delle coperture alluvionali poggianti sul bedrock geologico in prossimità della zona Aeroporto e del confine comunale con Riccione (sebbene ancora con spessori dell'ordine del centinaio di metri in zona costiera). Diversamente procedendo verso le zone pedecollinari e collinari, in cui le coperture al di sopra del bedrock rigido vanno sensibilmente assottigliandosi, si evidenzia un maggior incremento degli effetti amplificativi nell'ambito delle alte e medie frequenze; al proposito in corrispondenza delle zone di Margine tipo A e Appennino, la direttiva regionale non prevede la stima (e conseguente mappatura) dei parametri di amplificazione nel range 0.5-1.5s (SA4 ed SI3).



Diversamente, a seguito degli approfondimenti di III Livello, in corrispondenza della fascia costiera soggetta a potenziale liquefazione, i relativi fattori di amplificazione sono stati calcolati tramite analisi di risposta sismica locale, sostituendoli a quelli preliminarmente stimati da approccio tabellare.

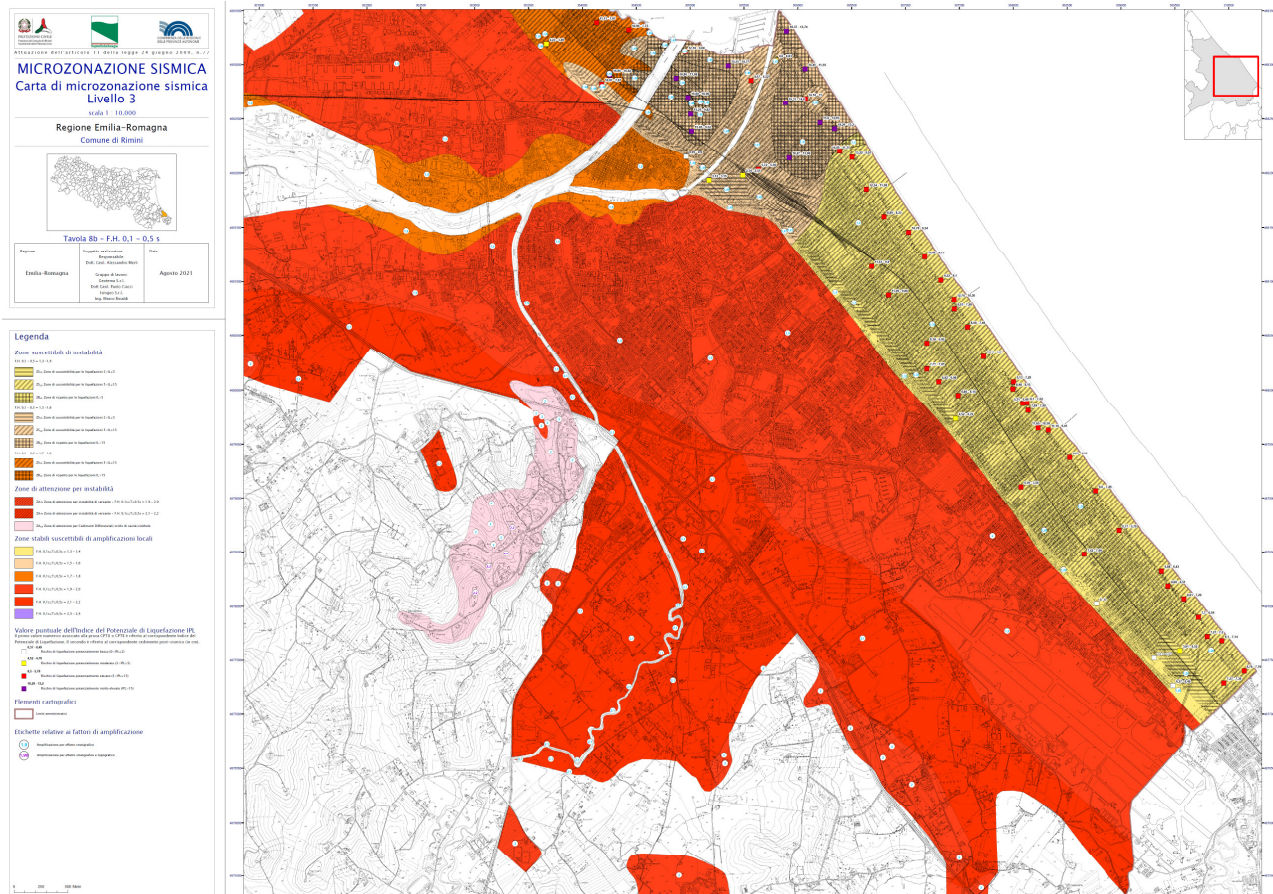


Figura 9.2.5 - Miniatura di una carta di MS23 per periodi dello spettro di risposta in velocità (Housner) tra 0.1-0.5 s (Fa\_S11).

### 9.2.3 Fattori di Amplificazione Topografica

Considerata la presenza di conformazioni morfologiche potenzialmente comportanti fenomeni di amplificazione di tipo topografico, una stima di tali fattori di amplificazione attesi è stata desunta dall'applicazione degli approcci semplificati indicati nelle ICMS 2008 per scarpate rocciose e versanti con conformazione a cresta (paragrafo 3.3, pag. 158-160, Volume 3).

Tale scelta è stata assunta a seguito di una verifica preliminare, confrontando i risultati anche con il metodo semplificato proposto al Par. A2.2 nella Del. G.R. 630/2019 R.E.R. Tuttavia poiché i risultati risultavano sostanzialmente confrontabili, in virtù della specifica conformazione morfologica dei rilievi locali e delle creste (frequentemente arrotondate) su cui sorgono i centri abitati principali si è optato per il metodo ICMS2008 in quanto ritenuto maggiormente rappresentativo per gli assetti locali.

Caso per caso, dall'analisi delle varie configurazioni morfologiche individuate lungo specifiche sezioni

topografiche rappresentative, si sono applicate le formulazioni semplificate per creste e scarpate rocciose di cui al par. 3.3.1 e 3.3.2 ICMS 2008 (vedi figura 9.2.6-9.2.7) e di cui, di seguito, si riportano anche i relativi abachi (tabella 9.2.1–9.2.2):

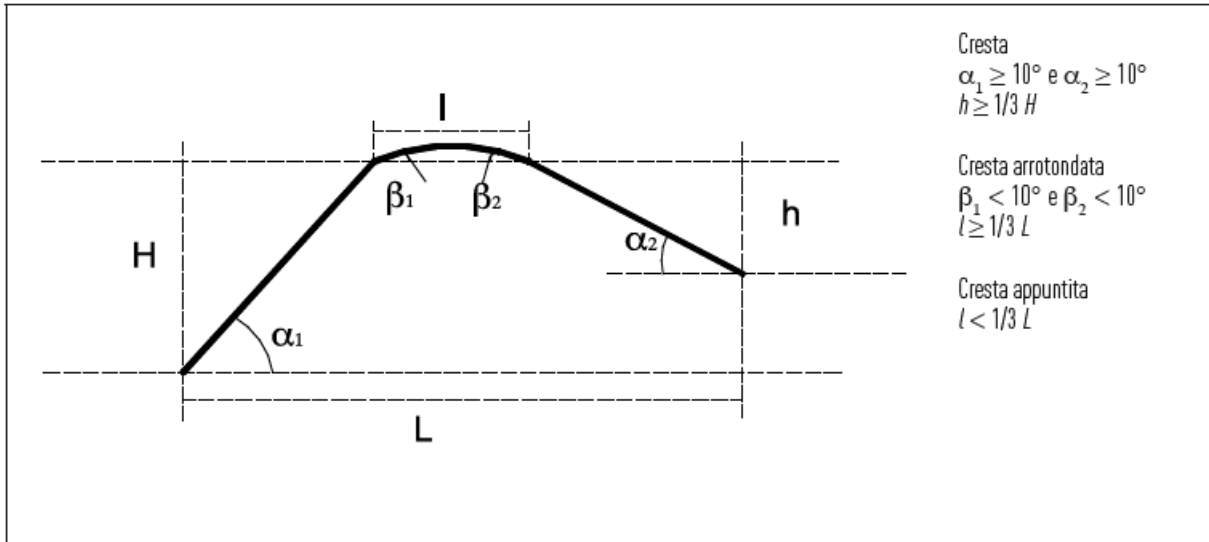


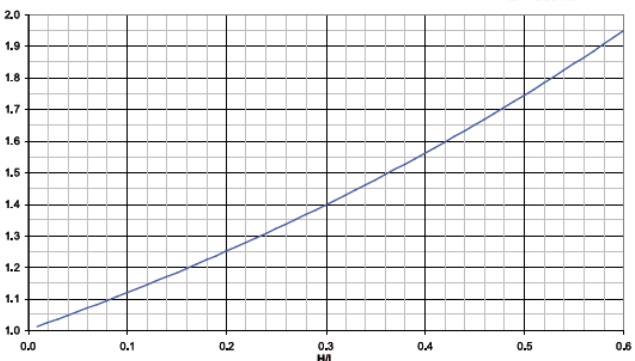
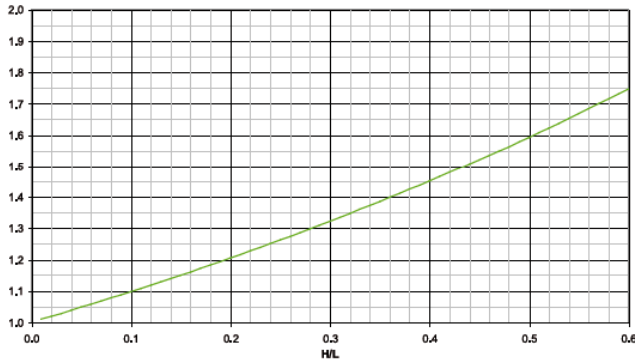
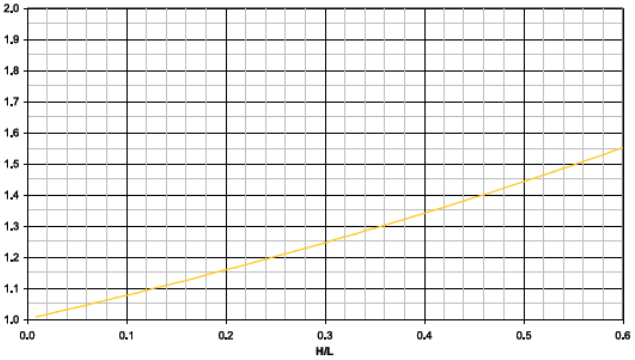
Figura 9.2.6 – Schema di riferimento per la cresta e criteri di riconoscimento (ICMS2008)

<p><math>H \geq 10 \text{ m}</math>  <math>\alpha \geq 10^\circ</math>  <math>L \approx H</math> oppure <math>L &gt; 15-20 \text{ m}</math></p>		
<p>Scarpata in contropendenza  <math>h &lt; 1/3 H</math></p>	<p>Scarpata ideale  <math>h = 0</math>  <math>\beta = 0</math></p>	<p>Scarpata in pendenza  <math>\beta \leq 1/5 \alpha</math></p>

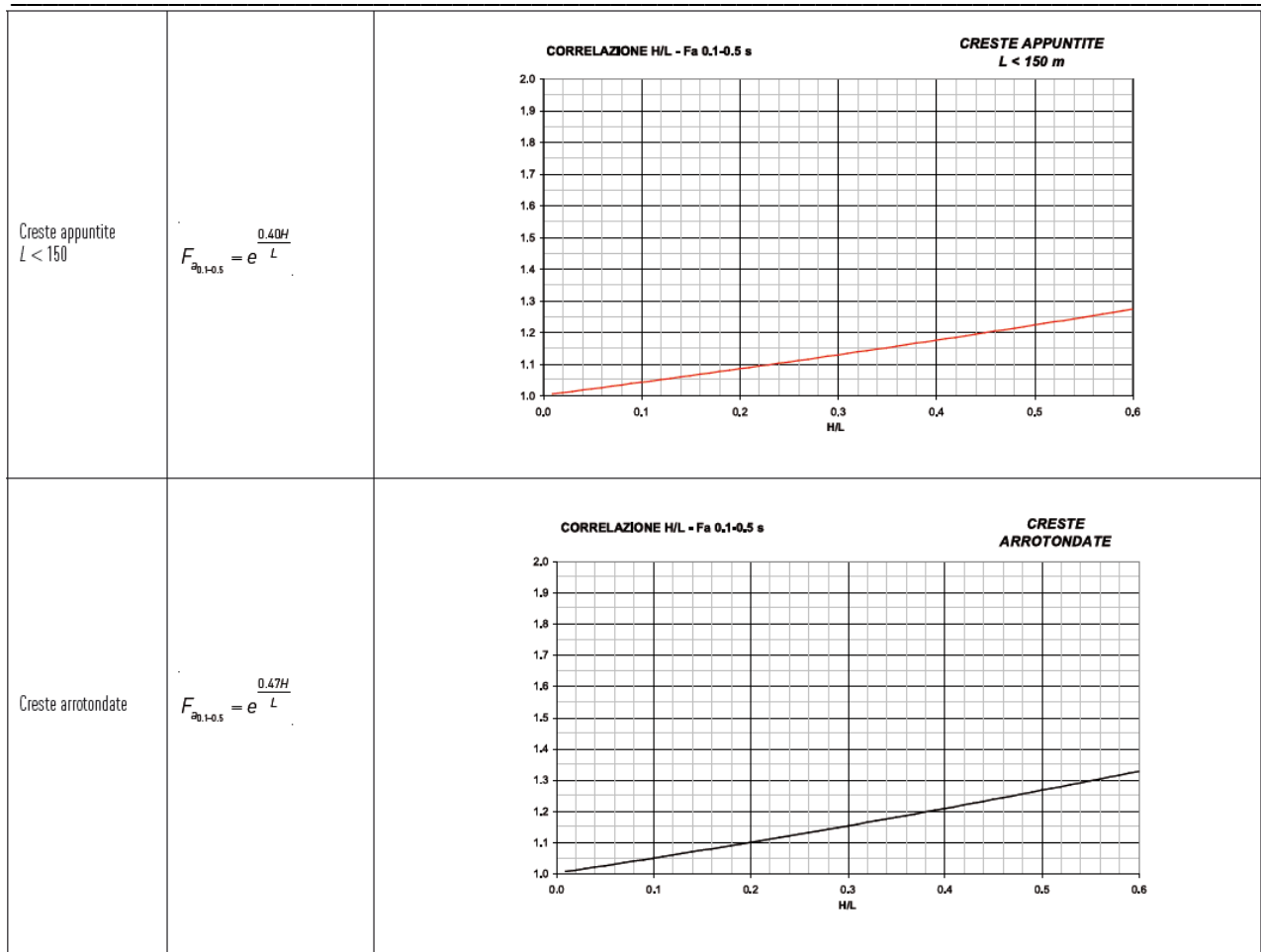
Figura 9.2.7 – Schemi di riferimento per la scarpata e criteri di riconoscimento (ICMS2008)

*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Rimini (RN)*  
**Relazione Tecnico Illustrativa**

*Tabella 9.2.1 – Abaco per creste rocciose (Tab. 3.3-1 - ICMS2008)*

<p>Creste appuntite <math>L &gt; 350</math></p>	$F_{a,0.1-0.5} = e^{\frac{1.1H}{L}}$	<p style="text-align: center;"><b>CORRELAZIONE H/L - Fa 0.1-0.5 s</b> <span style="float: right;"><b>CRESTE APPUNTITE</b> <math>L &gt; 350</math> m</span></p> 
<p>Creste appuntite <math>250 &lt; L &lt; 350</math></p>	$F_{a,0.1-0.5} = e^{\frac{0.93H}{L}}$	<p style="text-align: center;"><b>CORRELAZIONE H/L - Fa 0.1-0.5 s</b> <span style="float: right;"><b>CRESTE APPUNTITE</b> <math>250</math> m &lt; <math>L &lt; 350</math> m</span></p> 
<p>Creste appuntite <math>150 &lt; L &lt; 250</math></p>	$F_{a,0.1-0.5} = e^{\frac{0.73H}{L}}$	<p style="text-align: center;"><b>CORRELAZIONE H/L - Fa 0.1-0.5 s</b> <span style="float: right;"><b>CRESTE APPUNTITE</b> <math>150</math> m &lt; <math>L &lt; 250</math> m</span></p> 

*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Rimini (RN)*  
**Relazione Tecnico Illustrativa**



**Tabella 9.2.2 – Abaco per scarpate rocciose (Tab. 3.3-2 - ICMS2008)**

Classe altimetrica	Classe di inclinazione	Valore di $F_a$	Area di influenza
$10 \text{ m} \leq H \leq 20 \text{ m}$	$10^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	1.1	$A_i = H$
$20 \text{ m} < H \leq 40 \text{ m}$	$10^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	1.2	$A_i = \frac{3}{4} H$
$H > 40 \text{ m}$	$10^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$	1.1	$A_i = \frac{3}{4} H$
	$20^\circ < \alpha \leq 40^\circ$	1.2	
	$40^\circ < \alpha \leq 60^\circ$	1.3	
	$60^\circ < \alpha \leq 70^\circ$	1.2	
	$\alpha > 70^\circ$	1.1	

Tali abachi sono utilizzabili per il calcolo di fattori di amplificazione ( $F_a$ ) per le creste rocciose (bedrock sismico affiorante) caratterizzate da pendii con inclinazione media maggiore o uguale ai  $10^\circ$  (Figura 9.2.6 - Tabella 9.2.1) e per scarpate rocciose caratterizzate da fronti di altezza ( $H$ ) uguale o superiore a 10 m e inclinazione ( $\alpha$ ) del fronte principale uguale o superiore ai  $10^\circ$  (Figura 9.2.7 - Tabella 9.2.2).

In funzione della tipologia di cresta (appuntita o arrotondata) e della larghezza alla base del rilievo, solo per le creste appuntite, si sceglie la curva più appropriata per la valutazione del valore di FA in base al valore del coefficiente di forma H/L (Tabella 9.2.1).

Il valore di FA determinato è stato approssimato alla prima cifra decimale (indicazioni ICMS 2008) ed assegnato all'area corrispondente alla larghezza in cresta, mentre lungo i versanti tale valore è stato scalato in modo lineare fino al valore unitario alla base di ciascun versante e, in ogni caso, stimando il Fa sino al

marginale della microzona in studio (ove questo risulti di estensione minore).

In modo analogo gli ICMS riportano (Tabella 9.2.2) il valore di  $F_a$  per ciascuna classe altimetrica (H) e classe di inclinazione ( $\alpha$ ) delle scarpate (Pergalani e Compagnoni, 2006b).

Un valore di  $F_a$  caratteristico è assegnato a ogni tipologia di scarpata potendo individuare anche l'estensione della relativa area di influenza ( $A_i$ ) in funzione dell'altezza del pendio.

Di seguito (Figura 9.2.8) si riportano schematicamente i profili analizzati completi delle caratteristiche geometriche rappresentative. Tali profili sono stati individuati sulla base di caratteri geomorfologici ritenuti rilevanti ai fini di una potenziale amplificazione sismica.

### PROFILI PER LA STIMA DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE TOPOGRAFICA

SEZ. S – S'



SEZ. T – T'



Figura 9.2.8 – Sezioni topografiche rappresentative per l'analisi dei fattori di amplificazione topografica

Tabella 9.2.3 – Fattori di amplificazione topografica per il periodo 0.1-0.5 s

Sezione	tipo	H	L	Ft 0.1-0.5	SCA= Scarpata
Profilo – S-S'	CAP	76	1290	1.1	CAR= Cresta arrotondata
Profilo – T-T'	CAP	44	831	1.1	CAP= Cresta appuntita (L>350 m)

In funzione delle pendenze rilevate e delle conformazioni dei versanti, sono stati complessivamente analizzati 2 profili ritenuti potenzialmente amplificanti e sui quali è stato calcolato l'effetto della topografia (situazione di cresta o versante).

Considerati l'estensione (L) e dislivelli (H) delle sezioni rilevate, in relazione all'estensione delle microzone ed alle indicazioni ICMS, si sono individuate le zone di massima amplificazione in sommità delle aree studiate ed i valori scalati all'interno di ciascuna microzona.

In ogni caso i valori rilevati, in virtù delle conformazioni morfologiche, risultano non eccedere mai la soglia massima di 1.1 e, pertanto, è stata disegnata una mappa della distribuzione dei valori di amplificazione con valori compresi tra 1 e 1,1. *Taluni rilievi minori sono stati esclusi dalla stima del fattore di amplificazione topografico in quanto di altezza minore di 30 mt rispetto alle aree circostanti di fondovalle e/o con pendenze medie minori di 10°.*

Come desumibile dalle linee guida ICMS, i fattori topografici semplificati sono generalmente elaborati ed indicati per condizioni lineari elastiche e/o comunque di modesta non linearità; pertanto tali fattori andranno ulteriormente valutati puntualmente per le coperture instabili in quanto, in condizioni sismiche, risultano potenzialmente affette da fenomeni di marcata non linearità e/o spostamenti sensibili, in grado di alterarne le modalità amplificazione sismica attesa, generalmente tali da richiedere uno specifico approfondimento di indagine di III livello.

Allo scopo di rappresentare cartograficamente le informazioni relative al fattore di amplificazione, per ciascuna microzona, in aggiunta alla gradazione di colore, è stato riportato il valore numerico ottenuto tramite specifiche etichette sovrimposte; in queste ultime l'etichetta e relativo colore evidenziano se trattasi di sola amplificazione per effetto stratigrafico (S) o effetto congiunto della stratigrafia e fattore topografico (SxT).

Questa modalità di rappresentazione consente di mantenere una buona leggibilità del supporto cartografico, indicando inoltre in quale fascia di territorio è possibile stimare il fattore di amplificazione complessivo (moltiplicando  $F_{strat} \times F_t$ ) in funzione delle locali condizioni topografiche, riportandone altresì il valore finale atteso.

#### **9.2.4 Carta del parametro di scuotimento sismico assoluto “ $H_{SM}$ ”**

Per rappresentare in maniera assoluta e più realistica la pericolosità sismica del territorio, tenendo conto sia della pericolosità di base sia degli effetti di sito, la DGR 630/2019, come aggiornata dalla *DGR 476/2021 e successiva integrazione DGR 564/2021*, richiede altresì una carta della distribuzione sul territorio dei valori di intensità sismica  $H_{SM}$  (Naso et al., 2019), parametro che esprime lo scuotimento atteso al sito in valore assoluto (accelerazione in  $cm/s^2$ ), dato dall'integrale dello spettro in accelerazione calcolato nell'intervallo di periodi  $0,1s \leq T \leq 0,5s$  e diviso per  $\Delta T$ , cioè per 0,4s. In assenza di analisi RSL, il parametro HSM può essere calcolato come prodotto del parametro di intensità spettrale  $ASI_{UHS}$  (*Acceleration Spectrum Intensity*), valore integrale dello spettro di riferimento in accelerazione calcolato per l'intervallo di periodi  $0,1s \leq T \leq 0,5s$ , diviso per  $\Delta T$  (in questo caso pari a 0,4s) e moltiplicato per il fattore di amplificazione in accelerazione (FA) calcolato per lo stesso intervallo di periodi:

$$H_{SM} = \frac{ASI_{UHS}}{\Delta T} \times FA$$

I valori di riferimento  $ASI_{UHS}/\Delta T$ , calcolati per ogni punto della griglia INGV, sono riportati nel file *all\_4\_coord.kmz* sviluppato a cura del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia Romagna, adottando di volta in volta quelli del nodo più vicino.

Tale parametro consente una rappresentazione assoluta della pericolosità sismica del territorio, la zonazione del territorio in termini di  $H_{SM}$  permette di stabilire una reale graduatoria di pericolosità tra le varie zone omogenee ed è quindi un elemento conoscitivo fondamentale per una più realistica valutazione del rischio sismico; in particolare l'intervallo di periodi compreso tra 0,1 s e 0,5 s, risulta di grande interesse per il governo del territorio e per la pianificazione urbanistica, in quanto è noto da vari studi che i periodi propri della maggior parte degli edifici dei centri storici, e dei centri abitati in generale, sono compresi in questo intervallo e, pertanto, consente anche eventuali valutazioni preliminari sul danneggiamento potenziale atteso. Al proposito Naso et al., 2019 propongono una discretizzazione secondo classi di valori di  $H_{SM}$  in relazione all'intensità macrosismica e danneggiamento potenziale attesi (vedi Tabella 9.2.4).

Tabella 9.2.4 – Ipotetiche classi di intensità  $H_{SM}$  in relazione ad altri fenomeni fisici (Naso et al., 2019 modificato)

Seismic hazard	low-very / low	moderate / low	moderate	high	very high
$H_{SM}$ (g)	$\leq 0.183$	$0.183 < H_{SM} \leq 0.347$	$0.347 < H_{SM} \leq 0.663$	$0.663 < H_{SM} \leq 1.264$	$> 1.264$
Potential damage	none – very light	very light – moderate	moderate – heavy	heavy	very heavy
Instrumental intensity	$\leq VI$	VII	VIII	IX	$\geq X$

Secondo gli autori infatti tale relazione empirica, correlata alla PGA ed ai fattori di amplificazione, risulta congrua con i risultati ed altri parametri sismici adottati per la classificazione sismica del territorio (Gomez Capera et al. 2007, 2015 - Faenza e Michelini, 2010 - Bramerini e Di Pasquale, 2002).

Nella rappresentazione cartografica si sono adottate le classi di pericolosità e relativa vestizione indicate dalla Regione Emilia Romagna in conformità alle recenti “Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da amplificazioni” – versione 2.0 (2022). In tabella 9.2.5. si riportano le classi di  $H_{SM}$  di riferimento:

Tabella 9.2.5 – Classificazione di  $H_{SM}$  per i 3 intervalli di periodo spettrale (LG “Amplificazioni” – versione 2.0, 2022).

Intervalli di periodo	Classificazione $H_{SM}$ [g]			
	Basso ( $ZS_{4SM}$ )	Medio ( $ZS_{3SM}$ )	Alto ( $ZS_{2SM}$ )	Molto alto ( $ZS_{1SM}$ )
$T1_{(0.1-0.5)}$	$\leq 0.21$	0.22-0.54	0.55-0.85	$\geq 0.86$
$T2_{(0.4-0.8)}$	$\leq 0.14$	0.15-0.34	0.35-0.55	$\geq 0.56$
$T3_{(0.7-1.1)}$	$\leq 0.09$	0.10-0.22	0.23-0.35	$\geq 0.36$

Anche per quanto riguarda la definizione di tale parametro di pericolosità sismica, i valori preliminarmente stimati per il solo  $H_{SM}$ , a seguito di analisi di RSL, sono stati aggiornati ed integrati sia per l'intervallo di periodo  $0,1s \leq T \leq 0,5s$  che  $H_{0408}$ ,  $H_{0711}$ ,  $H_{0515}$ , ovvero lo scuotimento in accelerazione (g) atteso al sito per gli intervalli di periodo  $0,4s \leq T \leq 0,8s$ ,  $0,7s \leq T \leq 1,1s$  e  $0,5s \leq T \leq 1,5s$ .

Di seguito si riporta uno stralcio esemplificativo della tavola relativa al parametro di scuotimento assoluto  $H_{SM}$  (figura 9.2.9), a cui si potrà fare riferimento per un maggior dettaglio.

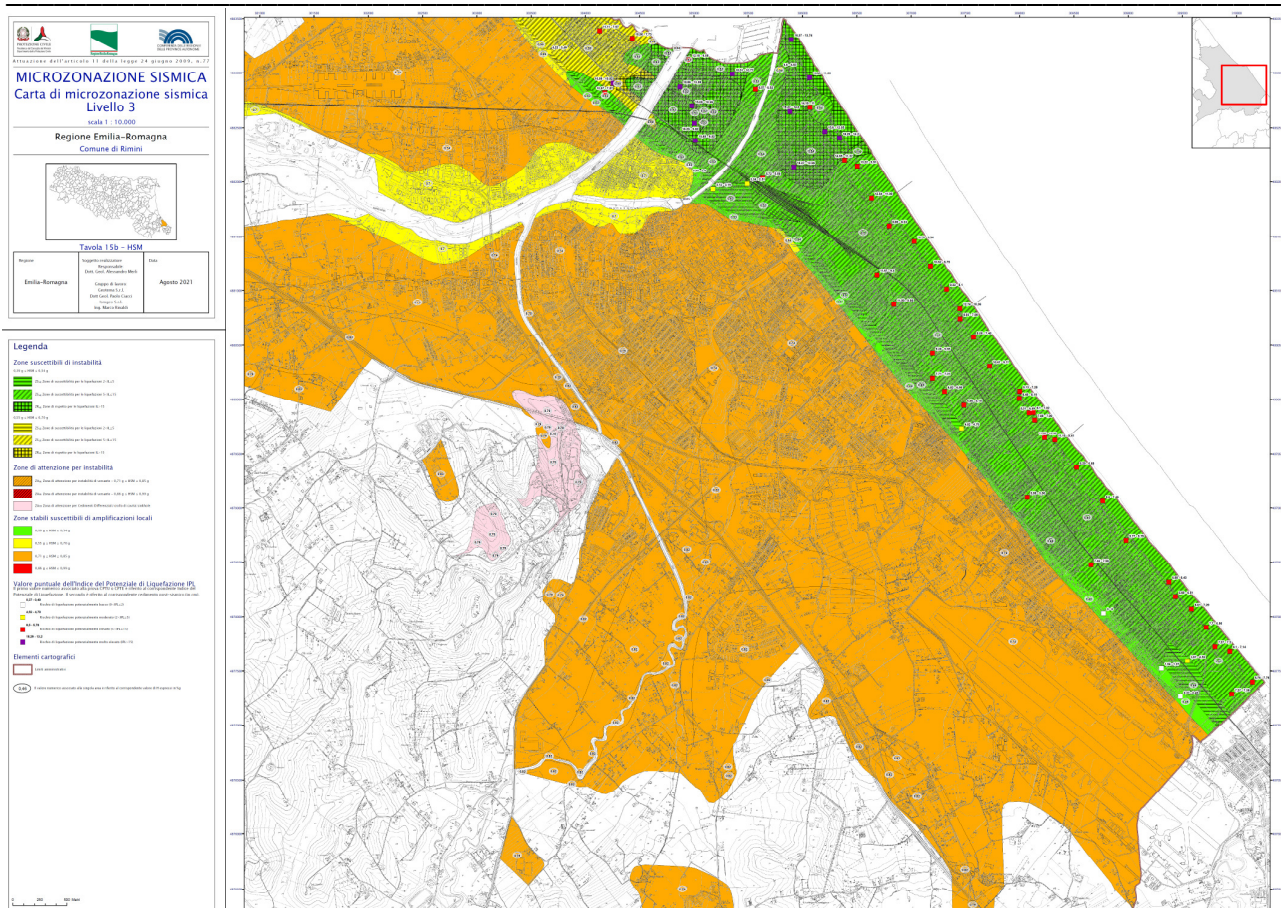


Figura 9.2.9 – Miniatura esemplificativa di una carta di scuotimento assoluto  $H_{SM}$ .

## 10. MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO III (ANALISI DI RSL E LIQUEFAZIONE)

Sulla base delle informazioni stratigrafiche profonde e superficiali, nonché sulla scorta delle analisi di laboratorio geotecnico e ciclico e delle indagini geognostiche e geofisiche effettuate in sito, sono state realizzate una serie di analisi di RSL sulle verticali ritenute maggiormente significative. Il territorio costiero è stato quindi suddiviso in 10 microzone contraddistinte da condizioni di pericolosità sismica omogenee, in base alle quali sono state condotte le verifiche a liquefazione tramite metodologie semplificate sulla scorta di prove  $C_{pte}/u$ , adottando metodi ritenuti congrui ed adeguati alle condizioni litostratigrafiche e suggeriti dalle linee guida di settore nonché contemplati fra i metodi della Geotecnica Sismica.

Dall'esito congiunto di queste metodologie di indagine si sono quindi sviluppate le cartografie di Microzonazione Sismica di Terzo Livello di approfondimento per liquefazione



## **10.1. Analisi di Risposta Sismica Locale**

### *10.1.1 Modellazione numerica e codici di calcolo*

Le analisi numeriche sono state effettuate in condizioni monodimensionali tramite il codice STRATA (Kottke e Rathje, 2008), che modella una colonna di terreno come un continuo stratificato a comportamento visco-elastico lineare. Le equazioni del moto sono risolte nel dominio della frequenza attraverso il calcolo e la successiva convoluzione delle funzioni di trasferimento di ogni strato, analogamente a quanto fatto dal ben noto codice di calcolo SHAKE91 (Idriss e Sun, 1992). La non linearità delle proprietà dinamiche, assunte indipendenti dalla frequenza, è portata in conto tramite l'approccio *lineare equivalente*. Secondo tale modello, il modulo di taglio  $G$  e il fattore di smorzamento  $D$ , che descrivono il comportamento meccanico di un materiale sotto sollecitazioni cicliche, vengono fatti dipendere dal livello della deformazione tangenziale  $\gamma_C$  indotta dalle sollecitazioni sismiche. A partire dai valori iniziali dei parametri di rigidezza e smorzamento con una prima analisi si determina un primo valore caratteristico (o effettivo) della deformazione tangenziale  $\gamma_{eff}$ . Dalle curve  $G/G_0-\gamma_C$  e  $D-\gamma_C$ , che esprimono il comportamento non lineare, si determinano quindi nuovi valori di  $G$  e  $D$  e si esegue una nuova analisi determinando un nuovo valore caratteristico. Il procedimento viene ripetuto fino a quando lo scarto percentuale tra i valori di  $G$ ,  $D$  e  $\gamma_{eff}$  viene ritenuto accettabile.

Per le analisi sui segnali/spettri in fase di input/output sono stati utilizzati i software SeismoSignal e SeismoMatch, sviluppati dalla soc. SeismoSoft, di cui si dispone della relativa licenza d'uso.

### *10.1.2 Moto di input*

Come previsto da Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica, le analisi di Risposta Sismica Locale (RSL) sono state condotte considerando, in ciascuna simulazione, differenti storie temporali applicate al bedrock sismico, in modo da poter investigare, quanto più possibile, il comportamento del sottosuolo e la sua suscettibilità ai fenomeni amplificativi/dissipativi quando sottoposto ad azioni sismiche differenti. In dettaglio, sono stati utilizzati i 7 segnali di riferimento indicati dalla Regione Emilia Romagna in DGR 630/2019, come aggiornata dalla *DGR 476/2021 e successiva integrazione DGR 564/2021*. Si tratta di **Accelerogrammi Naturali** estratti da una specifica banca dati tramite piattaforma WebGIS realizzata dall'istituto EUCENTRE: <http://egeos-test.eucentre.it/rer/home.html>

Tali accelerogrammi vengono selezionati secondo il principio di spettro compatibilità, utilizzando una procedura simile a quella adottata per la creazione di SEISM-HOME (Rota et al., 2012), considerando le prescrizioni delle NTC08 e NTC18 (ossia lo scarto tra lo spettro medio ottenuto dai 7 accelerogrammi e lo spettro di riferimento non deve superare una specifica soglia all'interno di un prefissato campo di periodi).

L'adattamento dei singoli segnali, selezionati tramite uno specifico algoritmo, avviene tramite scalatura lineare all'accelerazione di ancoraggio prevista al bedrock, risultando quindi spettro-compatibili con lo

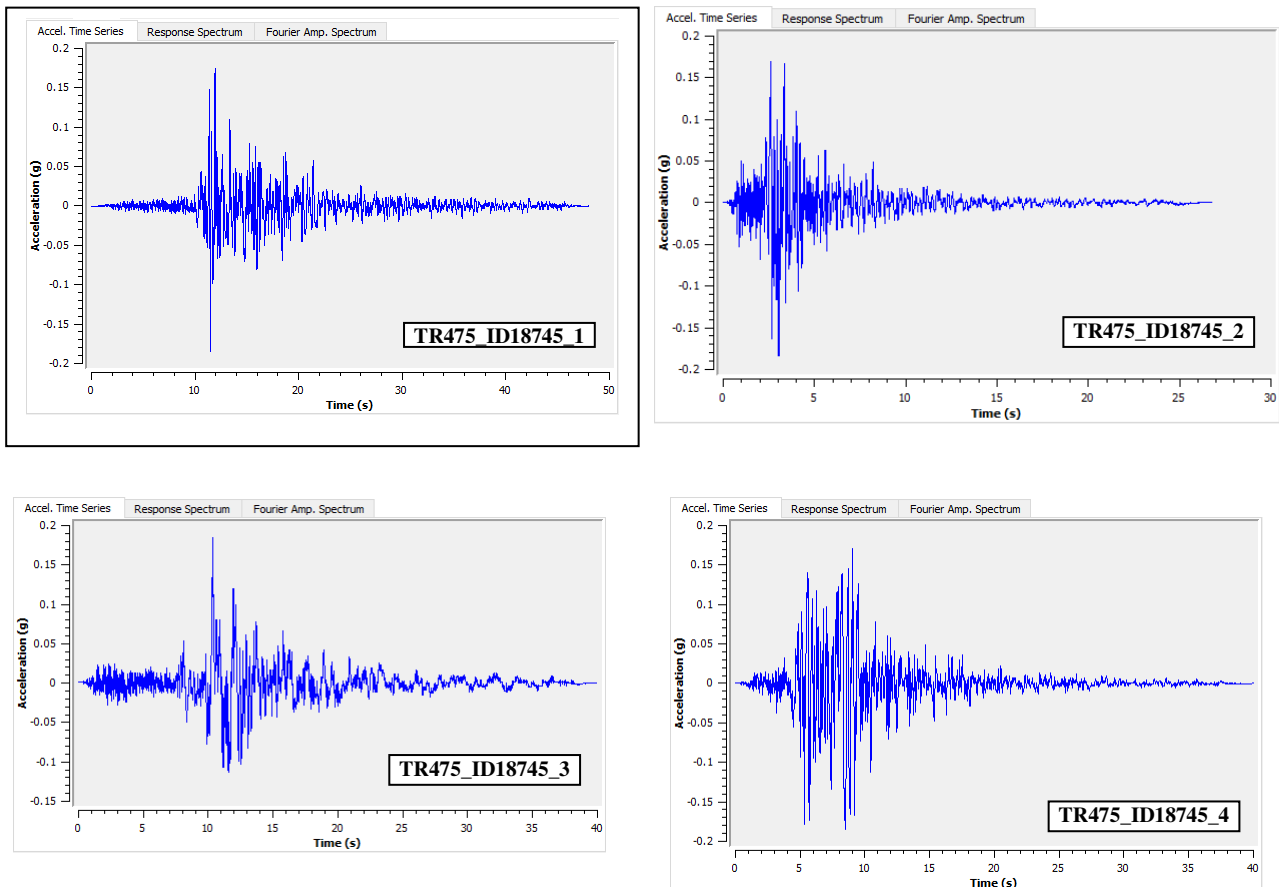
spettro elastico in accelerazione definito per un determinato  $T_r$  (tempo di ritorno) al nodo del reticolo INGV più vicino, individuato secondo le modalità definite al precedente Capitolo 3.

La “forma generale” dei 7 accelerogrammi (la cui sigla è definita dal tempo di ritorno+codice identificativo del nodo di riferimento+suffisso\_1,\_2 ....es. TR475\_ID18969\_1) è indicativamente riportata in figura 10.1.

Il valore di profondità del bedrock sismico, al quale sono stati applicati in “outcrop” i 7 segnali di riferimento, è stato determinato sia sulla base dell’analisi congiunta delle diverse prove geofisiche in sito (misure cptus, CH, DH, Hvsr ed in array) sia sulle informazioni derivanti da sondaggi profondi. A tal proposito i profili di  $V_s$  di riferimento sono sintetizzati in figura 5.3 del precedente Capitolo 5.

Il comportamento geomeccanico/geofisico di tale interfaccia è stato descritto mediante i seguenti parametri:  $\delta=22 \text{ kN/m}^3$ ,  $V_s=800/900 \text{ m/sec}$  e  $D_0=0.005$  (smorzamento/damping = 0.5 %).

Il livello freatico medio utilizzato per la modellazione numerica risulta variabile in relazione al sito di verifica e, comunque, mediamente identificato a circa -1 m dal p.c. locale.



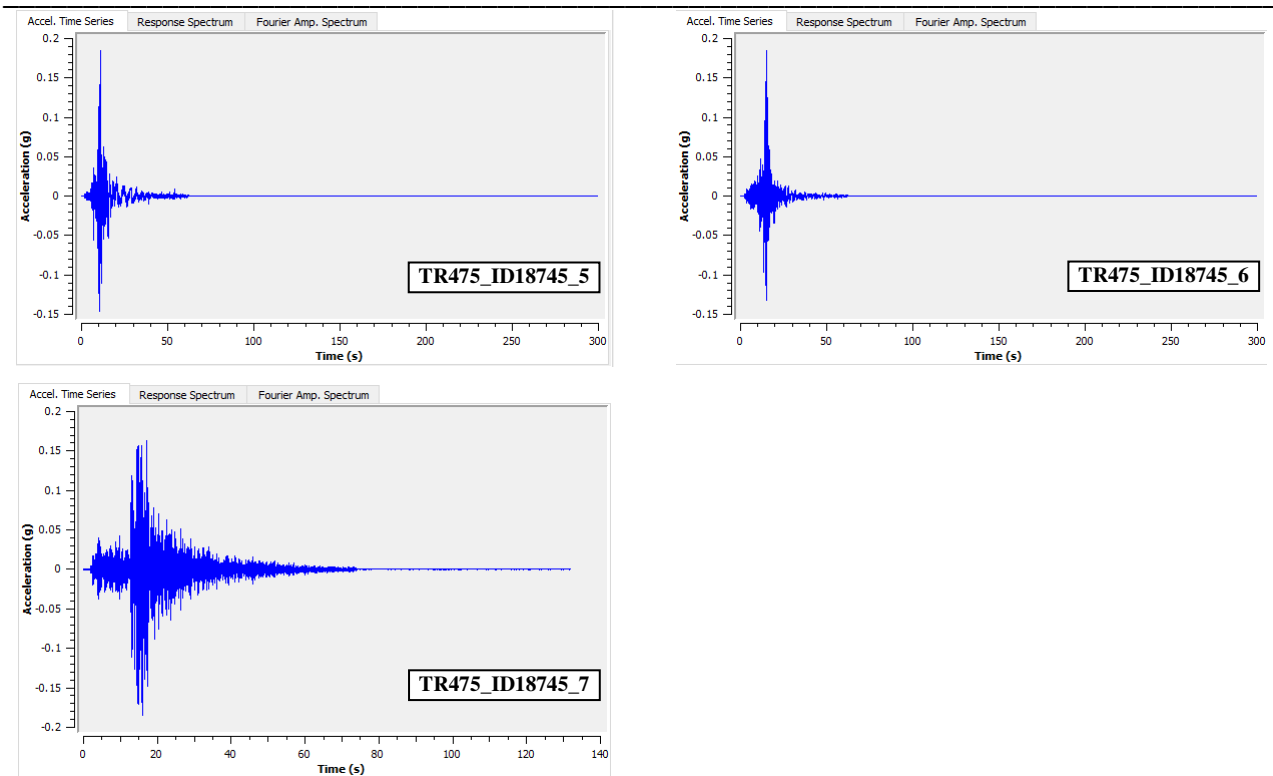


Figura 10.1-Sismogrammi di riferimento al nodo ID18745, utilizzati come “Input” al bedrock per le analisi di RSL.

### 10.1.3 Modello di sottosuolo e parametri dinamici

Per quanto riguarda la caratterizzazione dinamica dei terreni, al fine di ottenere curve di decadimento del Modulo di taglio normalizzato ( $G/G_0$ ) e dello smorzamento ( $D\%$ ) rappresentative per l'area, sono state utilizzate sia curve di letteratura sviluppate su campioni di alta qualità di terreno analoghi (per caratteristiche granulometriche e costitutive), sia curve derivate da dati sperimentali di Colonna Risonante su campioni di terreno locale elaborati con formulazione di Yokota et Al. 1981 (vedi figure 10.2 e 10.3).

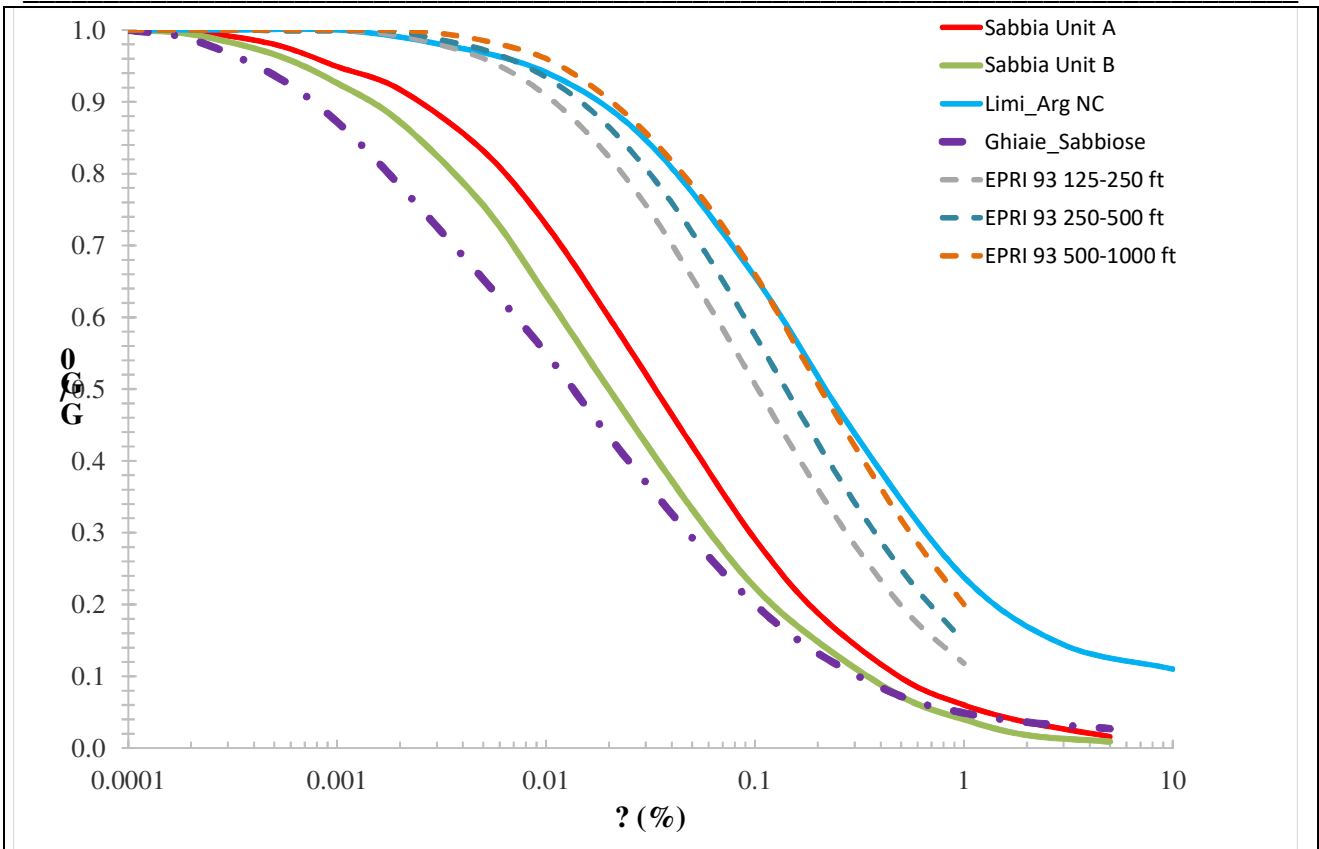
In virtù di recenti esperienze di laboratorio dinamico condotte su terreni analoghi ed in zone limitrofe a quelle di studio i modelli di terreno di letteratura utilizzati a tale scopo per i terreni sabbiosi e limo-argillosi sono quelli sviluppati da: Sun et Al. (1988), Darendeli & Stokoe (2001), Seed et al. (1986), Idriss (1970-1990), Vucetic & Dobri (1991), EPRI (1993) e Regione Lombardia.

Per i sismostrati più profondi, non sondati e campionati direttamente, data la varietà tipologica dei materiali presenti (frequenti alternanze di limo-argillosi e, talora, orizzonti ghiaioso-sabbiosi), si sono utilizzate le curve di letteratura EPRI 93, formulate per terreni generici in funzione della profondità/carico litostatico (125-250 ft / 250-500 ft / 500-1000 ft).

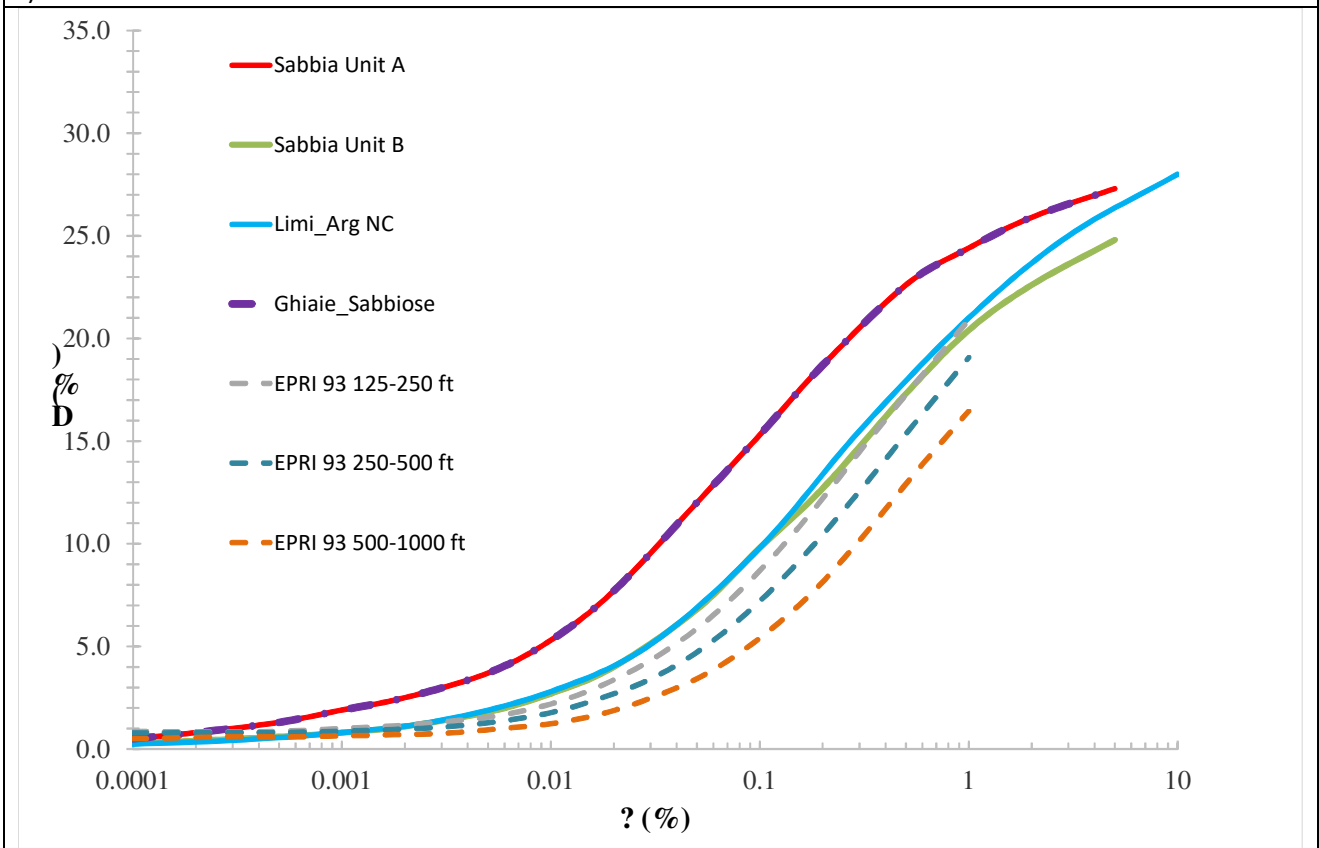
La scelta delle curve utilizzate per ciascun sismostrato è stata condotta, quindi, sull'assunzione che il comportamento dei materiali, oltre che su parametri litologici, varia anche in funzione di:

- Profondità/pressione di confinamento • OCR • IP • Frequenza • N. cicli

Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Rimini (RN)  
 Relazione Tecnico Illustrativa



a)



b)

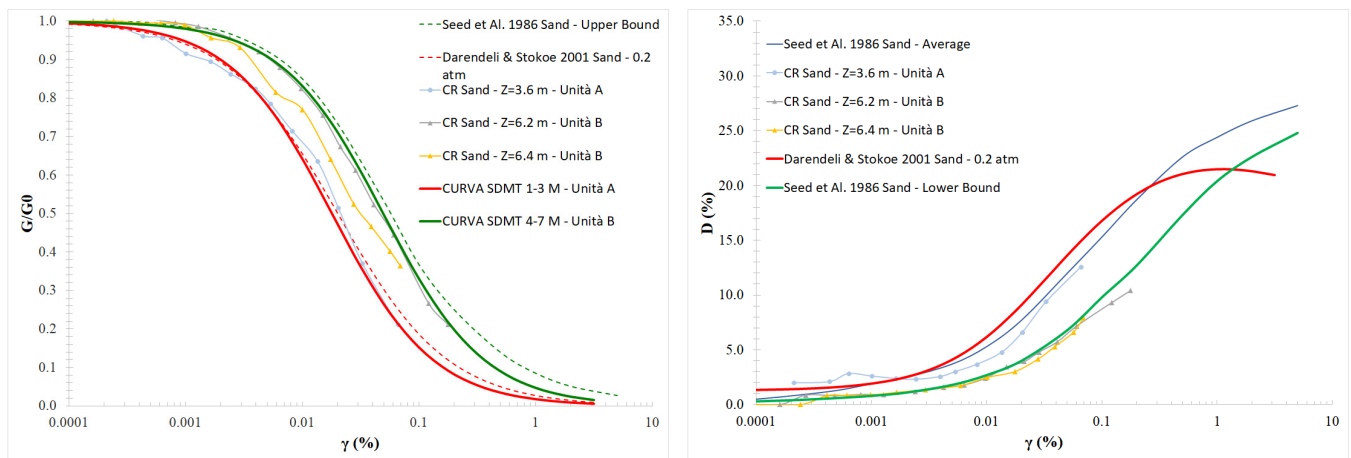
Figura 10.2- Curve di caratterizzazione dinamica dei terreni – Zone RNC - RNN. Curve di decadimento del modulo di taglio normalizzato  $G/G_0$  a); Curve di smorzamento  $D\%$  b)

In Figura 10.2 vengono riportate le curve di decadimento/damping utilizzate per la caratterizzazione dei terreni presso le zone RNC ed RNN 01, 02, 03, 04.

Diversamente per le zone costiere di Rimini Sud (da RNS\_01 a RNS\_05), considerata la difficoltà di prelievo di campioni indisturbati di sabbie sature in falda, per la caratterizzazione dinamica delle sabbie appartenenti alle Unità A e B, ci si è avvalsi dei dati e profili ottenibili da prova SDMT. Sulla scorta dei moduli di taglio ottenibili a bassissime deformazioni ( $G_0$ ) ed operativi ( $G$ ), per ciascuna Zona si sono così definite specifiche curve di degrado sviluppate tramite la metodologia riportata in Marchetti et al (2008), Amoroso S. (2011) ed Amoroso et al. (2014); quindi, a seguito di un raffronto con curve  $G/G_0$  di letteratura per terreni incoerenti sabbiosi (ottenute su campioni di alta qualità e su ampio range deformativo), in virtù della massima affinità si sono selezionate le corrispondenti curve di damping di letteratura. La calibrazione dei parametri necessari alla sviluppo di tali curve da SDMT si è basata su prove CR di archivio effettuate sulle medesime sabbie costiere sia a poche centinaia di metri di distanza che in altri tratti costieri romagnoli. Tali valori risultano peraltro pienamente compatibili e coerenti con i parametri deformativi stimati da Marchetti et al. (2006) e Monaco et al. (2014) per il campo prova in vera grandezza di Treporti (VE), in terreni costieri adriatici simili a quelli in oggetto (sabbie marine e limi della laguna di Venezia di natura sedimentaria analoga).

In particolare per lo sviluppo delle curve relative all'Unità A (per ciascuna delle Zone RNS\_01-05) si sono utilizzati i valori SDMT ottenuti fra 1-3 mt di profondità (curve SDMT 1-3 m), mentre per l'Unità B si sono adottati i valori ottenuti nell'orizzonte compreso fra 4-7 mt di profondità (curve SDMT 4-7 m) ottenendo le seguenti curve di riferimento per le sabbie costiere:

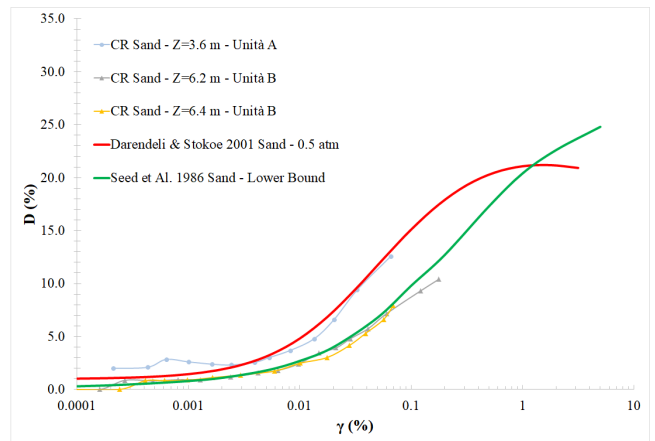
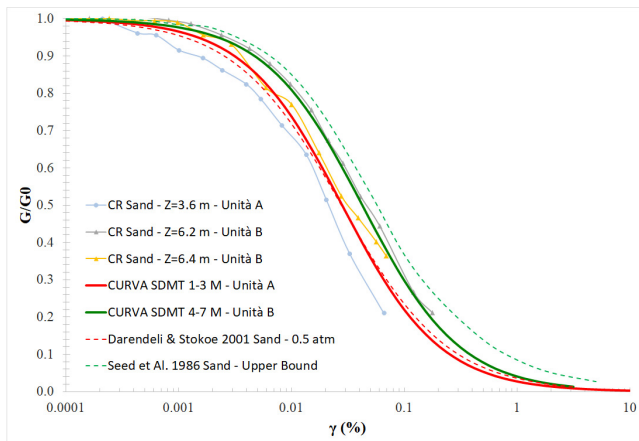
### RNS\_01 - 02



Unità sismostratigrafica	Curva $G/G_0$	Curva $D\%$
Unità A1	SDMT 1-3 m	Darendeli & Stokoe 2001 IP=0; 0.2 atm
Unità B2	SDMT 4-7 m	Seed et Al., 1986 Sand – L.B.

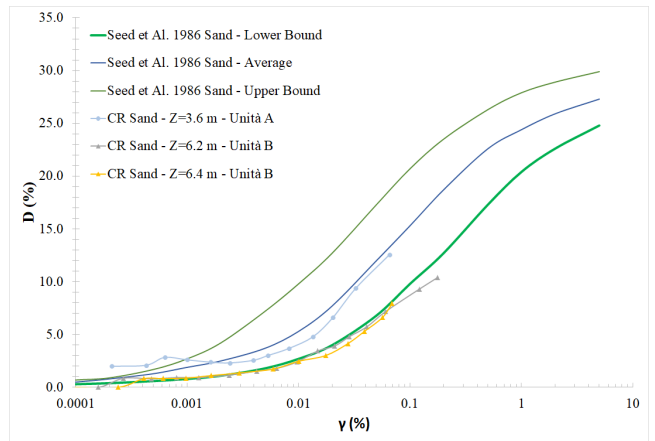
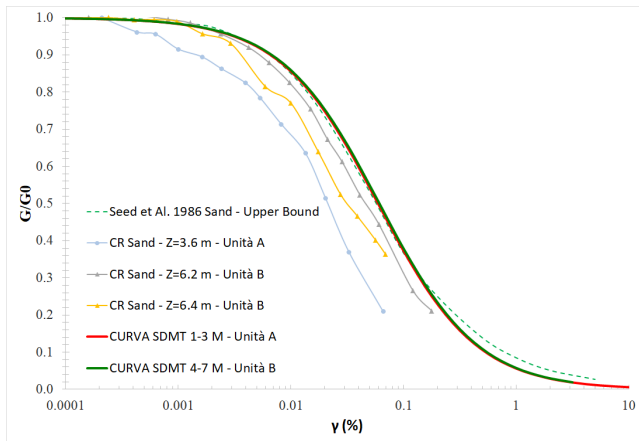
*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Rimini (RN)*  
**Relazione Tecnico Illustrativa**

**RNS\_03**



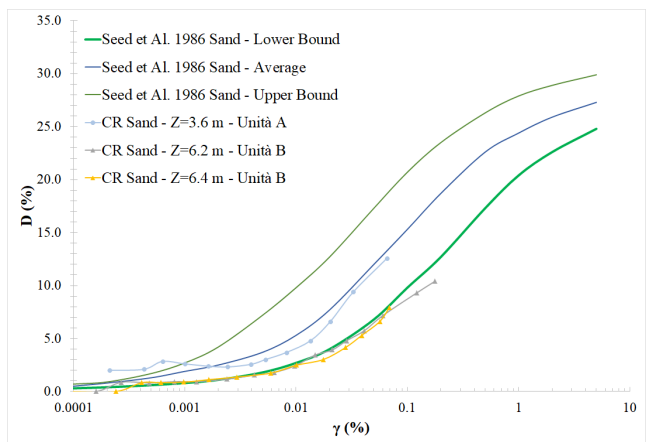
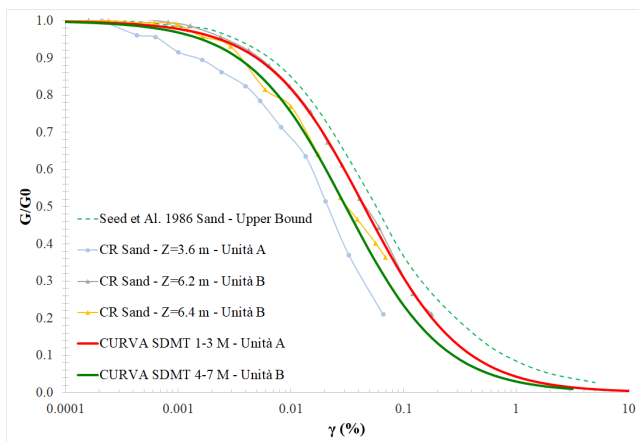
Unità sismostratigrafica	Curva G/G0	Curva D%
Unità A2	SDMT 1-3 m	Darendeli & Stokoe 2001 IP=0; 0.5 atm
Unità B2	SDMT 4-7 m	Seed et Al., 1986 Sand – L.B.

**RNS\_04**



Unità sismostratigrafica	Curva G/G0	Curva D%
Unità A3	SDMT 1-3 m	Seed et Al., 1986 Sand – L.B.
Unità B3	SDMT 4-7 m	Seed et Al., 1986 Sand – L.B.

**RNS\_05**

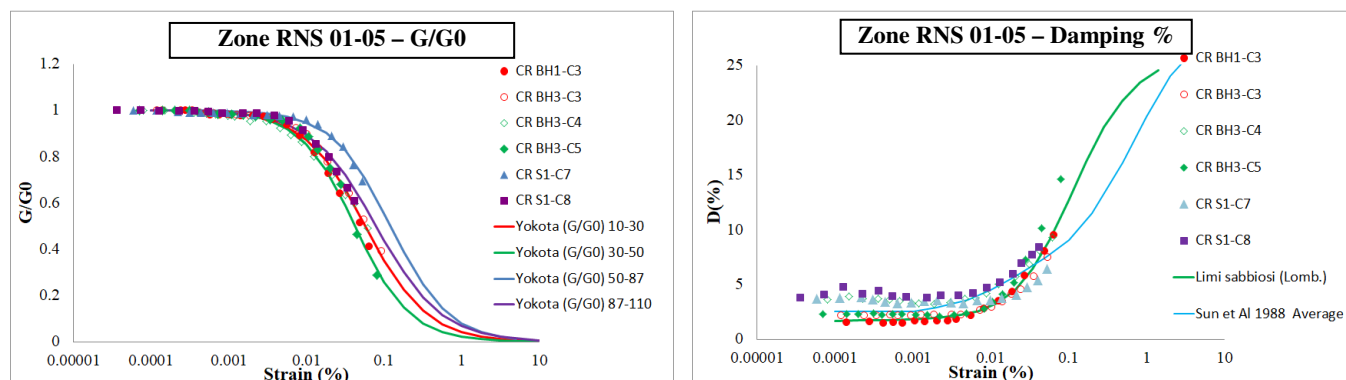


Unità sismostratigrafica	Curva G/G0	Curva D%
Unità A4	SDMT 1-3 m	Seed et Al., 1986 Sand – L.B.
Unità B4	SDMT 4-7 m	Seed et Al., 1986 Sand – L.B.

Presso le microzone di Rimini Sud il comportamento dinamico dei terreni alluvionali prevalentemente fini e coesivi, sottostanti il prisma sabbioso marino e fino alla profondità massima di -110 mt dal p.c., è stato definito tramite l'elaborazione di specifiche curve di CR realizzate su campioni rappresentativi prelevati a varie profondità dai sondaggi eseguiti presso RNS, nonché in corrispondenza del sondaggio profondo propedeutico alla realizzazione della prova Cross-Hole in via D'Annunzio (in prossimità del confine comunale meridionale); ciascun orizzonte litologico rappresentativo è quindi stato caratterizzato almeno tramite una coppia di prove CR.

In particolare, mentre per le curve di degrado  $G/G_0$  è stato possibile definire il modello completo tramite la formulazione di Yokota et Al. 1981, per quanto attiene ai dati di smorzamento (Damping %), essendo i campioni caratterizzati solo entro limitati ambiti di deformazione ( $\gamma < 0.1\%$ ), le rispettive curve di Damping sono state definite confrontando le curve di letteratura di vari autori con gli andamenti dei dati sperimentali, adottando quelle rivelatesi maggiormente affini e compatibili con le litologie analizzate; i modelli di terreno di letteratura utilizzati a tale scopo per i terreni sabbiosi e limo-argillosi sono quelli sviluppati da: Sun et Al. (1988), Darendeli & Stokoe (2001), Seed et al. (1986), Idriss (1970), Vucetic & Dobri (1991), EPRI (1993) e Regione Lombardia.

Si è giunti così a definire i litotipi sottostanti il prisma sabbioso costiero di RNS in cui l'Unità C (sino alla profondità max di - 30 mt dal p.c.) viene modellata tramite la curva  $G/G_0$  denominata Yokota 10-30, mentre quelle relative ai sismostrati più profondi rispettivamente tramite Yokota 30-50, Yokota 50-87 e Yokota 87-110:



Unità sismostratigrafica	Curva $G/G_0$	Curva $D\%$
Unità C (fino a -30m da p.c.)	Yokota 10-30	Limi sabbiosi (Curve Lombardia)
Limi Arg da -30m a -50 m da p.c.	Yokota 30-50	Limi sabbiosi (Curve Lombardia)
Limi Arg da -50m a -87 m da p.c.	Yokota 50-87	Sun et al., 1988 - Average
Limi Arg da -87m a -110 m da p.c.	Yokota 87-110	Sun et al., 1988 - Average

Figura 10.3- Curve di caratterizzazione dinamica dei terreni – Zone RNS 01- 05. Curve di decadimento del modulo di taglio normalizzato  $G/G_0$  e di smorzamento  $D\%$  dei depositi alluvionali sottostanti il prisma sabbioso costiero.

Anche presso RNS per caratterizzare gli orizzonti di “ghiaie sabbiose” si sono utilizzate le curve definite al proposito da Seed et al. (1986).

Pertanto in figura 10.4 si riportano i modelli di sottosuolo utilizzati per le analisi di RSL in corrispondenza delle verticali rappresentative per le Zone RNC, RNN\_01-04 ed RNS\_01-05 in cui è stata suddivisa la piana costiera di Rimini.

**Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Rimini (RN)**  
**Relazione Tecnico Illustrativa**

	Depth (m)	Thickness (m)	Soil Type	Vs (m/s)
1	0.00	2.00	Sabbia Unit A	172.00
2	2.00	2.00	Sabbia Unit A	183.00
3	4.00	1.50	Sabbia Unit B	181.00
4	5.50	1.50	Sabbia Unit B	190.00
5	7.00	5.00	Limi_Arg NC	181.00
6	12.00	5.00	Limi_Arg NC	187.00
7	17.00	6.50	Limi_Arg NC	191.00
8	23.50	6.50	Limi_Arg NC	229.00
9	30.00	20.00	Ghiaie sabbiose	428.00
10	50.00	20.00	Limi_Arg NC	498.00
11	70.00	20.00	Ghiaie sabbiose	567.00
12	90.00	40.00	EPRI 250-500	404.00
13	130.00	40.00	EPRI 250-500	461.00
14	170.00	40.00	EPRI 500-1000	517.00
15	210.00	40.00	EPRI 500-1000	573.00
16	250.00	Half-Space	Bedrock	800.00

	Depth (m)	Thickness (m)	Soil Type	Vs (m/s)
1	0.00	1.00	Sabbia Unit A	160.00
2	1.00	2.00	Sabbia Unit A	200.00
3	3.00	1.00	Sabbia Unit B	160.00
4	4.00	2.50	Sabbia Unit B	170.00
5	6.50	4.50	Limi_Arg NC	180.00
6	11.00	4.00	Limi_Arg NC	165.00
7	15.00	5.00	Ghiaie sabbiose	320.00
8	20.00	5.00	Ghiaie sabbiose	320.00
9	25.00	5.00	Limi_Arg NC	220.00
10	30.00	5.00	Limi_Arg NC	230.00
11	35.00	5.00	Limi_Arg NC	240.00
12	40.00	5.00	Ghiaie sabbiose	360.00
13	45.00	15.00	Limi_Arg NC	270.00
14	60.00	15.00	Limi_Arg NC	290.00
15	75.00	10.00	Limi_Arg NC	320.00
16	85.00	10.00	Ghiaie sabbiose	550.00
17	95.00	40.00	EPRI 250-500	400.00
18	135.00	40.00	EPRI 250-500	460.00
19	175.00	40.00	EPRI 500-1000	520.00
20	215.00	40.00	EPRI 500-1000	580.00
21	255.00	Half-Space	Bedrock	800.00

	Depth (m)	Thickness (m)	Soil Type	Vs (m/s)
1	0.00	1.00	Sabbia Unit A	150.00
2	1.00	1.00	Sabbia Unit A	210.00
3	2.00	1.50	Sabbia Unit B	110.00
4	3.50	1.50	Sabbia Unit B	110.00
5	5.00	1.90	Sabbia Unit B	140.00
6	6.90	3.70	Ghiaia	360.00
7	10.60	9.00	Limi_Arg NC	200.00
8	19.60	10.00	Limi_Arg NC	220.00
9	29.60	5.00	Ghiaia	400.00
10	34.60	12.50	Limi_Arg NC	230.00
11	47.10	12.50	Limi_Arg NC	240.00
12	59.60	12.50	Limi_Arg NC	250.00
13	72.10	12.50	Limi_Arg NC	260.00
14	84.60	15.40	Ghiaia	550.00
15	100.00	40.00	EPRI 250-500	590.00
16	140.00	40.00	EPRI 500-1000	650.00
17	180.00	40.00	EPRI 500-1000	710.00
18	220.00	20.00	EPRI 500-1000	730.00
19	240.00	10.00	EPRI 500-1000	755.00
20	250.00	Half-Space	Bedrock	900.00

a)

b)

c)

Depth (m)	Thickness (m)	Soil Type	Average Vs (m/s)
0	1	Sabbia Unit A	170
1	1	Sabbia Unit A	170
2	1	Sabbia Unit A	227
3	1	Sabbia Unit A	212
4	1	Sabbia Unit B	180
5	1	Sabbia Unit B	195
6	1	Sabbia Unit B	168
7	1	Limi_Arg NC	155
8	1	Limi_Arg NC	150
9	1	Limi_Arg NC	188
10	1	Limi_Arg NC	187
11	1	Limi_Arg NC	172
12	1	Limi_Arg NC	170
13	1	Limi_Arg NC	193
14	1	Limi_Arg NC	190
15	1	Limi_Arg NC	195
16	1	Ghiaia	291
17	1	Ghiaia	394
18	1	Ghiaia	355
19	1	Ghiaia	334
20	1	Ghiaia	386
21	1	Limi_Arg NC	210
22	1	Limi_Arg NC	206
23	1	Limi_Arg NC	174
24	1	Ghiaia	462
25	1	Ghiaia	485
26	1	Ghiaia	487
27	1	Ghiaia	488
28	1	Ghiaia	489
29	1	Ghiaia	490
30	6	Ghiaia	490
36	8	Limi_Arg NC	230
44	8	Limi_Arg NC	250
52	3	Ghiaia	500
55	15	EPRI 120-250	280
70	15	EPRI 250-500	300
85	20	Ghiaia	700
105	40	EPRI 250-500	550
145	40	EPRI 500-1000	610
185	40	EPRI 500-1000	670
225	10	EPRI 500-1000	685
235	10	EPRI 500-1000	700
245	---	Bedrock	900

d)

Depth (m)	Thickness (m)	Soil Type	Average Vs (m/s)
0	1	Limi_Arg NC	113
1	1	Sabbia Unit A	197
2	1	Sabbia Unit A	163
3	1	Sabbia Unit B	148
4	1	Sabbia Unit B	152
5	1	Limi_Arg NC	121
6	1	Sabbia Unit B	166
7	1	Sabbia Unit B	171
8	1	Sabbia Unit B	183
9	1	Limi_Arg NC	158
10	1	Limi_Arg NC	144
11	1	Limi_Arg NC	123
12	1	Limi_Arg NC	129
13	1	Limi_Arg NC	124
14	1	Limi_Arg NC	144
15	1	Limi_Arg NC	167
16	1	Limi_Arg NC	157
17	1	Limi_Arg NC	134
18	1	Limi_Arg NC	159
19	1	Limi_Arg NC	163
20	1	Limi_Arg NC	222
21	1	Limi_Arg NC	216
22	1	Limi_Arg NC	215
23	10	Ghiaia	340
33	20	Limi_Arg NC	230
53	12	Limi_Arg NC	210
65	8	Limi_Arg NC	200
73	11	Limi_Arg NC	230
84	18	EPRI 250-500	380
102	16	EPRI 250-500	530
118	11	EPRI 250-500	560
129	34	EPRI 500-1000	600
163	40	EPRI 500-1000	660
203	40	EPRI 500-1000	720
243	---	Bedrock	900

e)

Depth (m)	Thickness (m)	Soil Type	Average Vs (m/s)
0	1	Sabbia Unit A1	126
1	1	Sabbia Unit A1	167
2	1	Sabbia Unit A1	178
3	1	Sabbia Unit B	181
4	1	Sabbia Unit B	197
5	1	Sabbia Unit B	181
6	1	Sabbia Unit B	218
7	1	Sabbia Unit B	201
8	1	Sabbia Unit B	198
9	1	Sabbia Unit B	187
10	1	Sabbia Unit B	211
11	1	Sabbia Unit B	216
12	1	Unità C	231
13	1	Unità C	254
14	1	Unità C	260
15	1	Unità C	256
16	1	Unità C	228
17	1	Unità C	236
18	1	Unità C	244
19	1	Unità C	251
20	1	Unità C	232
21	1	Unità C	238
22	1	Unità C	258
23	1	Unità C	263
24	1	Unità C	304
25	1	Unità C	313
26	1	Ghiaie sabbiose	396
27	1	Ghiaie sabbiose	391
28	1	Ghiaie sabbiose	319
29	1	Ghiaie sabbiose	313
30	1	Ghiaie sabbiose	359
31	1	Ghiaie sabbiose	427
32	1	Ghiaie sabbiose	392
33	1	Ghiaie sabbiose	385
34	1	Ghiaie sabbiose	401
35	1	Ghiaie sabbiose	382
36	1	Yokota 30-50	393
37	1	Yokota 30-50	457
38	1	Yokota 30-50	473
39	1	Yokota 30-50	486
40	1	Yokota 30-50	508
41	1	Yokota 30-50	504
42	5	Ghiaie sabbiose	488
47	14	Ghiaie sabbiose	496
61	14	Yokota 50-87	439
75	15	Yokota 50-87	382
90	55	Yokota 87-110	467
145	55	EPRI 500-1000	484
200	55	EPRI 500-1000	515
255	---	Bedrock	858

f)



*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Rimini (RN)*  
**Relazione Tecnico Illustrativa**

Depth (m)	Thickness (m)	Soil Type	Vs (m/s)
1	0.00		160.00
2	1.00	Sabbia Unità A1	200.00
3	3.50	Sabbia Unità B	171.00
4	6.50	Sabbia Unità B	167.00
5	10.50	Unità C	176.00
6	14.00	Unità C	192.00
7	18.00	Unità C	239.00
8	20.00	Unità C	280.00
9	25.00	Unità C	310.00
10	30.00	Ghiaie sabbiose	450.00
11	40.00	Yokota 50-87	320.00
12	50.00	Yokota 50-87	335.00
13	60.00	Yokota 50-87	350.00
14	70.00	Yokota 50-87	365.00
15	80.00	Yokota 50-87	380.00
16	90.00	Ghiaie sabbiose	600.00
17	100.00	Yokota 87-110	410.00
18	110.00	EPRI 250-500	440.00
19	135.00	EPRI 500-1000	470.00
20	160.00	EPRI 500-1000	510.00
21	185.00	EPRI 500-1000	540.00
22	200.00	Half-Space Bedrock	900.00

Depth (m)	Thickness (m)	Soil Type	Vs (m/s)
1	0.00		210.00
2	2.00	Sabbia Unità A3	184.00
3	3.00	Sabbia Unità B	181.00
4	5.00	Sabbia Unità B	161.00
5	7.50	Unità C	150.00
6	10.00	Unità C	187.00
7	14.00	Unità C	208.00
8	18.00	Unità C	230.00
9	20.00	Unità C	240.00
10	35.00	Yokota 50-87	260.00
11	50.00	Yokota 50-87	267.00
12	55.00	Yokota 50-87	270.00
13	65.00	Yokota 50-87	283.00
14	75.00	Yokota 87-110	309.00
15	95.00	Yokota 87-110	335.00
16	115.00	EPRI 250-500	361.00
17	135.00	EPRI 250-500	451.00
18	150.00	EPRI 500-1000	541.00
19	165.00	EPRI 500-1000	631.00
20	180.00	EPRI 500-1000	721.00
21	195.00	Half-Space Bedrock	900.00

Depth (m)	Thickness (m)	Soil Type	Vs (m/s)
1	0.00		200.00
2	1.00	Sabbia Unità A4	239.00
3	3.00	Sabbia Unità B	191.00
4	5.00	Sabbia Unità B	170.00
5	7.50	Unità C	192.00
6	11.50	Unità C	205.00
7	13.00	Unità C	265.00
8	17.50	Unità C	226.00
9	21.00	Unità C	253.00
10	24.50	Unità C	240.00
11	30.00	Unità C	217.00
12	35.00	Yokota 50-87	248.00
13	50.00	Yokota 50-87	232.00
14	70.00	Yokota 50-87	239.00
15	87.00	Yokota 87-110	332.00
16	97.00	Yokota 87-110	329.00
17	106.00	Yokota 87-110	350.00
18	121.00	EPRI 250-500	440.00
19	136.00	EPRI 250-500	530.00
20	151.00	EPRI 500-1000	620.00
21	166.00	EPRI 500-1000	710.00
22	181.00	Half-Space Bedrock	900.00

Figura 10.4- Modelli di sottosuolo adottati per le analisi di RSL relativi alle zone RNN-04 (a), RNN-03 (b), RNN-02 (c), RNN-01(d), RNC e), RNS-01 f), RNS-02 g), RNS-03 h), RNS-04 i), RNS-05 l).

I gradienti di velocità Vs sono stati definiti attraverso le numerose prove geofisiche svolte in sito. In dettaglio, gli orizzonti più superficiali (sino 20-35 m da p.c.) sono stati caratterizzati utilizzando i risultati delle prove sismiche dirette (SCPT-DH-CH) mentre, per le Vs in profondità, sono stati utilizzati i risultati delle analisi tramite inversione congiunta tra array sismico bidimensionale ed HVSR (per maggiori dettagli capitolo 5-6).

Per il Bedrock sismico si è assunto generalmente un valore di Damping pari a 0.5 %.

#### 10.1.4 Spettri di Risposta e Fattori di Amplificazione

Di seguito sono riportati risultati delle simulazioni RLS condotte in condizioni di *free field* con il software STRATA.

Per ciascuna verticale di calcolo nelle figure successive vengono visualizzati:

- i profili di accelerazione ( $A_g/g$ ) riferiti a ciascuno dei 7 segnali di input congiuntamente a quello medio (media aritmetica dei 3 segnali);
- la media degli spettri elastici di accelerazione con smorzamento al 5% (riferita ai 7 segnali di Input);
- lo spettro elastico di accelerazione medio di output (media aritmetica dei 7 segnali);
- la funzione di trasferimento;
- il profilo delle deformazioni di taglio massime.

Inoltre, in ossequio alle direttive approvate con 630/2019, come aggiornata dalla *DGR 476/2021 e successiva integrazione DGR 564/2021*, per ciascuna area di verifica sono state calcolate le relative “PGA” al suolo libero (media dei 7 segnali) ed i fattori di amplificazione e di intensità spettrale determinati sulla base di:

- $F_{PGA} = PGA/PGA0$  (ove  $PGA0 = a_{g_{bedrock}}$ )
- $FA = SA/SA0$ , ovvero rapporti spettrali in accelerazione fra i seguenti periodi T(s) di riferimento: SA1 per  $0,1s \leq T \leq 0,5s$ , SA2 per  $0,4s \leq T \leq 0,8s$ , SA3 per  $0,7s \leq T \leq 1,1s$ , SA4 per  $0,5s \leq T \leq 1,5s$ ;
- $FH = SI/SI0$ , ovvero rapporti spettrali in pseudovelocità (*Intensità di Housner*) fra i seguenti periodi T(s) di riferimento: SI1 per  $0,1s \leq T \leq 0,5s$ , SI2 per  $0,5s \leq T \leq 1,0s$ , SI3 per  $0,5s \leq T \leq 1,5s$ ;
- Parametro di scuotimento assoluto  $H_{SM}$  ( $cm/s^2$ ) (Naso et al., 2019), calcolato per l’intervallo di periodi  $0,1s \leq T \leq 0,5s$  ed  $H_{0408}$ ,  $H_{0711}$ ,  $H_{0515}$ , ovvero lo scuotimento in accelerazione ( $cm/s^2$ ) atteso al sito per gli intervalli di periodi  $0,4s \leq T \leq 0,8s$ ,  $0,7s \leq T \leq 1,1s$  e  $0,5s \leq T \leq 1,5s$ ;

i quali vengono sinteticamente riepilogati per ciascuna zona in coda ai relativi profili e spettri.

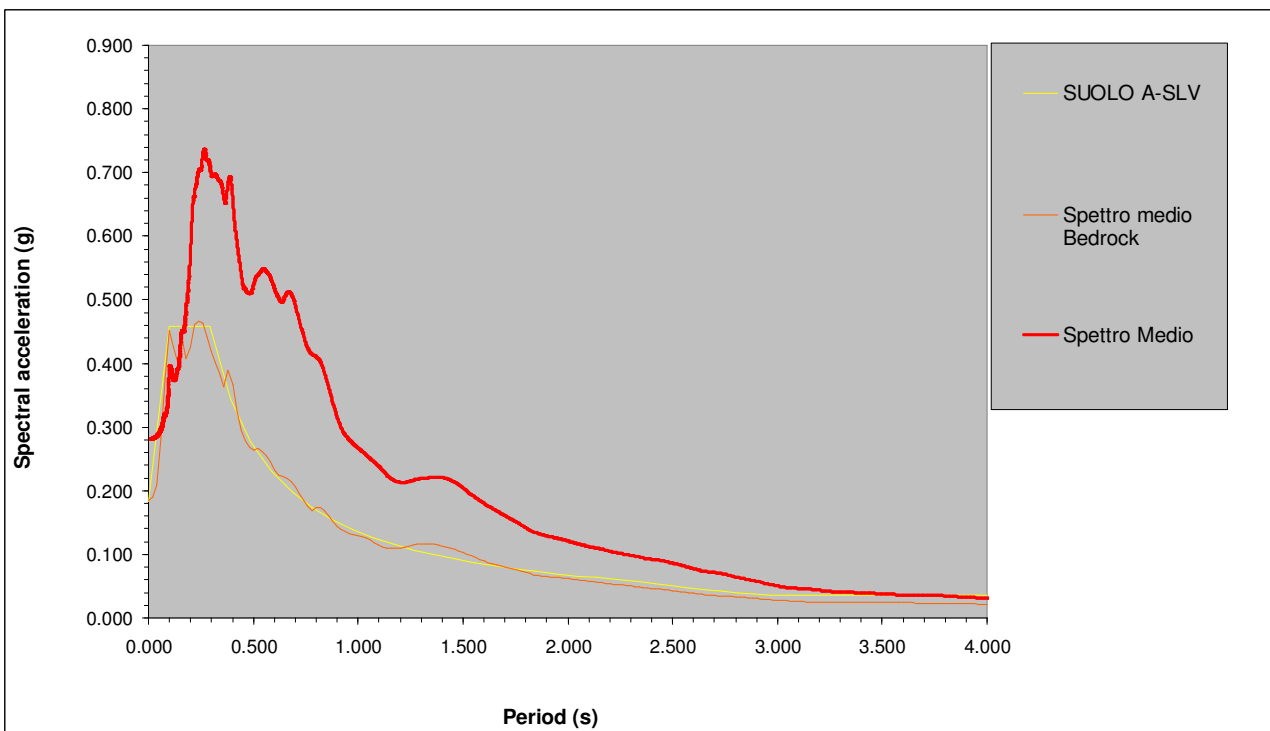
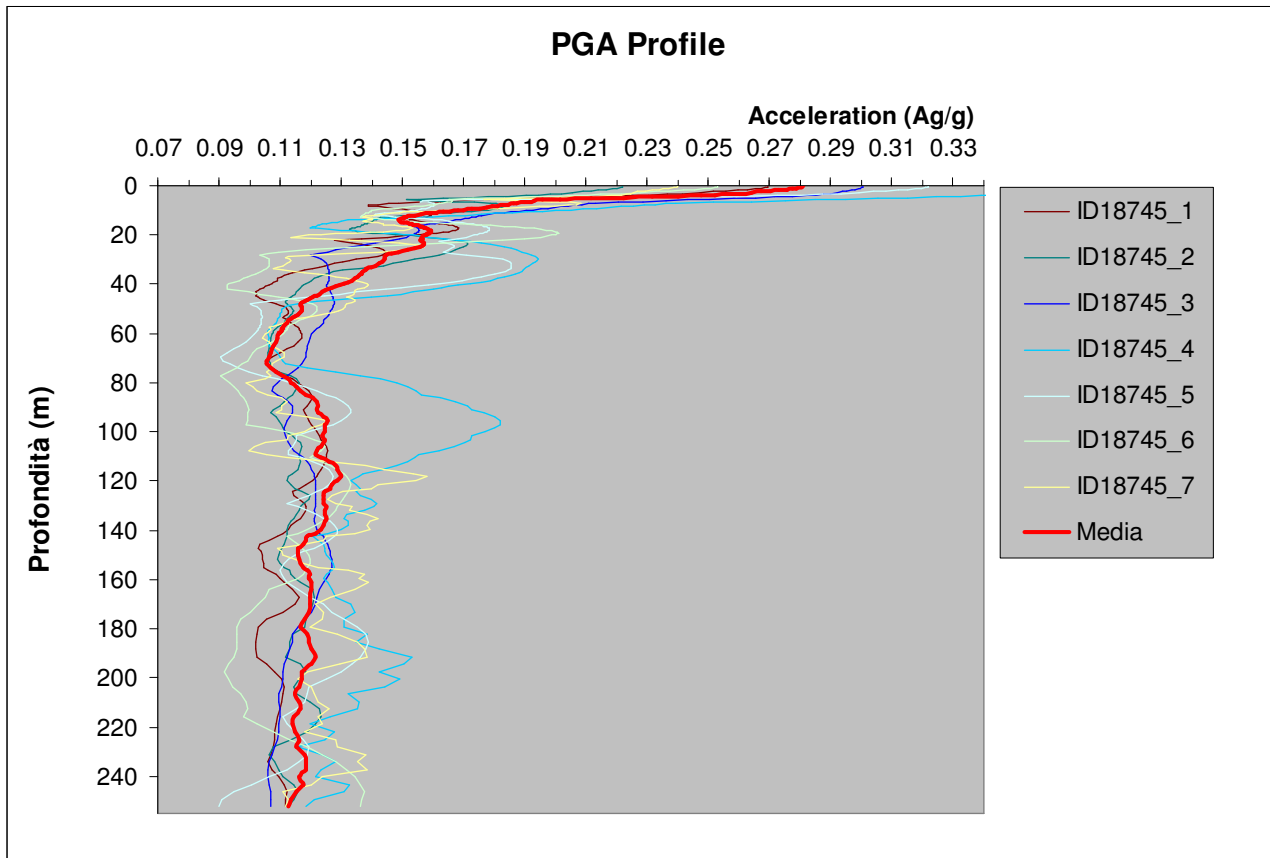
In coda a ciascuna verticale di verifica viene riportato anche il relativo valore di  $V_{SH}$  (nel caso specifico riferibile a  $V_{s30}$  in virtù della significativa profondità del bedrock sismico) onde consentire un eventuale confronto con i parametri tabellari proposti negli abachi regionali e/o delle ICMS.

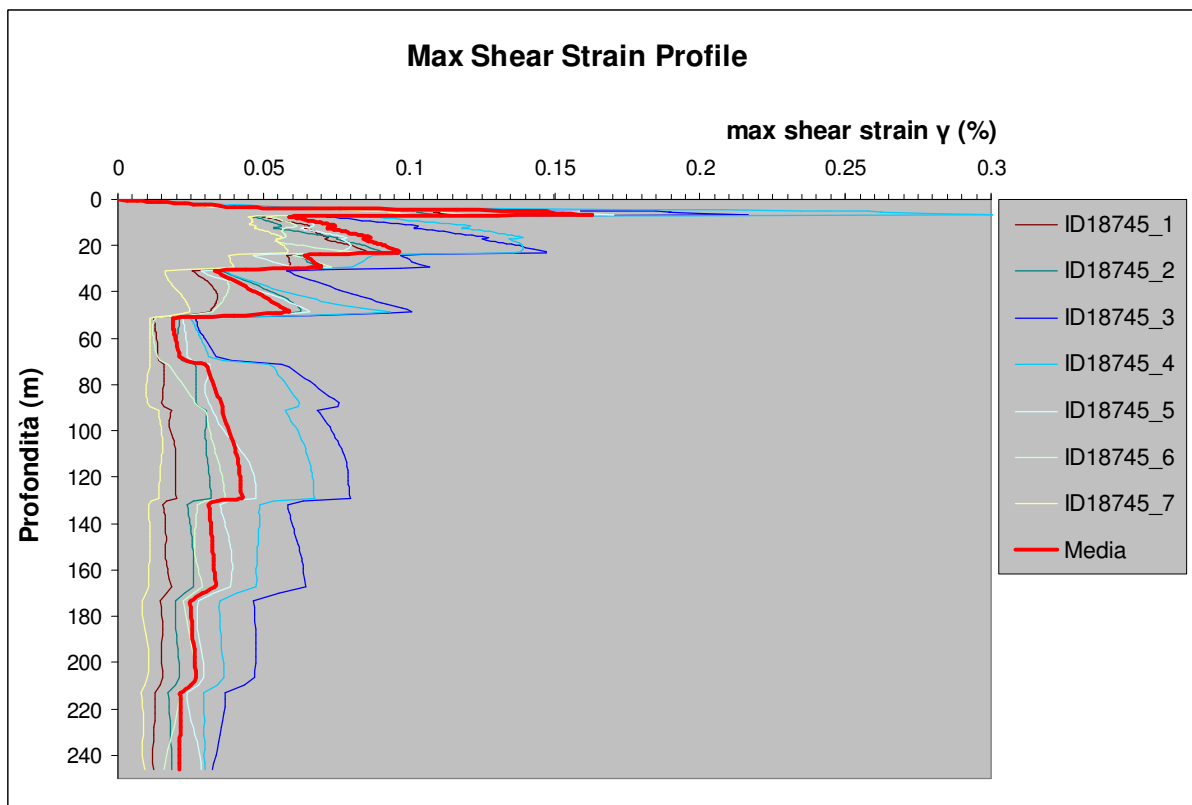
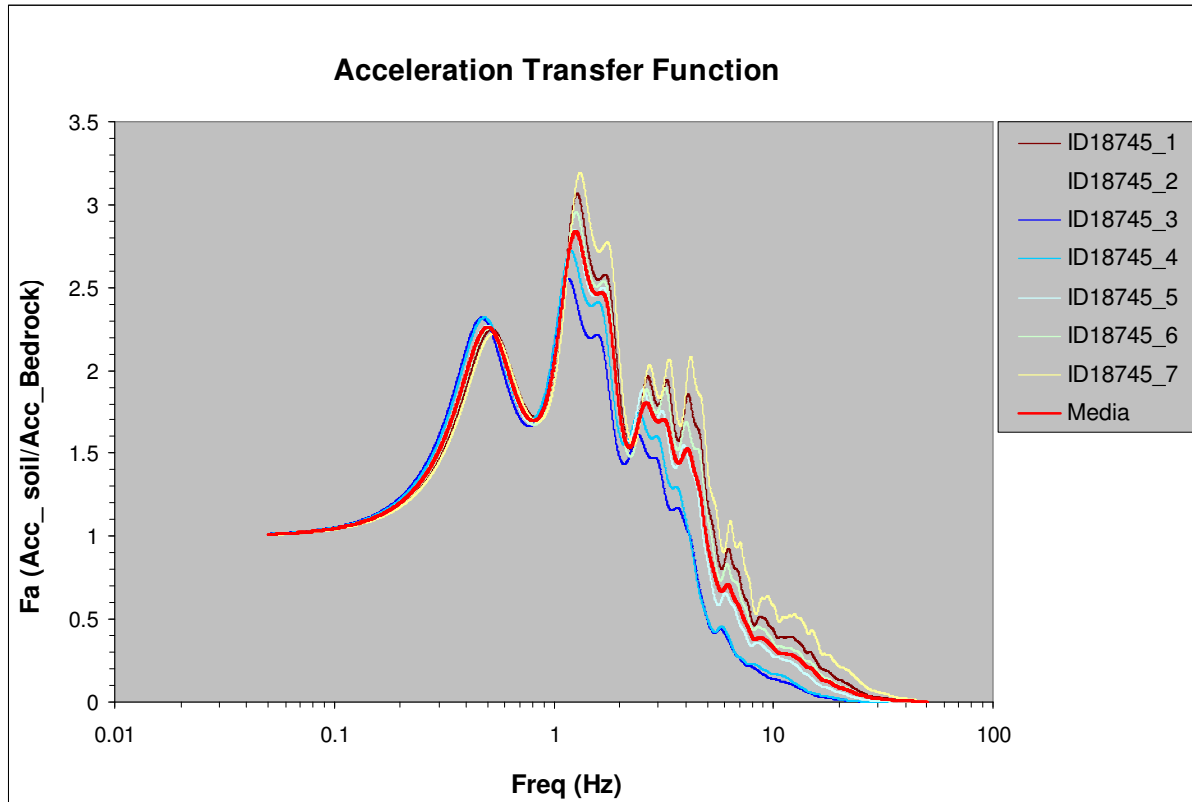
In allegato n. 4 vengono riportati i parametri di scuotimento desumibili per ciascun accelerogramma di output, mentre in allegato n. 5 vengono riportati i dati afferenti allo spettro elastico medio di output.

I dati numerici relativi ai singoli spettri vengono inoltre forniti nell’apposito database secondo le modalità definite negli standard di archiviazione dei dati.

Di seguito si riportano i dati di sintesi di ciascuna zona simicamente rappresentativa lungo costa, partendo da N a S:

## ZONA RNN\_04





**V<sub>sH</sub> (0-30)=193 (m/s)**

**PGA=0.281**

**F<sub>PGA</sub>=1.529**

**Fattori SA:**

		<b>Periodo(s)</b>	<b>Bedrock</b>		<b>Soil</b>		<b>FA</b>
INT SPETT.	<b>SA1</b>	<b>0.1-0.5</b>	0.163954		0.236425		<b>1.442</b>
INT SPETT.	<b>SA2</b>	<b>0.4-0.8</b>	0.102997		0.203486		<b>1.976</b>
INT SPETT.	<b>SA3</b>	<b>0.7-1.1</b>	0.064537		0.135347		<b>2.097</b>
INT SPETT.	<b>SA4</b>	<b>0.5-1.5</b>	0.157940		0.326703		<b>2.069</b>

**Fattori SI:**

		<b>Periodo(s)</b>	<b>Bedrock</b>		<b>Soil</b>		<b>FA</b>
INT SPETT.	<b>SI1</b>	<b>0.1-0.5</b>	7.003158		11.415441		<b>1.630</b>
INT SPETT.	<b>SI2</b>	<b>0.5-1.0</b>	11.043347		24.752059		<b>2.241</b>
INT SPETT.	<b>SI3</b>	<b>0.5-1.5</b>	22.057859		46.560792		<b>2.111</b>

**AS<sub>Ipu</sub>/ΔT=**            **404.950669**

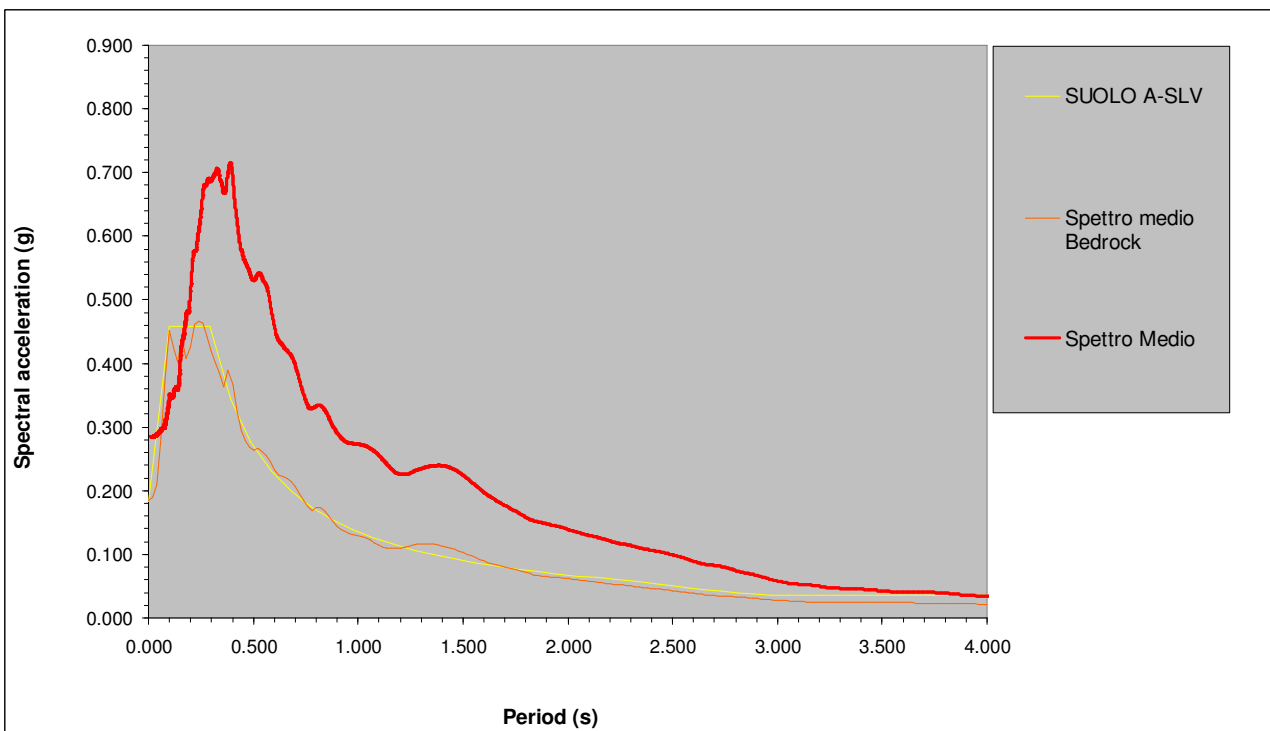
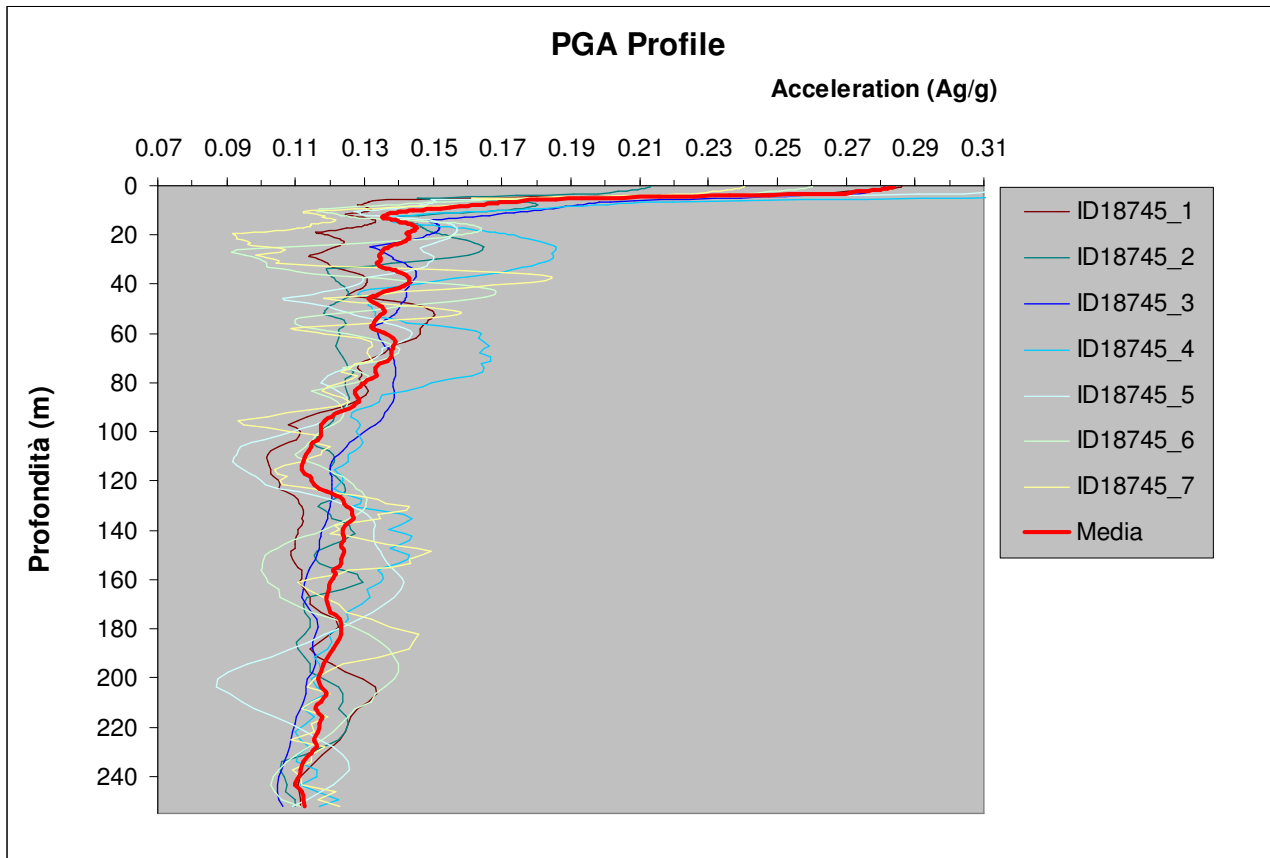
**H<sub>SM</sub>=**                    **583.947**

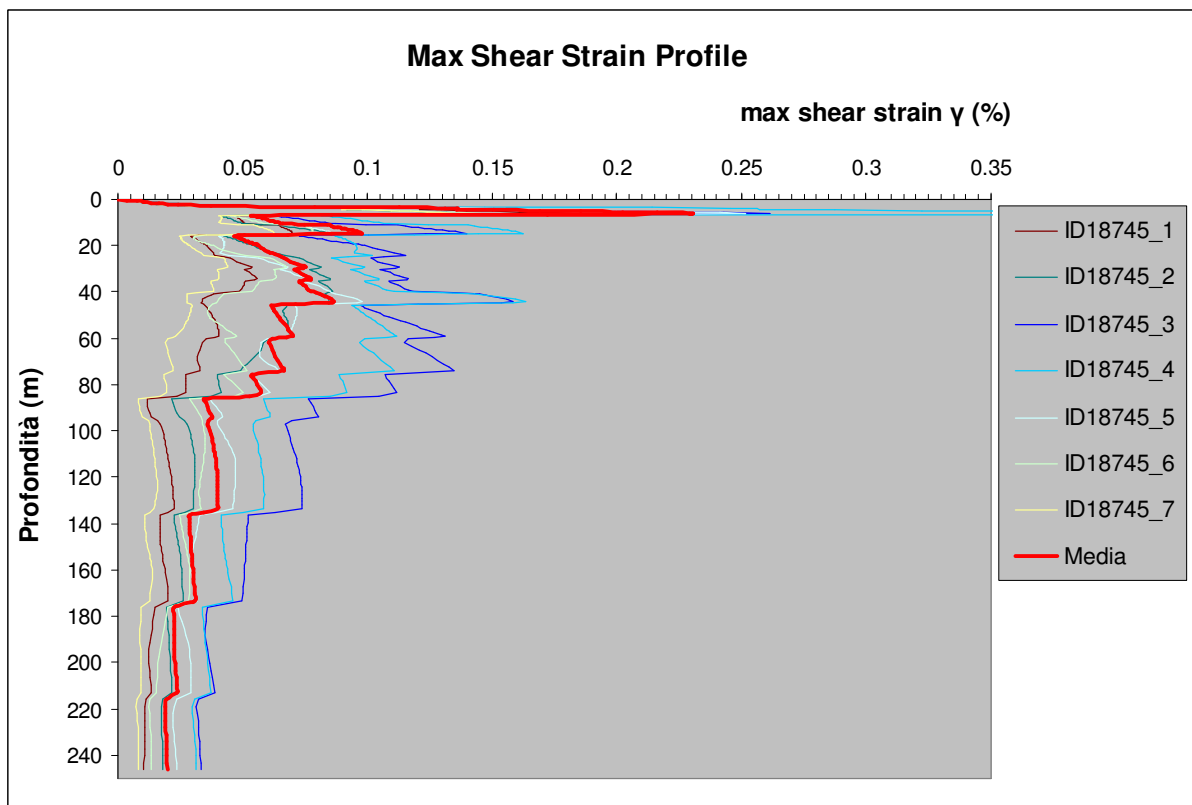
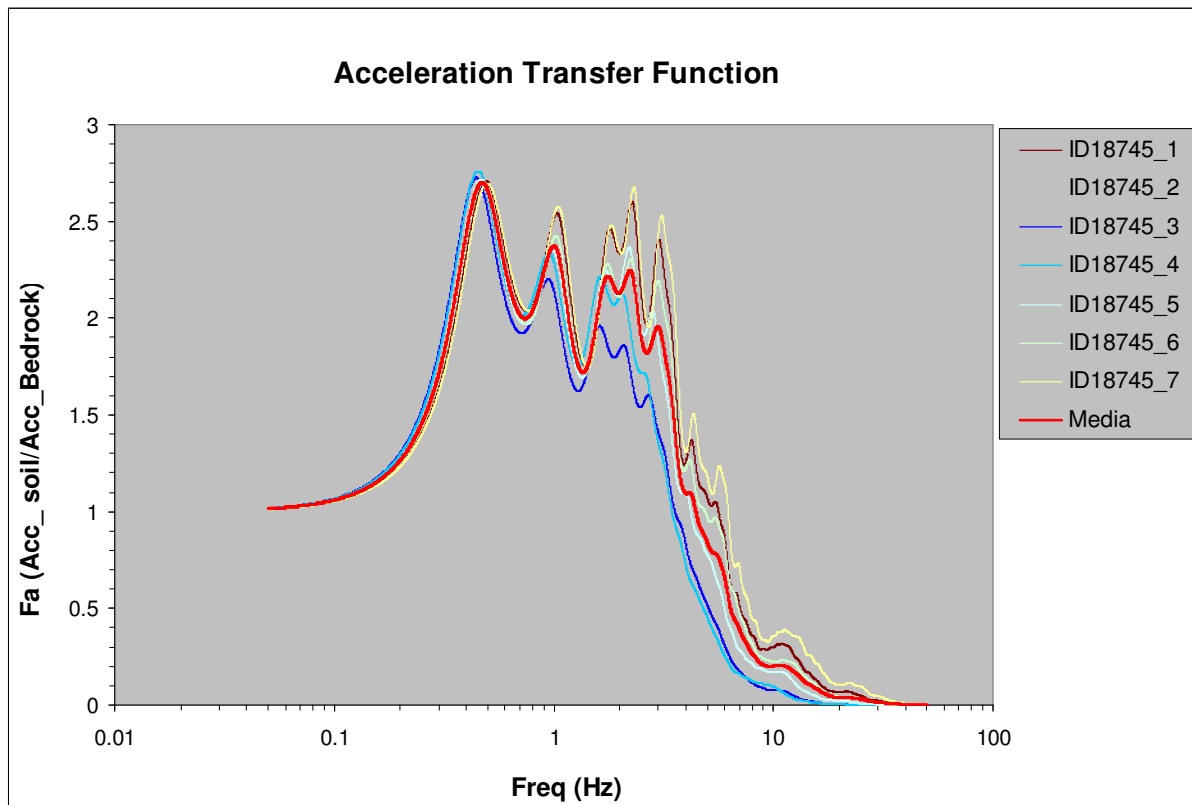
**H<sub>0408</sub>=**                 **498.880**

**H<sub>0711</sub>=**                 **331.824**

**H<sub>0515</sub>=**                 **320.386**

## ZONA RNN\_03





**VsH (0-30)=213 (m/s)**

**PGA=0.284**

**F<sub>PGA</sub>=1.546**

**Fattori SA:**

		<b>Periodo(s)</b>	<b>Bedrock</b>		<b>Soil</b>		<b>FA</b>
INT SPETT.	<b>SA1</b>	<b>0.1-0.5</b>	0.163954		0.231935		<b>1.415</b>
INT SPETT.	<b>SA2</b>	<b>0.4-0.8</b>	0.102997		0.187944		<b>1.825</b>
INT SPETT.	<b>SA3</b>	<b>0.7-1.1</b>	0.064537		0.121843		<b>1.888</b>
INT SPETT.	<b>SA4</b>	<b>0.5-1.5</b>	0.157940		0.309767		<b>1.961</b>

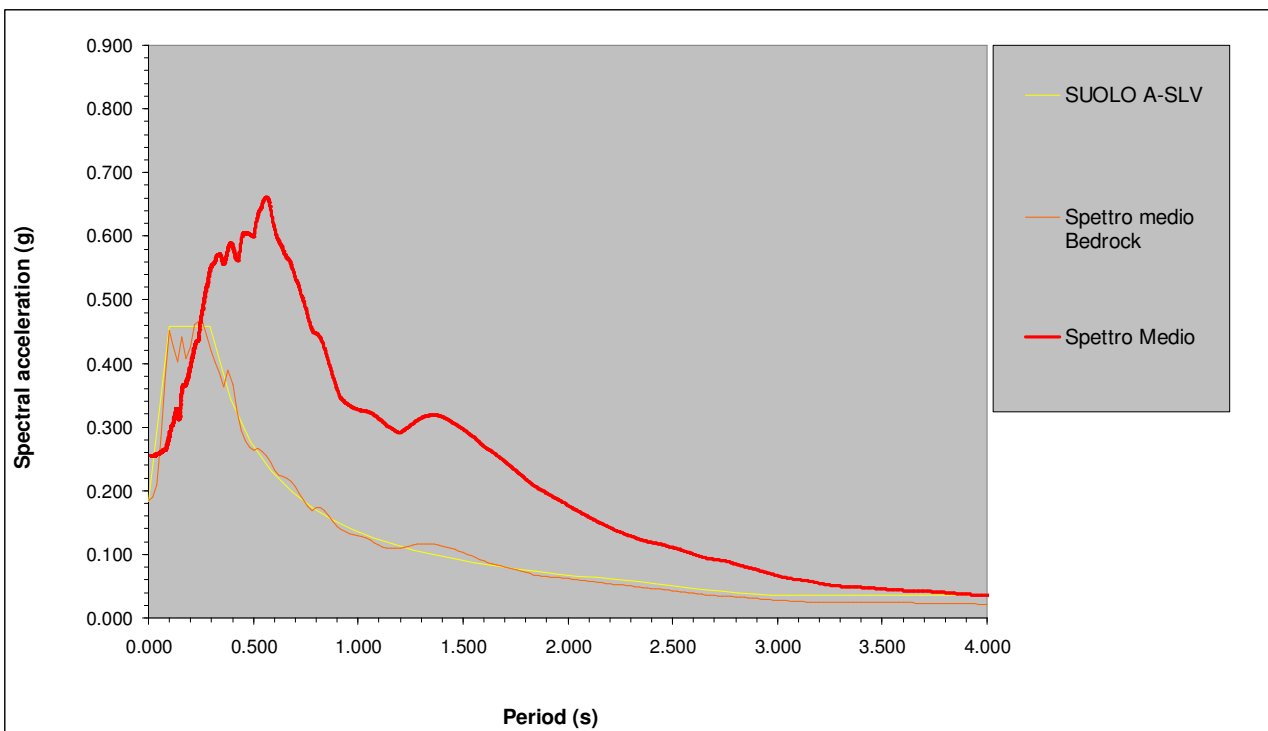
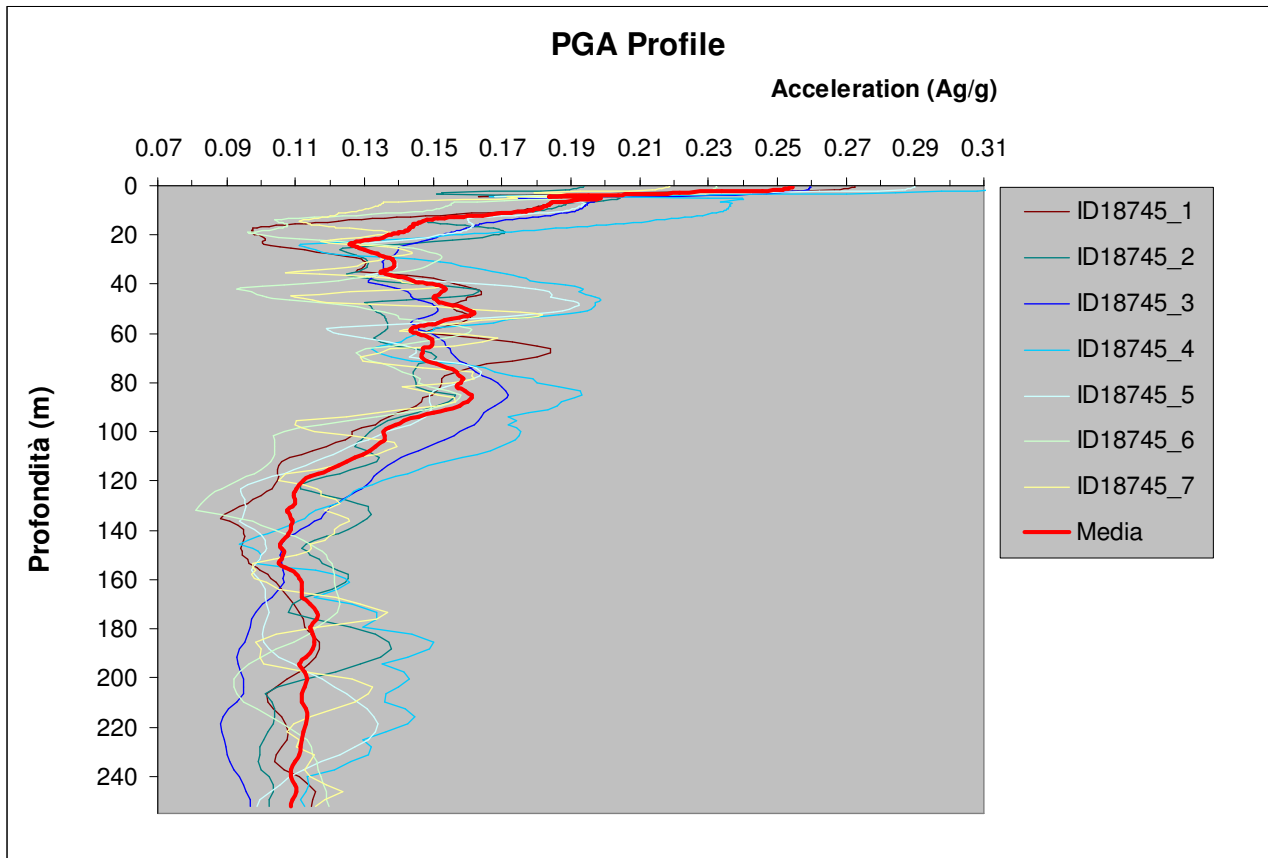
**Fattori SI:**

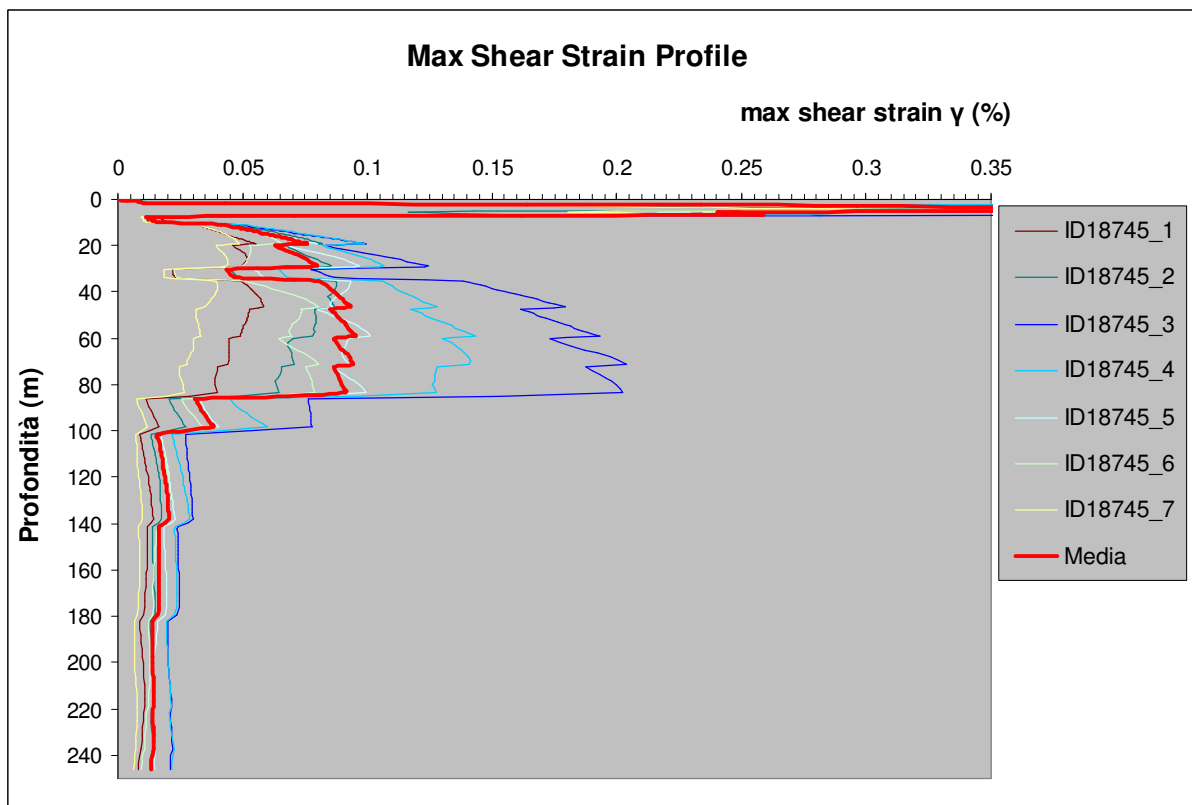
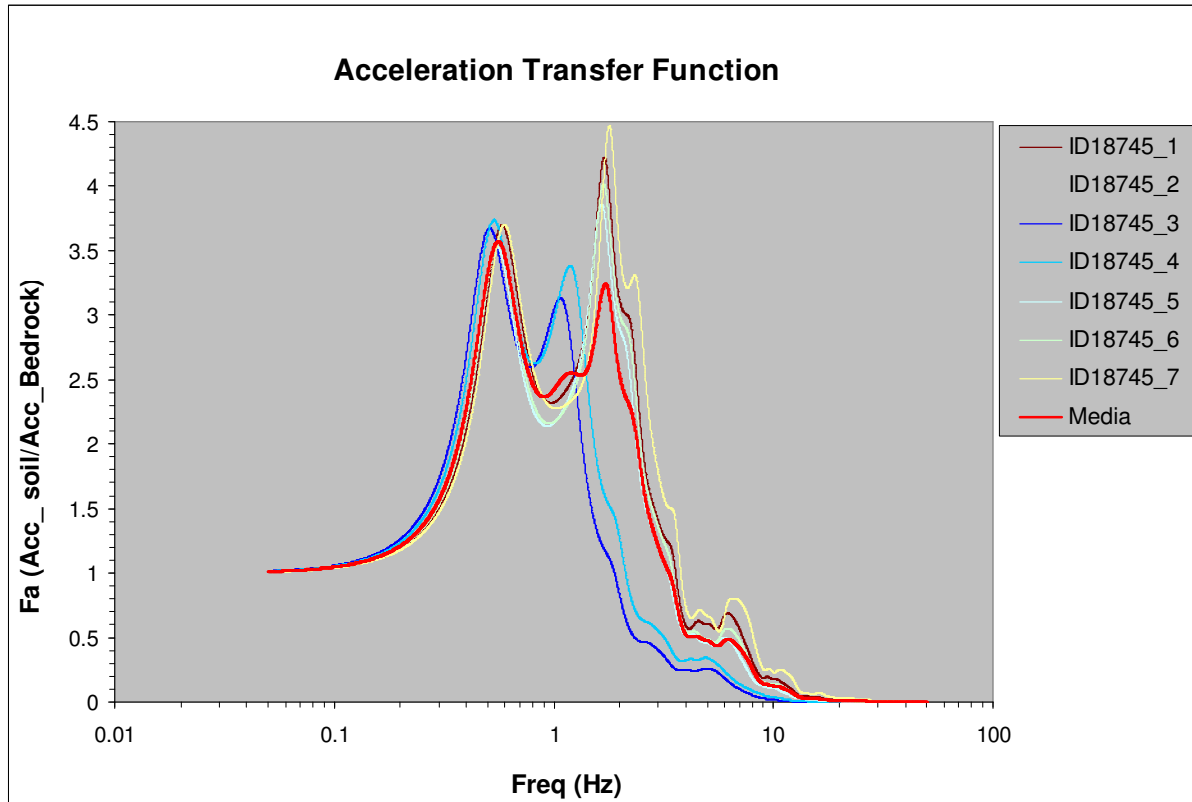
		<b>Periodo(s)</b>	<b>Bedrock</b>		<b>Soil</b>		<b>FA</b>
INT SPETT.	<b>SI1</b>	<b>0.1-0.5</b>	7.003158		11.404615		<b>1.628</b>
INT SPETT.	<b>SI2</b>	<b>0.5-1.0</b>	11.043347		21.945506		<b>1.987</b>
INT SPETT.	<b>SI3</b>	<b>0.5-1.5</b>	22.057859		45.340564		<b>2.056</b>

**AS<sub>lpu</sub>/ΔT=**            **404.950669**  
**H<sub>SM</sub>=**                    **572.857**  
**H<sub>0408</sub>=**                   **460.775**  
**H<sub>0711</sub>=**                   **298.718**  
**H<sub>0515</sub>=**                   **303.778**



## ZONA RNN\_02





**VsH (0-30)=193 (m/s)**

**PGA=0.255**

**F<sub>PGA</sub>=1.384**

**Fattori SA:**

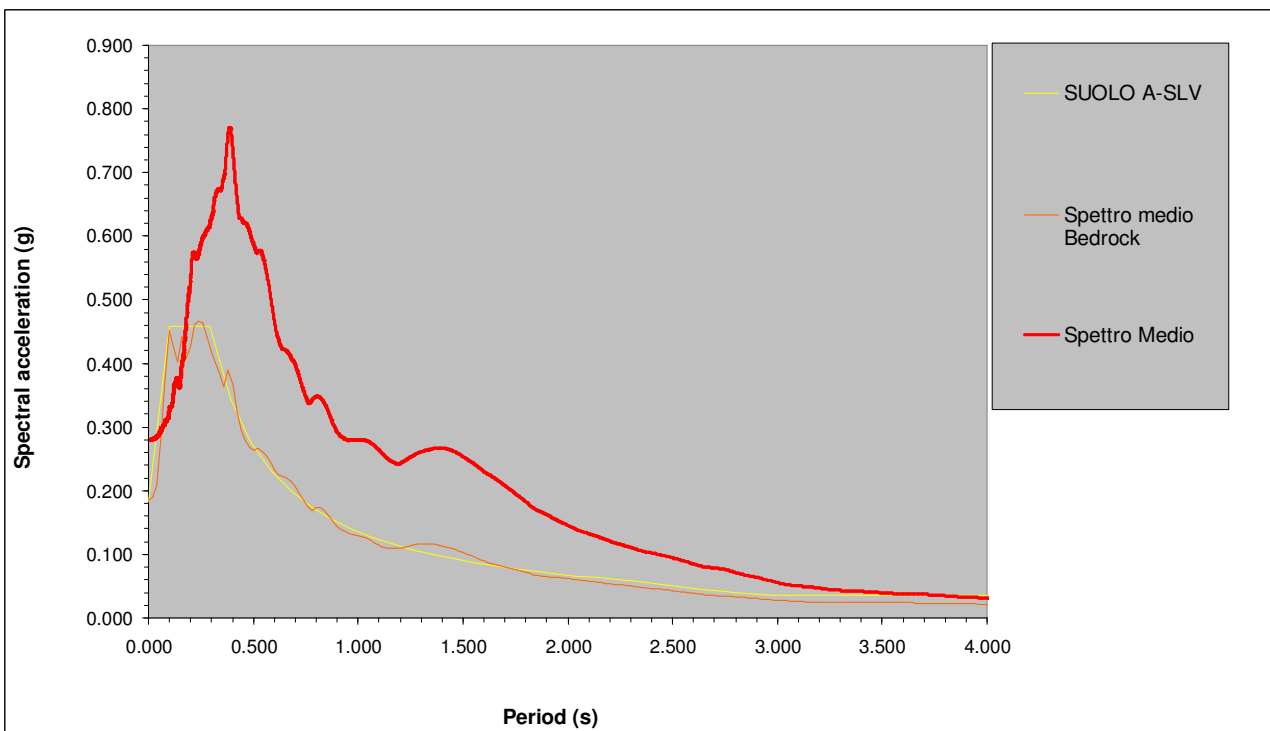
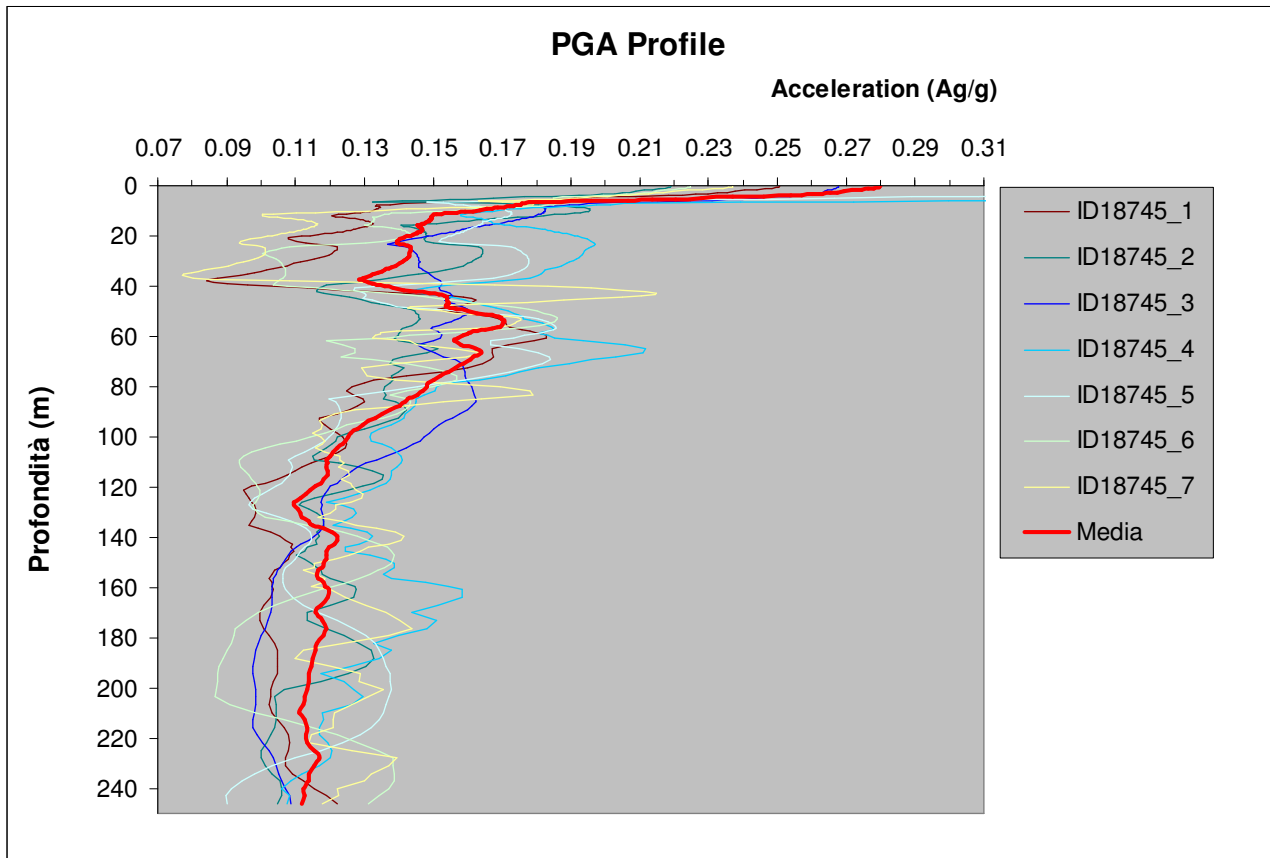
		Periodo(s)	Bedrock	Soil	FA
INT SPETT.	<b>SA1</b>	<b>0.1-0.5</b>	0.163954	0.197593	<b>1.205</b>
INT SPETT.	<b>SA2</b>	<b>0.4-0.8</b>	0.102997	0.229168	<b>2.225</b>
INT SPETT.	<b>SA3</b>	<b>0.7-1.1</b>	0.064537	0.156368	<b>2.423</b>
INT SPETT.	<b>SA4</b>	<b>0.5-1.5</b>	0.157940	0.400161	<b>2.534</b>

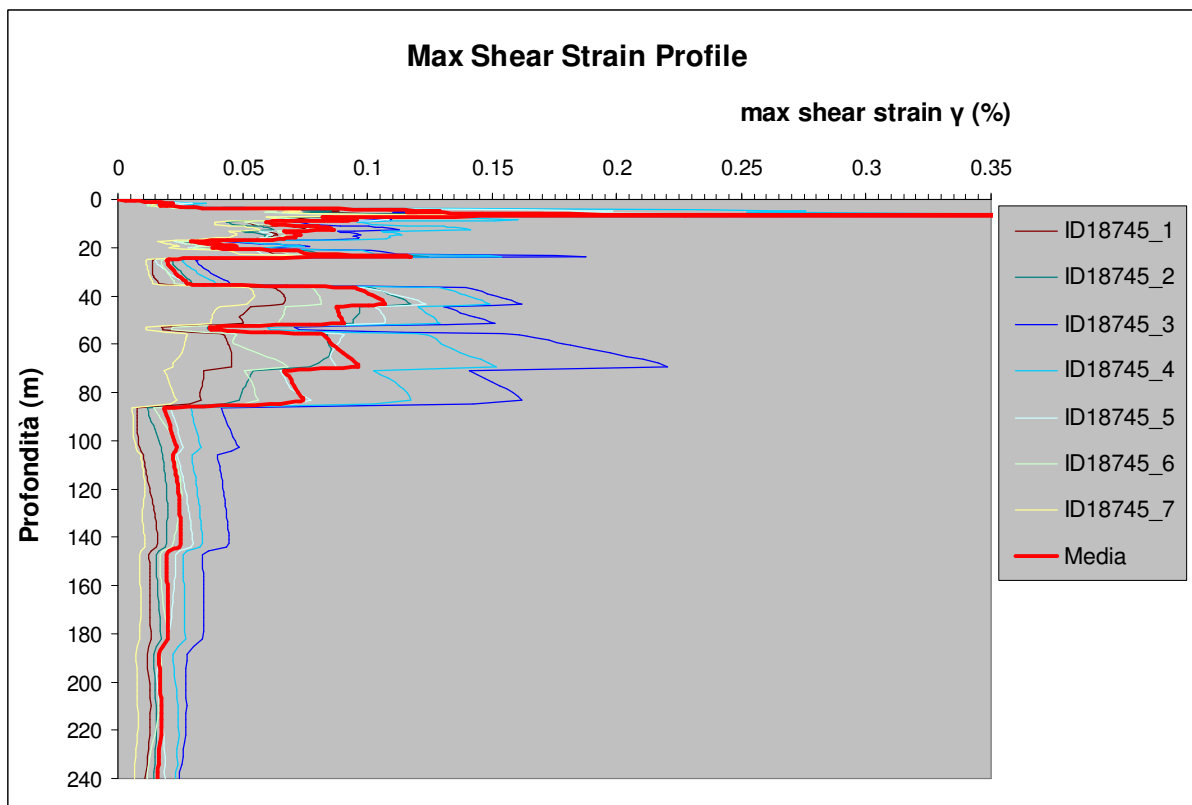
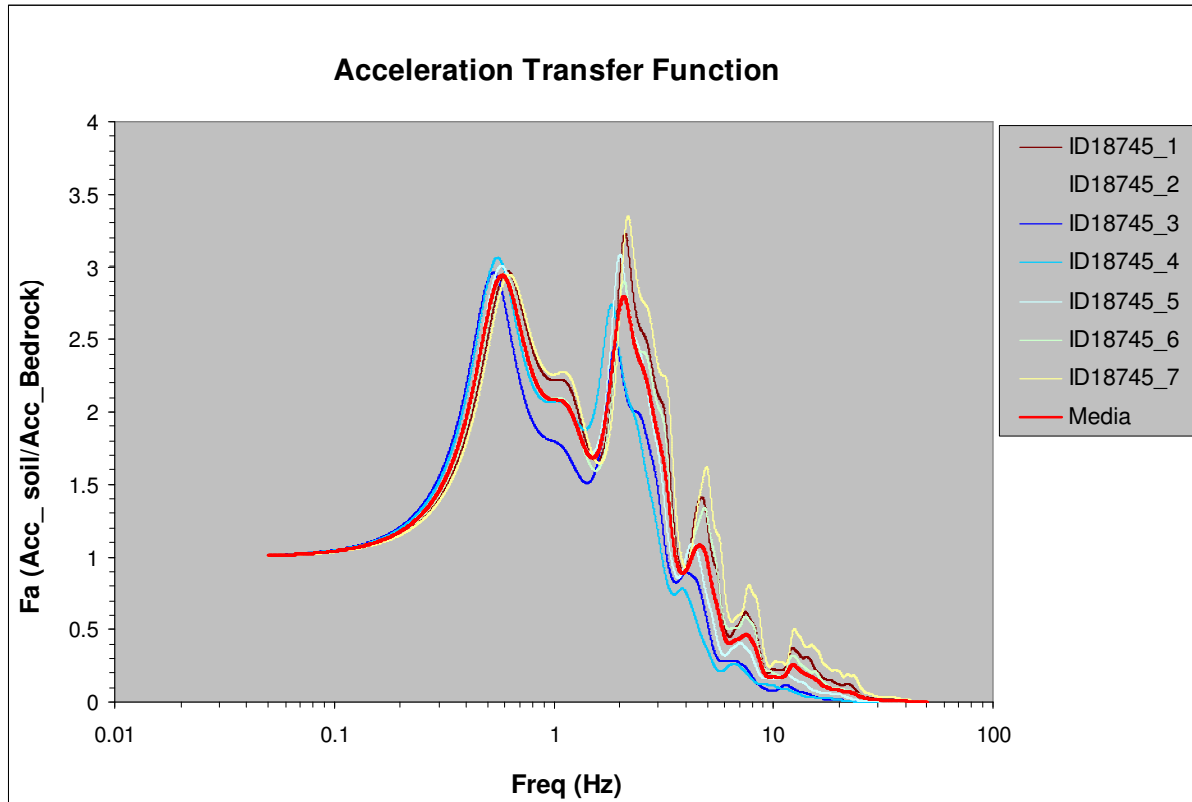
**Fattori SI:**

		Periodo(s)	Bedrock	Soil	FA
INT SPETT.	<b>SI1</b>	<b>0.1-0.5</b>	7.003158	10.016537	<b>1.430</b>
INT SPETT.	<b>SI2</b>	<b>0.5-1.0</b>	11.043347	28.295502	<b>2.562</b>
INT SPETT.	<b>SI3</b>	<b>0.5-1.5</b>	22.057859	58.502846	<b>2.652</b>

<b>ASl<sub>pu</sub>/ΔT=</b>	<b>404.950669</b>
<b>H<sub>SM</sub>=</b>	<b>488.036</b>
<b>H<sub>0408</sub>=</b>	<b>561.844</b>
<b>H<sub>0711</sub>=</b>	<b>383.362</b>
<b>H<sub>0515</sub>=</b>	<b>392.424</b>

## ZONA RNN\_01





**V<sub>sH</sub> (0-30)=229 (m/s)**

**PGA=0.280**

**F<sub>PGA</sub>=1.524**

**Fattori SA:**

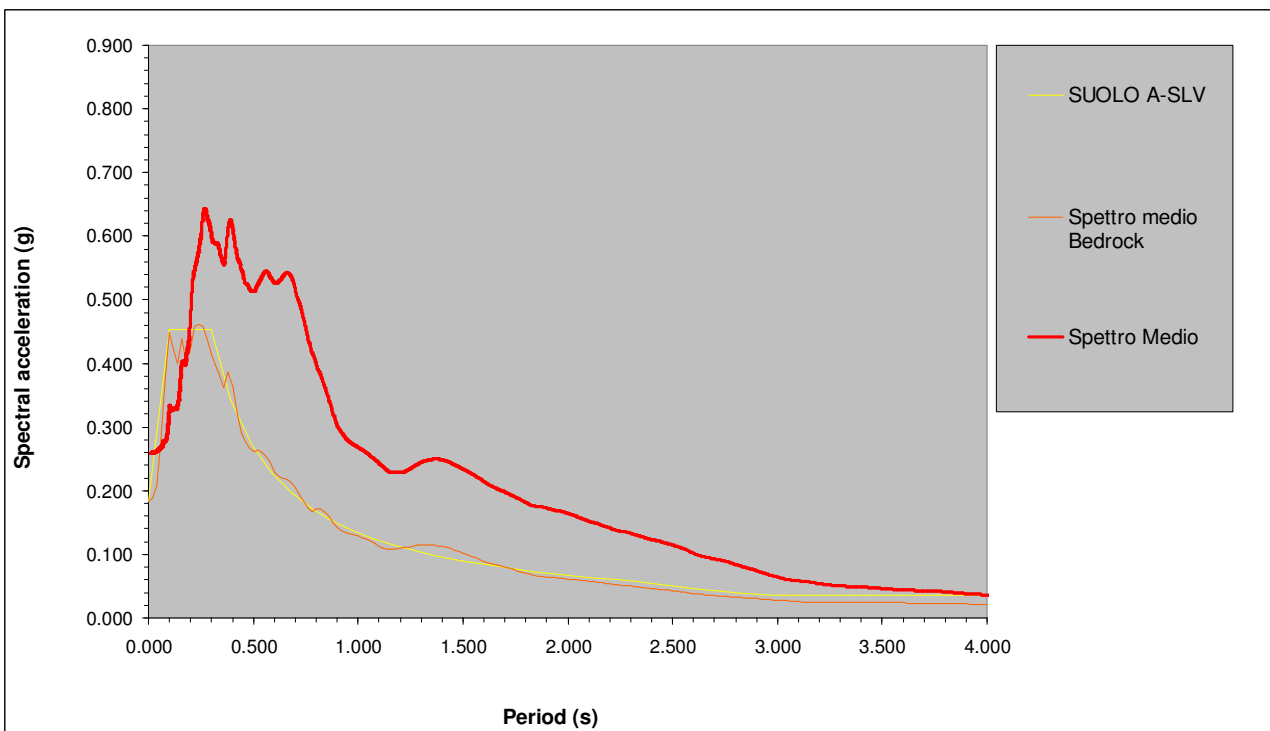
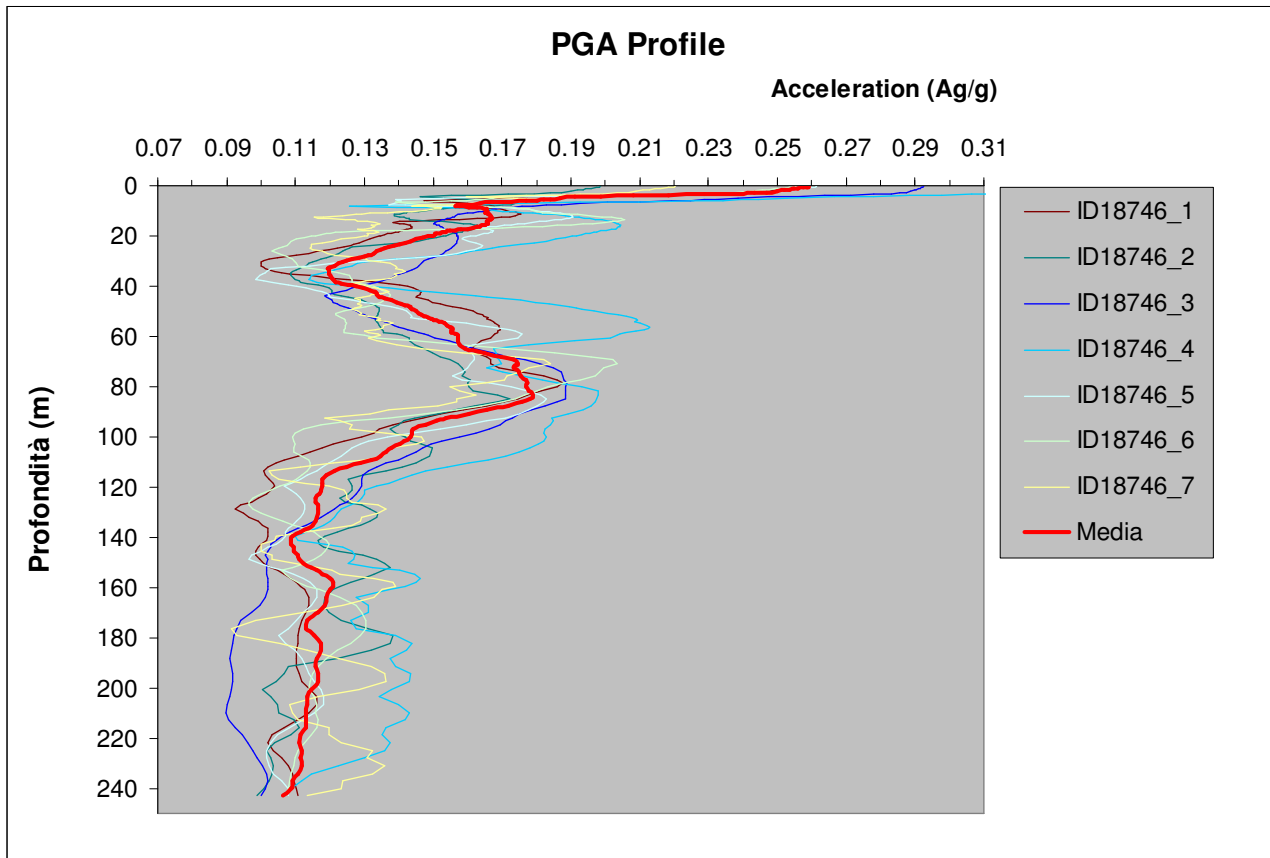
		Periodo(s)	Bedrock	Soil	FA
INT SPETT.	<b>SA1</b>	<b>0.1-0.5</b>	0.163954	0.232936	<b>1.421</b>
INT SPETT.	<b>SA2</b>	<b>0.4-0.8</b>	0.102997	0.196660	<b>1.909</b>
INT SPETT.	<b>SA3</b>	<b>0.7-1.1</b>	0.064537	0.124661	<b>1.932</b>
INT SPETT.	<b>SA4</b>	<b>0.5-1.5</b>	0.157940	0.324482	<b>2.054</b>

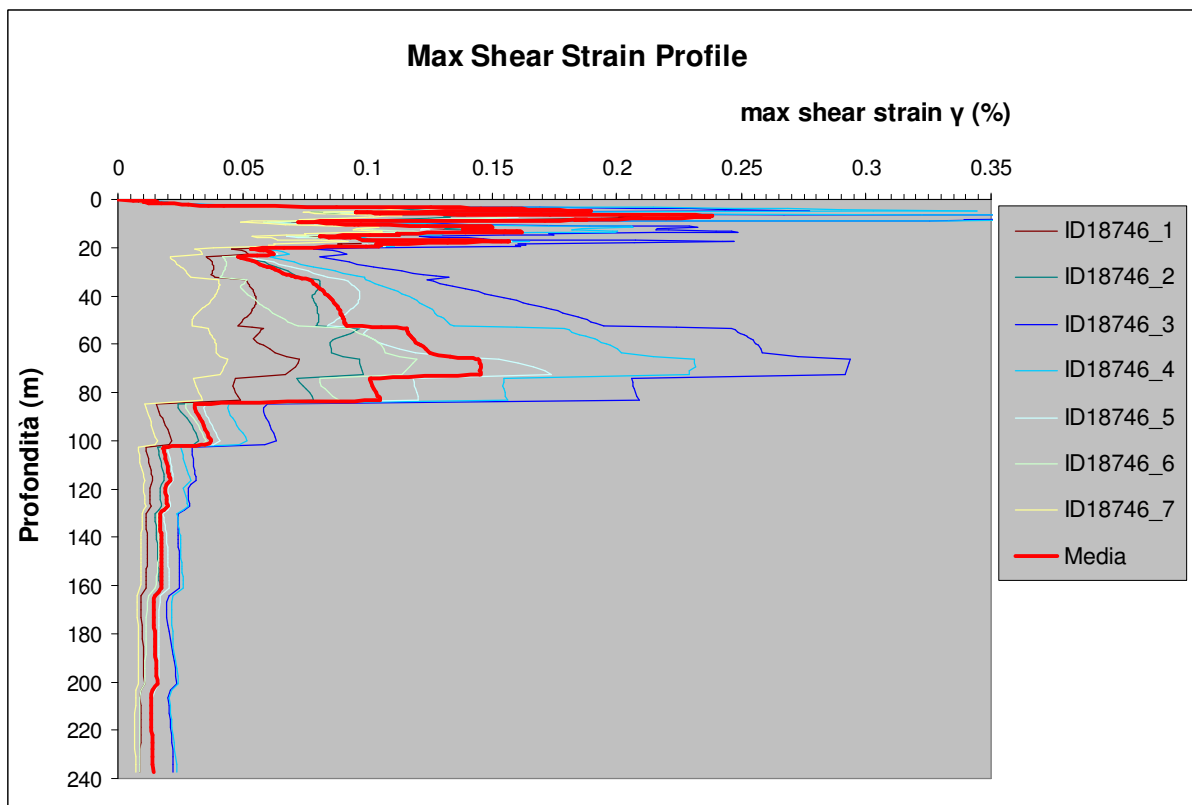
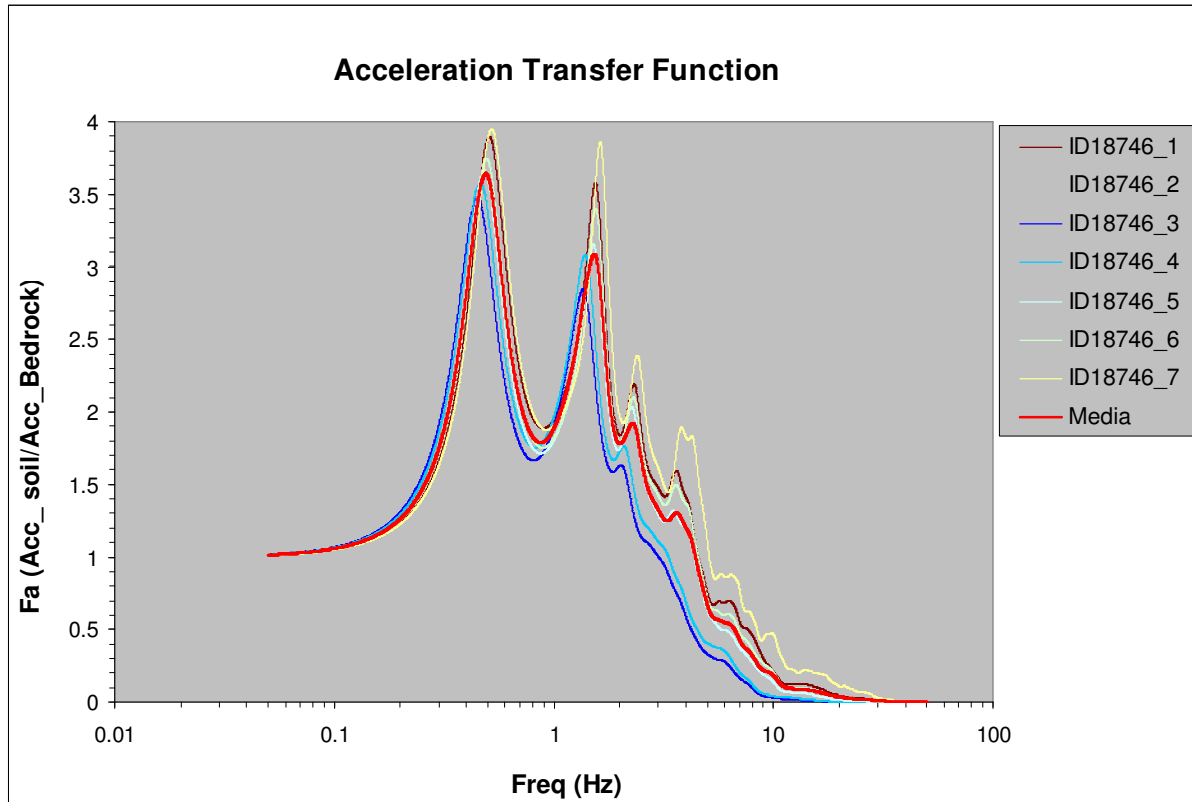
**Fattori SI:**

		Periodo(s)	Bedrock	Soil	FA
INT SPETT.	<b>SI1</b>	<b>0.1-0.5</b>	7.003158	11.634198	<b>1.661</b>
INT SPETT.	<b>SI2</b>	<b>0.5-1.0</b>	11.043347	22.520730	<b>2.039</b>
INT SPETT.	<b>SI3</b>	<b>0.5-1.5</b>	22.057859	47.940286	<b>2.173</b>

**ASl<sub>pu</sub>/ΔT=** 404.950669  
**H<sub>SM</sub>=** 575.330  
**H<sub>0408</sub>=** 482.143  
**H<sub>0711</sub>=** 305.627  
**H<sub>0515</sub>=** 318.209

## ZONA RNC





**VsH (0-30)=177 (m/s)**

**PGA=0.259**

**F<sub>PGA</sub>=1.416**



**Fattori SA:**

		Periodo(s)	Bedrock	Soil	FA
INT SPETT.	<b>SA1</b>	<b>0.1-0.5</b>	0.162582	0.209880	<b>1.291</b>
INT SPETT.	<b>SA2</b>	<b>0.4-0.8</b>	0.102135	0.207056	<b>2.027</b>
INT SPETT.	<b>SA3</b>	<b>0.7-1.1</b>	0.063997	0.135249	<b>2.113</b>
INT SPETT.	<b>SA4</b>	<b>0.5-1.5</b>	0.156617	0.337442	<b>2.155</b>

**Fattori SI:**

		Periodo(s)	Bedrock	Soil	FA
INT SPETT.	<b>SI1</b>	<b>0.1-0.5</b>	6.944532	10.299370	<b>1.483</b>
INT SPETT.	<b>SI2</b>	<b>0.5-1.0</b>	10.950898	24.899033	<b>2.274</b>
INT SPETT.	<b>SI3</b>	<b>0.5-1.5</b>	21.873204	48.559624	<b>2.220</b>

**ASl<sub>pu</sub>/ΔT=** 401.835994

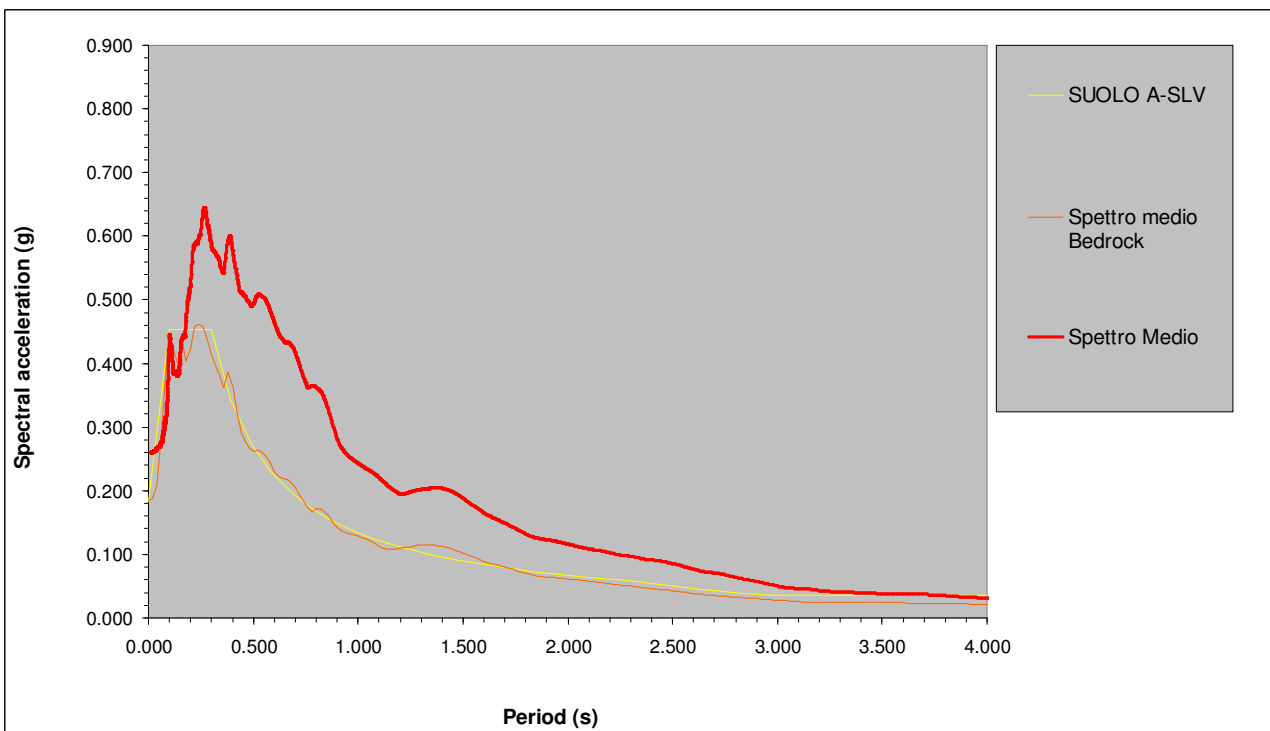
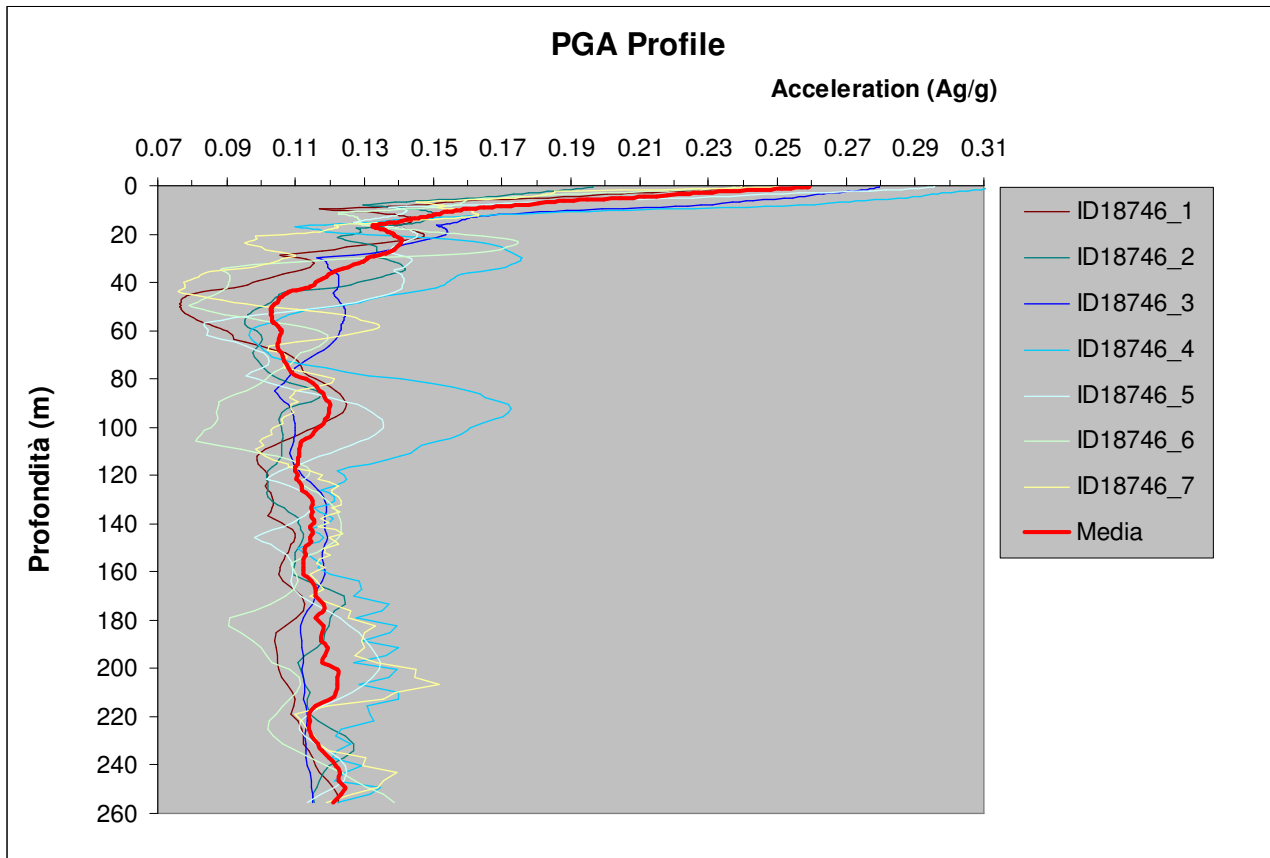
**H<sub>SM</sub>=** 518.738

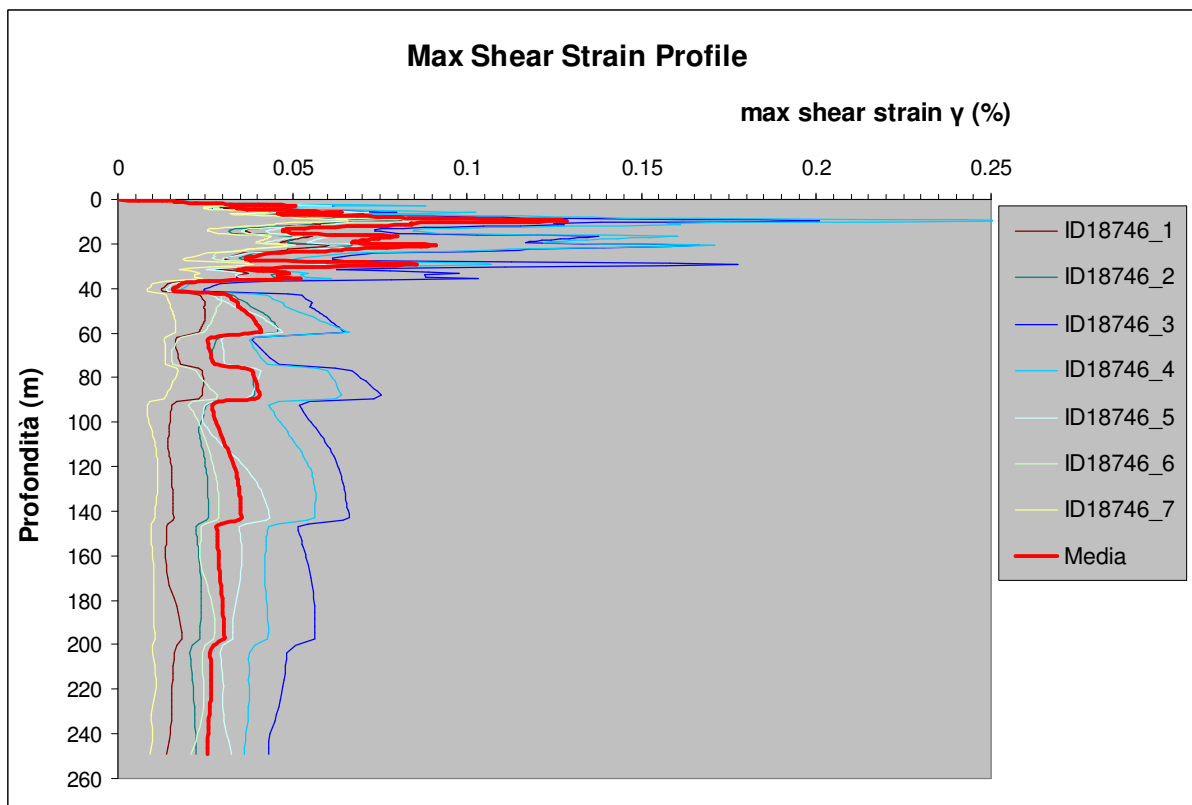
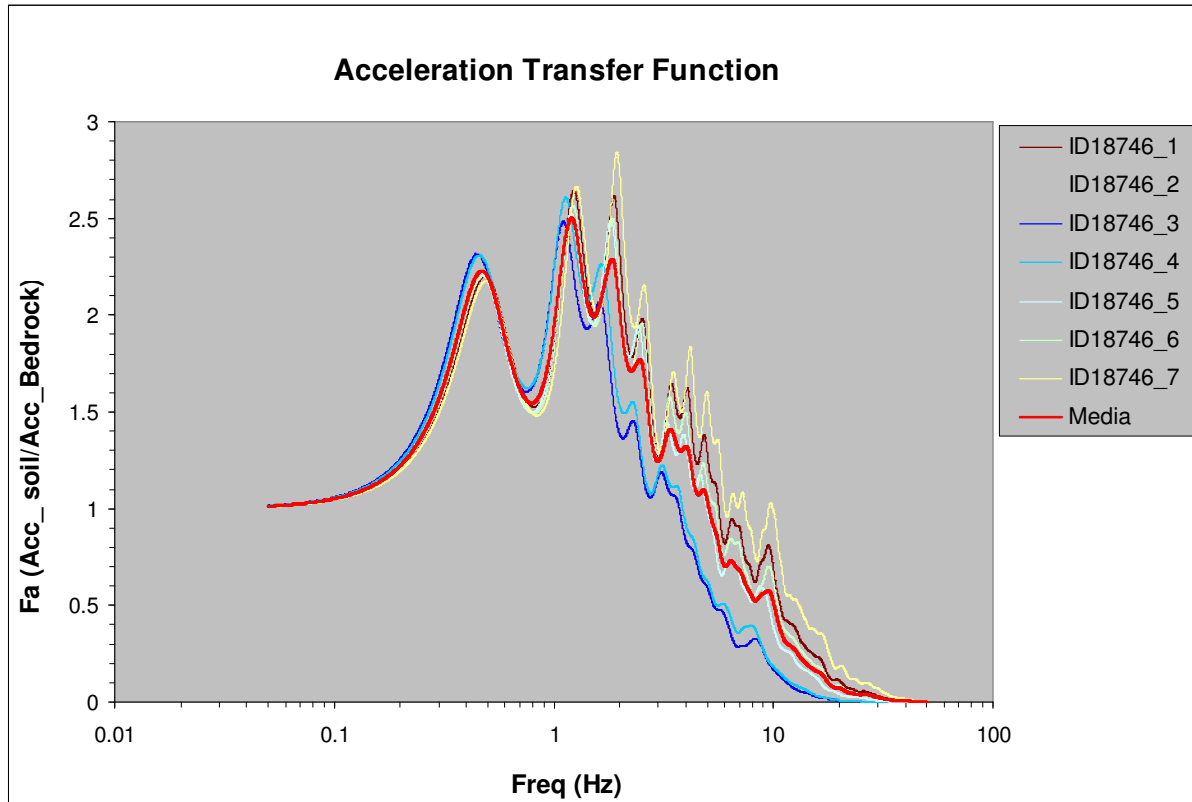
**H<sub>0408</sub>=** 507.631

**H<sub>0711</sub>=** 331.584

**H<sub>0515</sub>=** 330.917

## ZONA RNS\_01





**V<sub>sH</sub> (0-30)=227 (m/s)**

**PGA=0.260**

**F<sub>PGA</sub>=1.421**

**Fattori SA:**

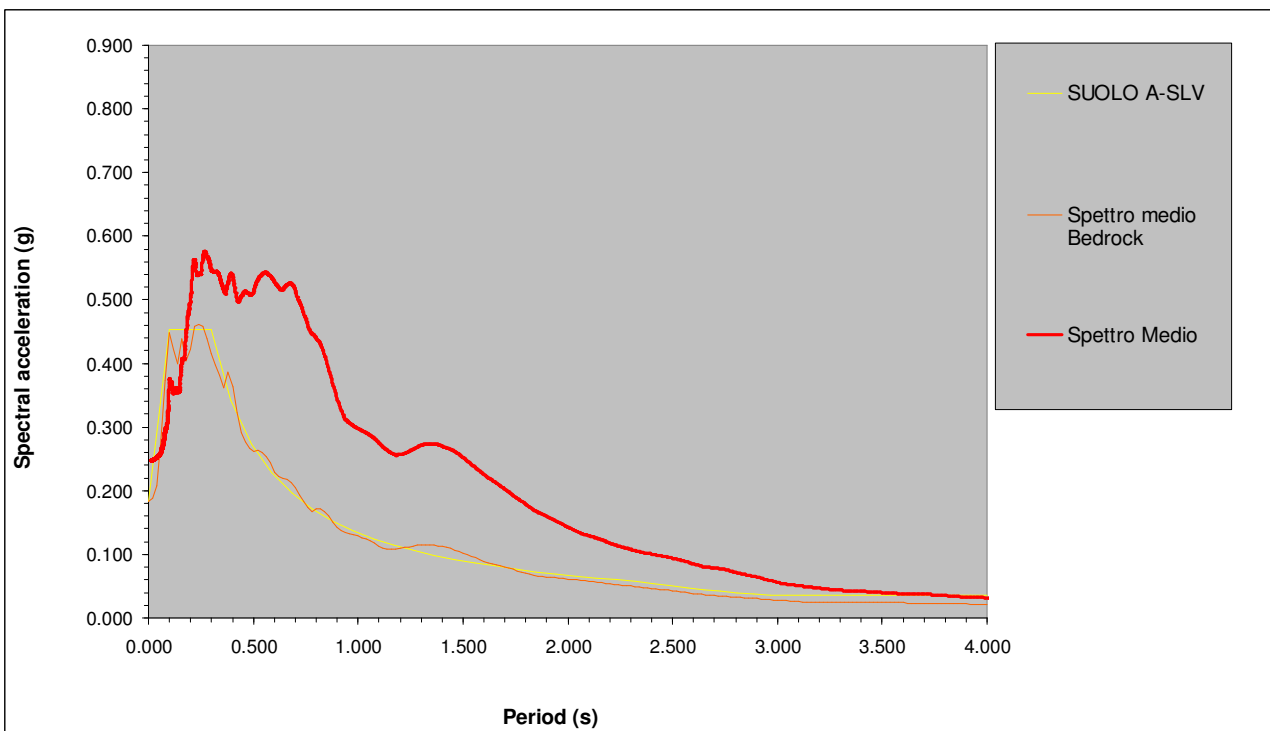
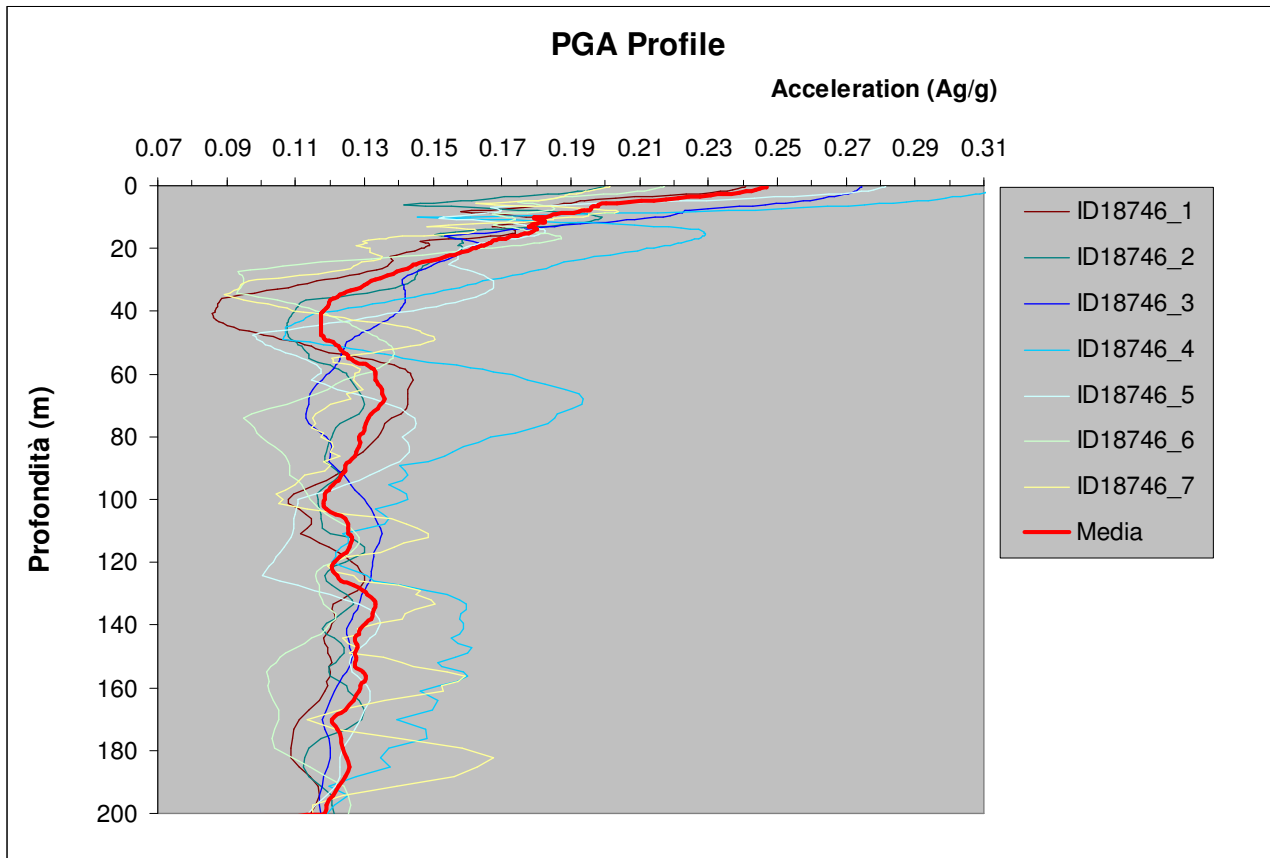
		Periodo(s)	Bedrock	Soil	FA
INT SPETT.	<b>SA1</b>	<b>0.1-0.5</b>	0.162582	0.212364	<b>1.306</b>
INT SPETT.	<b>SA2</b>	<b>0.4-0.8</b>	0.102135	0.182999	<b>1.792</b>
INT SPETT.	<b>SA3</b>	<b>0.7-1.1</b>	0.063997	0.120375	<b>1.881</b>
INT SPETT.	<b>SA4</b>	<b>0.5-1.5</b>	0.156617	0.293923	<b>1.877</b>

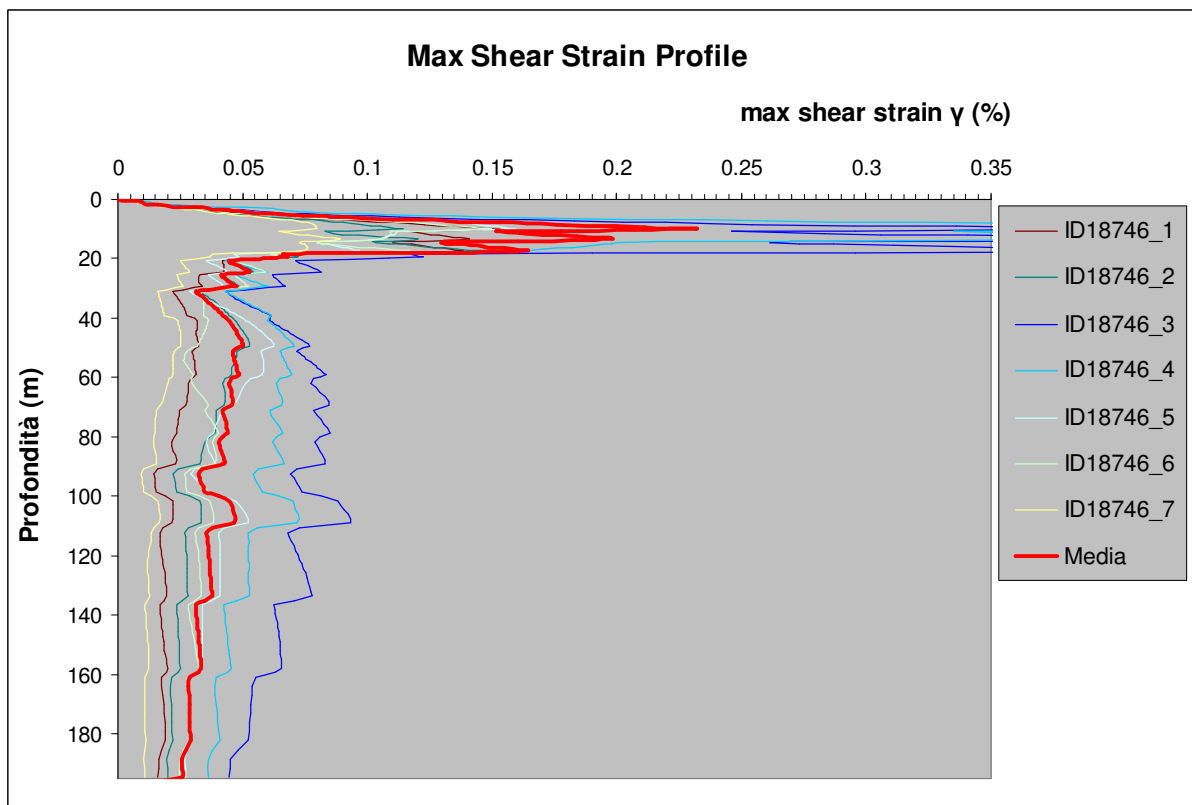
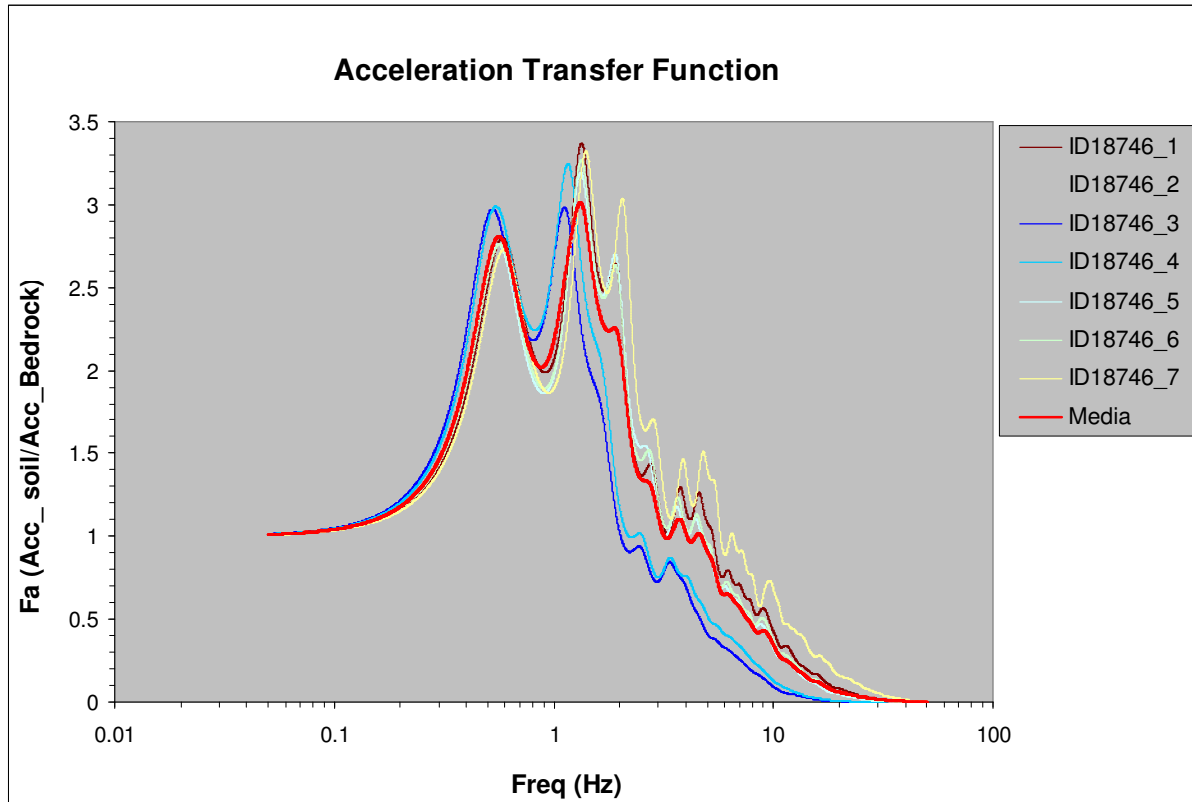
**Fattori SI:**

		Periodo(s)	Bedrock	Soil	FA
INT SPETT.	<b>SI1</b>	<b>0.1-0.5</b>	6.944532	10.204992	<b>1.470</b>
INT SPETT.	<b>SI2</b>	<b>0.5-1.0</b>	10.950898	22.003084	<b>2.009</b>
INT SPETT.	<b>SI3</b>	<b>0.5-1.5</b>	21.873204	42.112490	<b>1.925</b>

<b>ASl<sub>pu</sub>/ΔT=</b>	<b>401.835994</b>
<b>H<sub>SM</sub>=</b>	<b>524.878</b>
<b>H<sub>0408</sub>=</b>	<b>448.653</b>
<b>H<sub>0711</sub>=</b>	<b>295.119</b>
<b>H<sub>0515</sub>=</b>	<b>288.240</b>

## ZONA RNS\_02





**V<sub>sH</sub> (0-30)=209 (m/s)**

**PGA=0.247**

**F<sub>PGA</sub>=1.352**

**Fattori SA:**

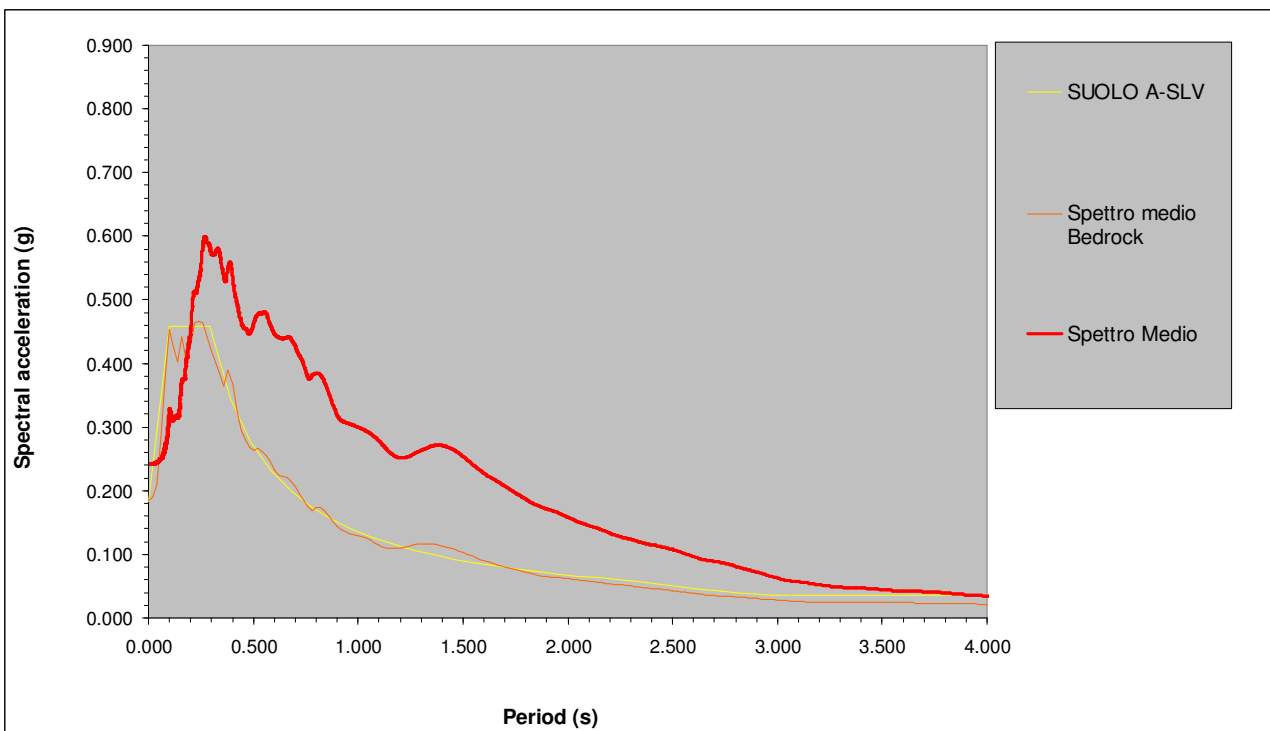
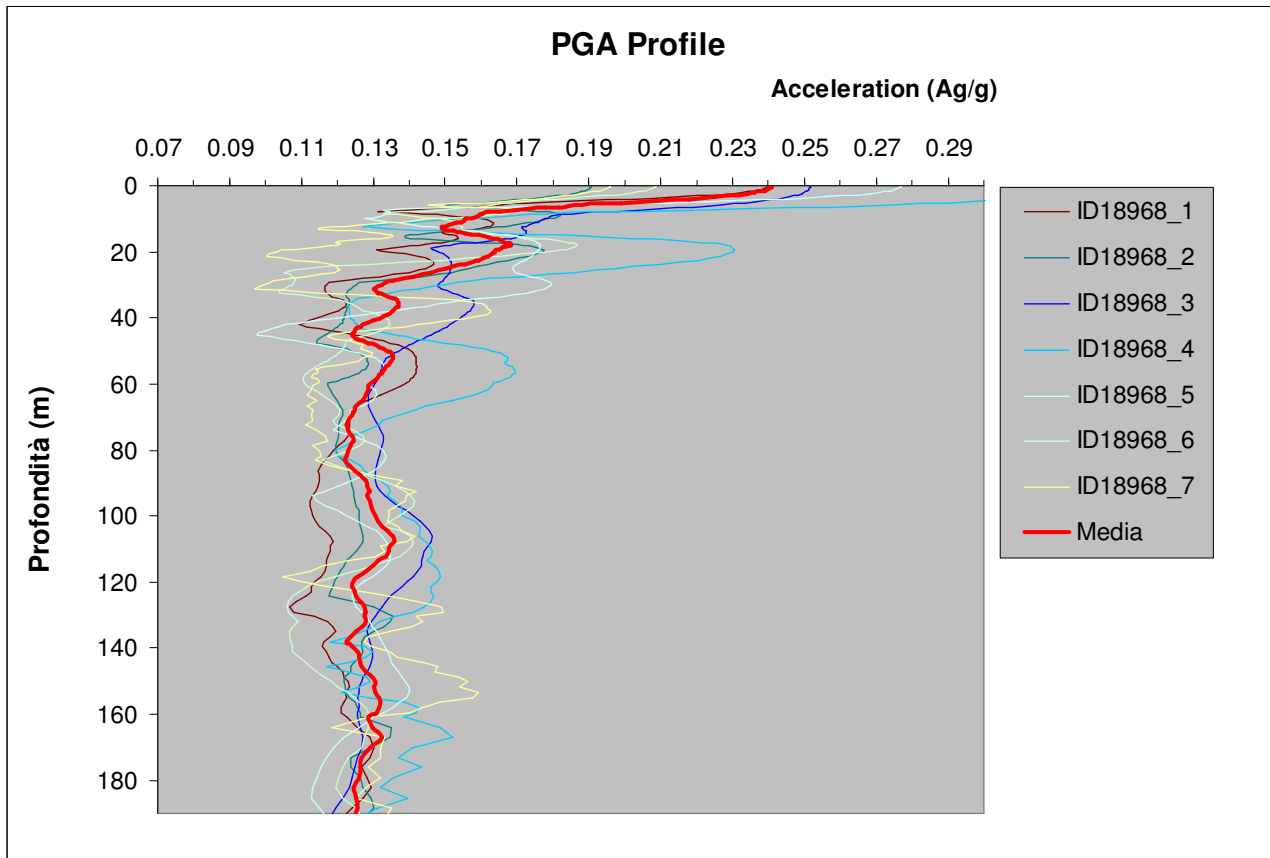
		Periodo(s)	Bedrock	Soil	FA
INT SPETT.	<b>SA1</b>	<b>0.1-0.5</b>	0.162582	0.199557	<b>1.227</b>
INT SPETT.	<b>SA2</b>	<b>0.4-0.8</b>	0.102135	0.204044	<b>1.998</b>
INT SPETT.	<b>SA3</b>	<b>0.7-1.1</b>	0.063997	0.147774	<b>2.309</b>
INT SPETT.	<b>SA4</b>	<b>0.5-1.5</b>	0.156617	0.359237	<b>2.294</b>

**Fattori SI:**

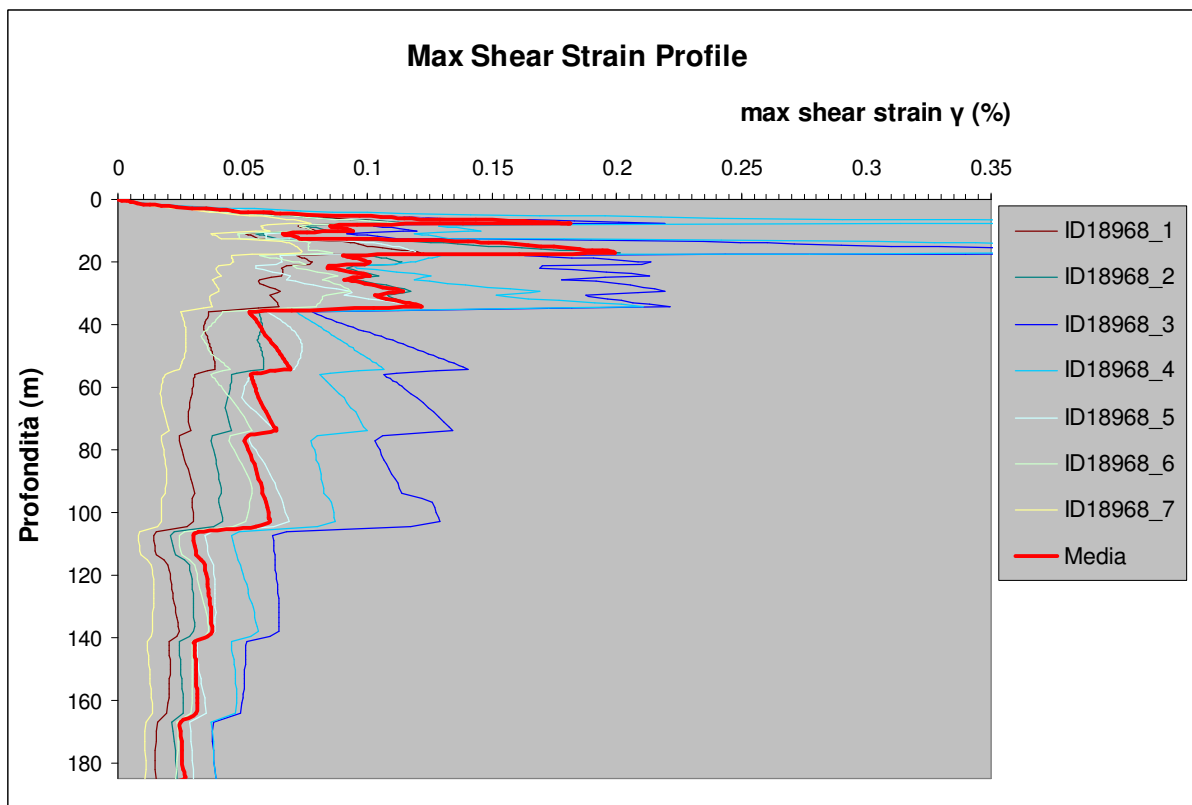
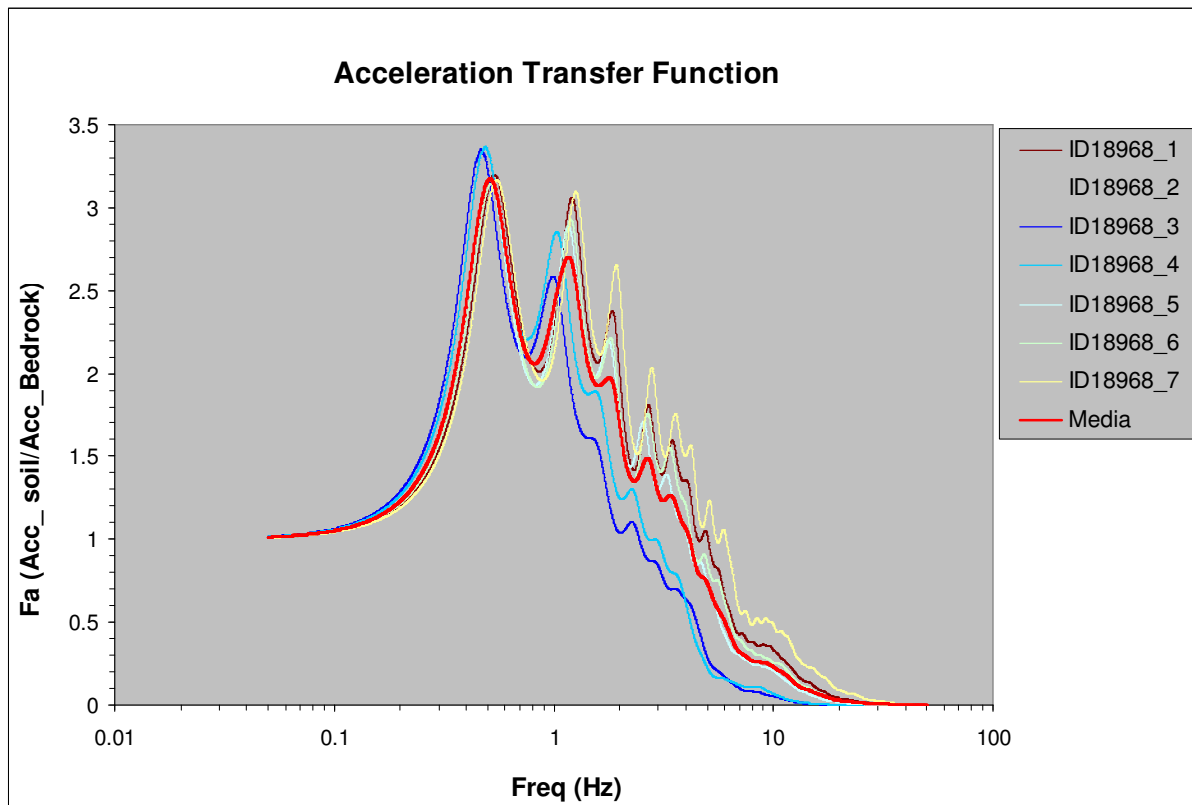
		Periodo(s)	Bedrock	Soil	FA
INT SPETT.	<b>SI1</b>	<b>0.1-0.5</b>	6.944532	9.688517	<b>1.395</b>
INT SPETT.	<b>SI2</b>	<b>0.5-1.0</b>	10.950898	26.053639	<b>2.379</b>
INT SPETT.	<b>SI3</b>	<b>0.5-1.5</b>	21.873204	52.288060	<b>2.391</b>

**ASl<sub>pu</sub>/ΔT=**            **401.835994**  
**H<sub>SM</sub>=**                    **493.225**  
**H<sub>0408</sub>=**                   **500.248**  
**H<sub>0711</sub>=**                   **362.293**  
**H<sub>0515</sub>=**                   **352.291**

## ZONA RNS\_03







**V<sub>sH</sub> (0-30)=196 (m/s)**

**PGA=0.241**

**F<sub>PGA</sub>=1.312**

**Fattori SA:**

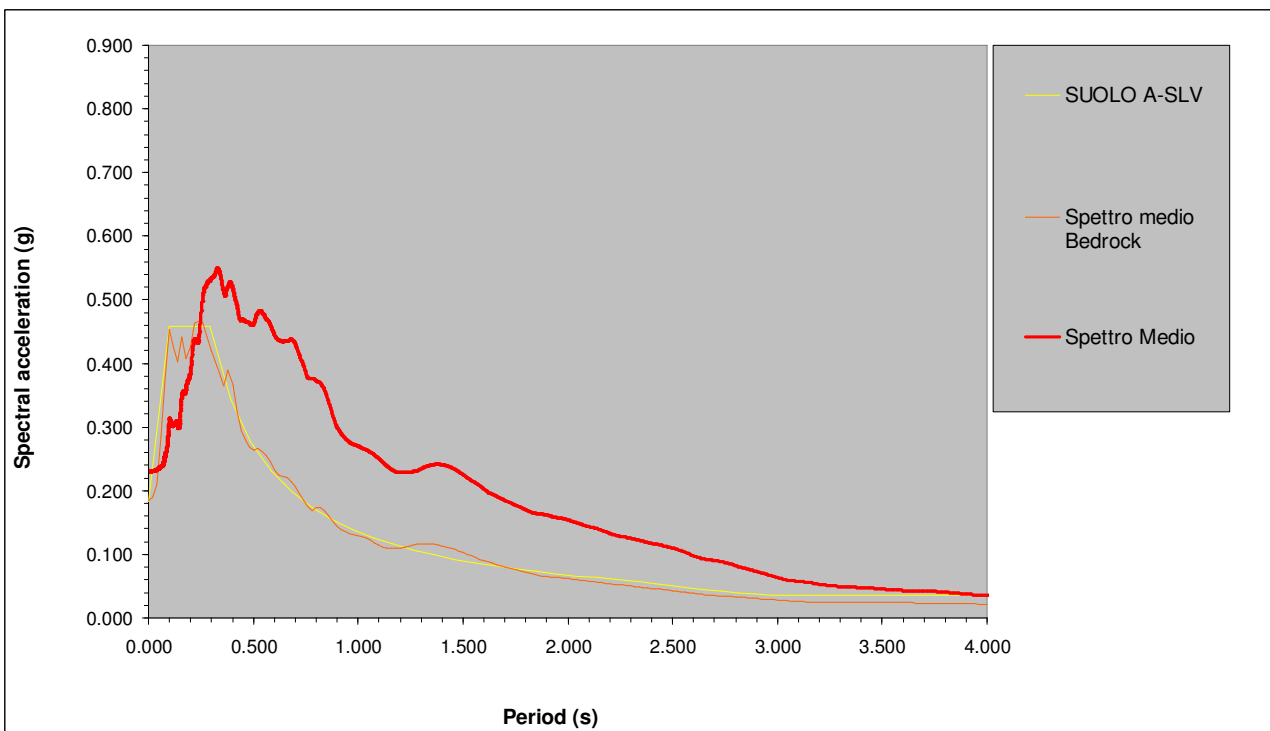
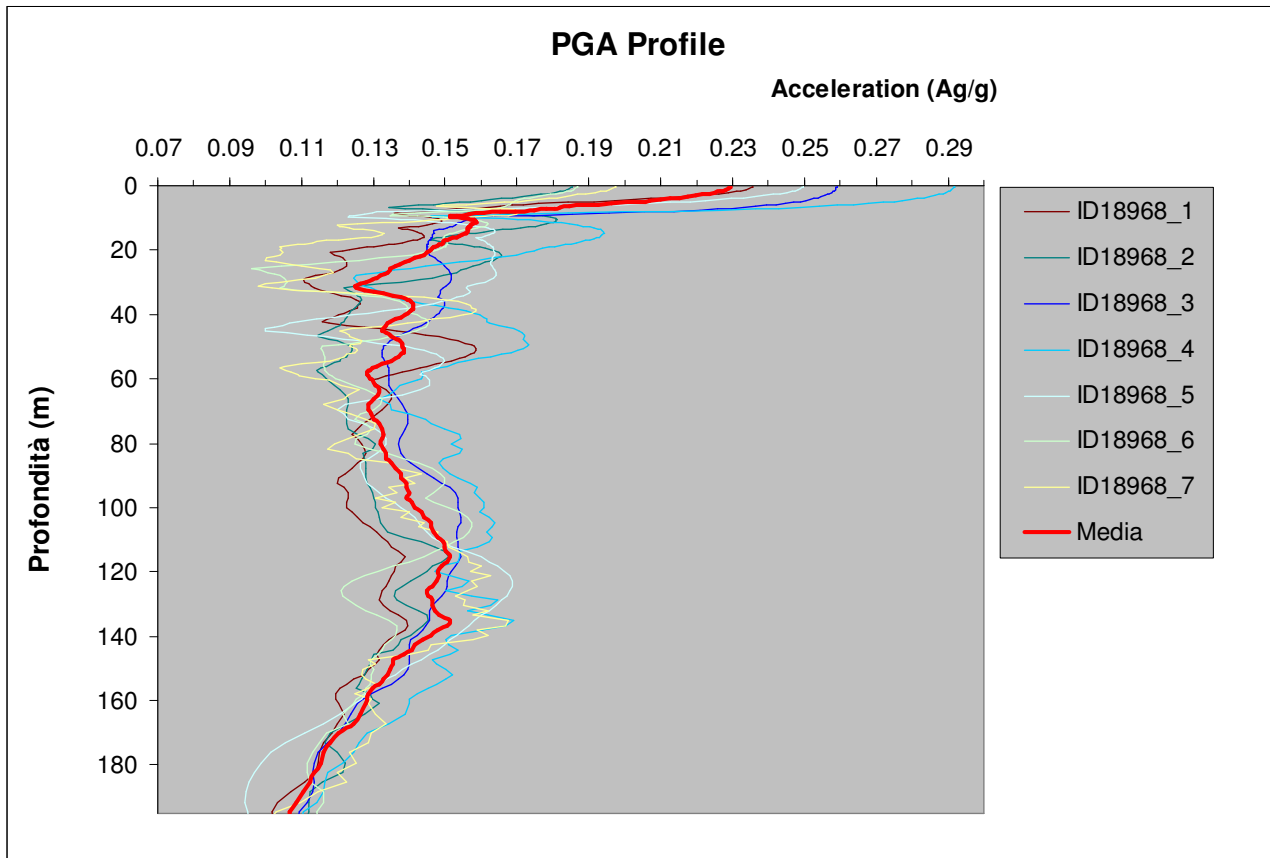
		Periodo(s)	Bedrock	Soil	FA
INT SPETT.	<b>SA1</b>	<b>0.1-0.5</b>	0.164043	0.193710	<b>1.181</b>
INT SPETT.	<b>SA2</b>	<b>0.4-0.8</b>	0.103053	0.177763	<b>1.725</b>
INT SPETT.	<b>SA3</b>	<b>0.7-1.1</b>	0.064573	0.135652	<b>2.101</b>
INT SPETT.	<b>SA4</b>	<b>0.5-1.5</b>	0.158026	0.331439	<b>2.097</b>

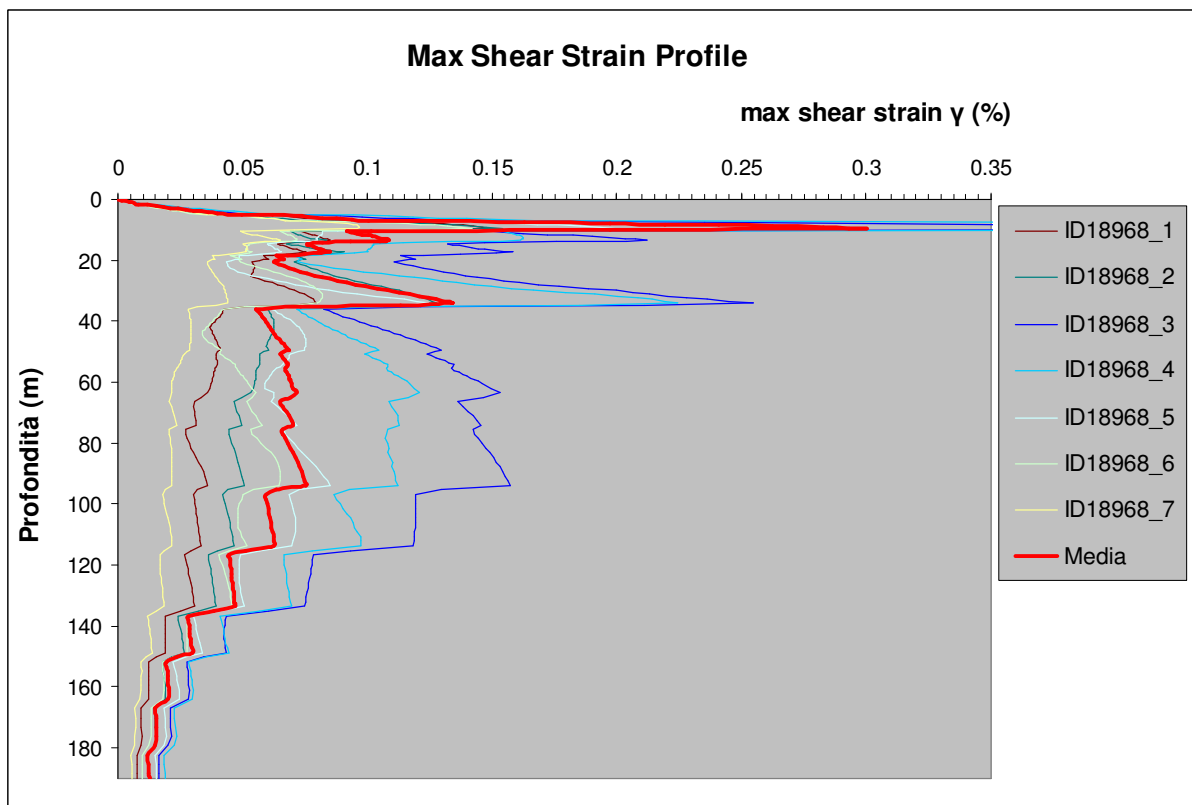
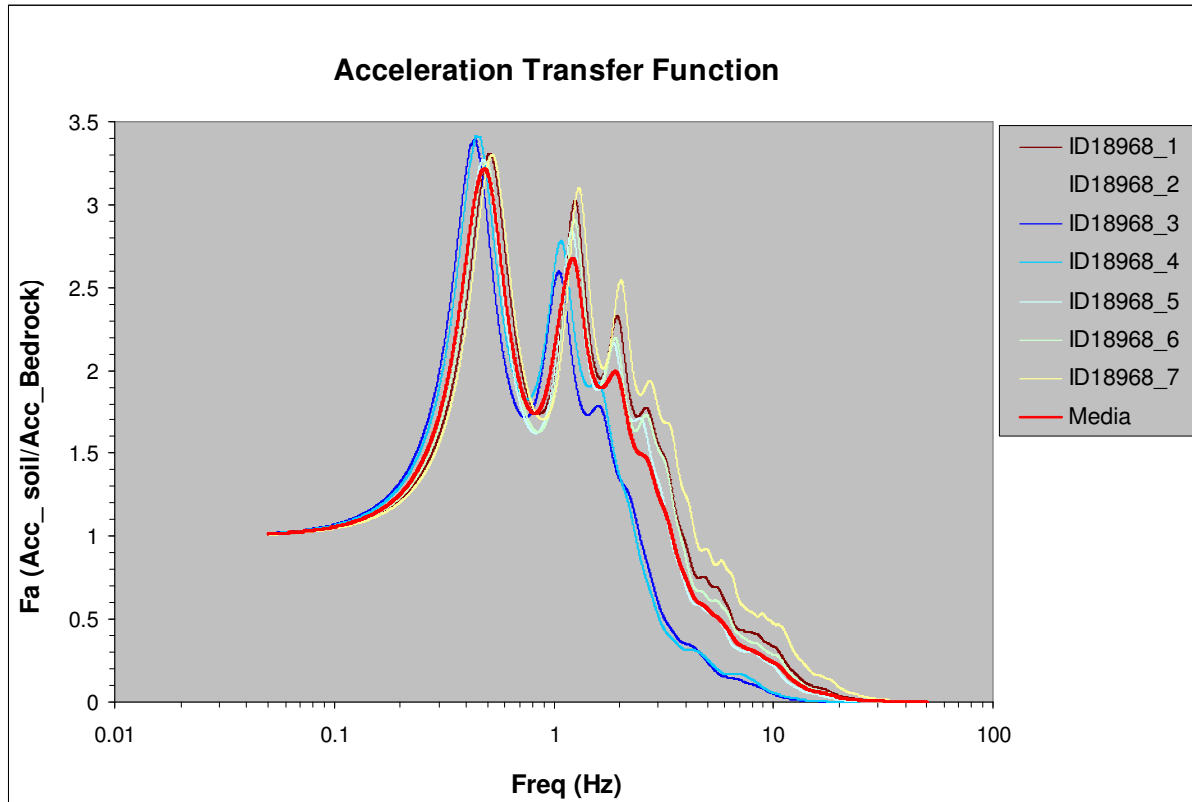
**Fattori SI:**

		Periodo(s)	Bedrock	Soil	FA
INT SPETT.	<b>SI1</b>	<b>0.1-0.5</b>	7.006972	9.430273	<b>1.346</b>
INT SPETT.	<b>SI2</b>	<b>0.5-1.0</b>	11.049362	23.057416	<b>2.087</b>
INT SPETT.	<b>SI3</b>	<b>0.5-1.5</b>	22.069873	49.142392	<b>2.227</b>

<b>ASl<sub>pu</sub>/ΔT=</b>	<b>404.5644</b>
<b>H<sub>SM</sub>=</b>	<b>477.730</b>
<b>H<sub>0408</sub>=</b>	<b>435.816</b>
<b>H<sub>0711</sub>=</b>	<b>332.574</b>
<b>H<sub>0515</sub>=</b>	<b>325.031</b>

## ZONA RNS\_04





**V<sub>sH</sub> (0-30)=195 (m/s)**

**PGA=0.229**

**F<sub>PGA</sub>=1.249**

**Fattori SA:**

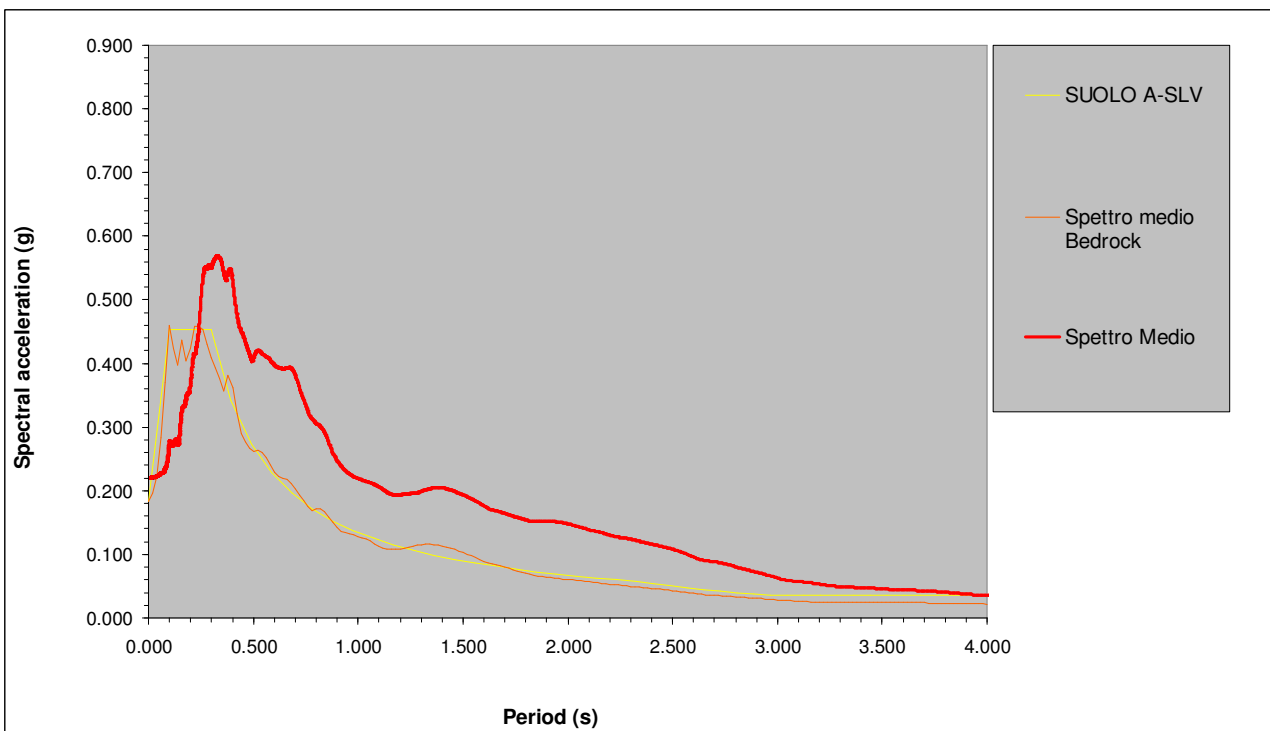
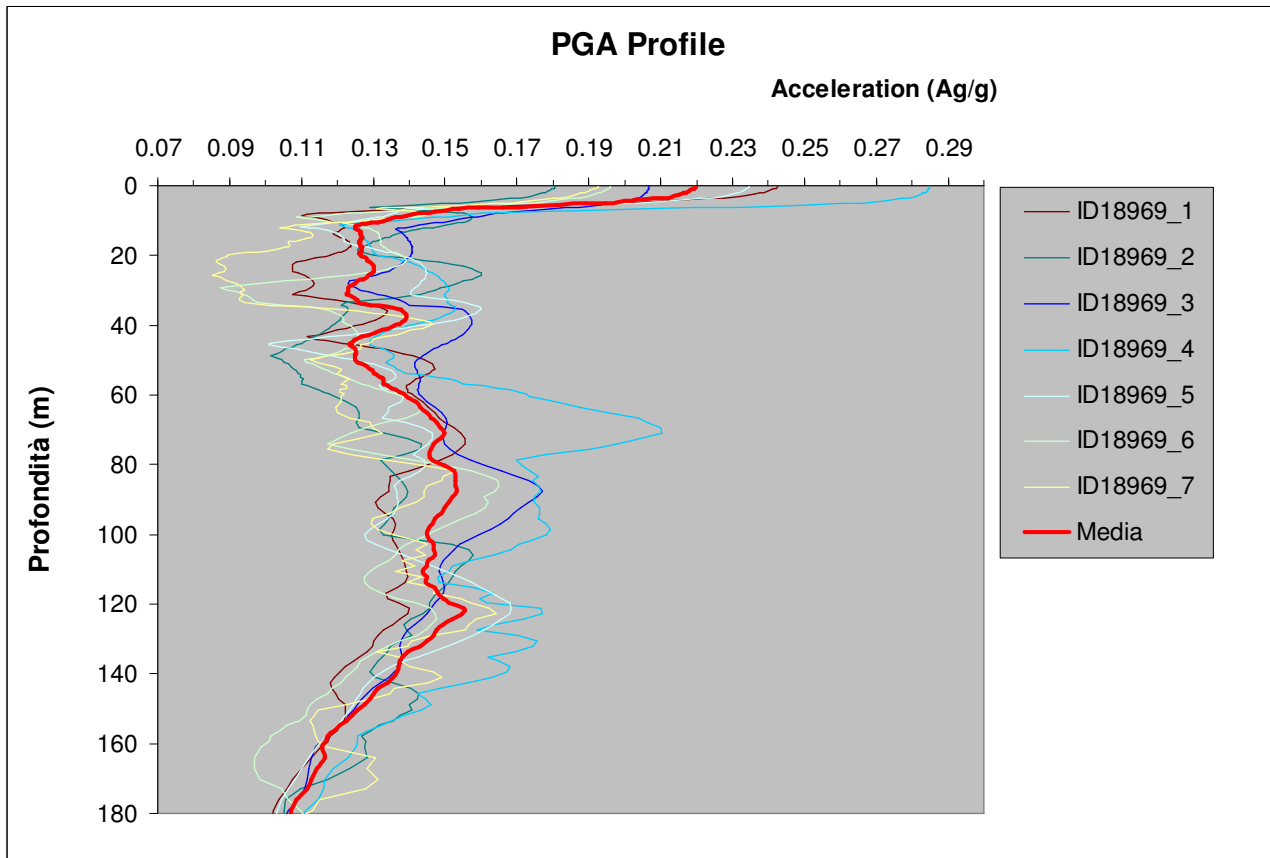
		Periodo(s)	Bedrock	Soil	FA
INT SPETT.	<b>SA1</b>	<b>0.1-0.5</b>	0.164043	0.181532	<b>1.107</b>
INT SPETT.	<b>SA2</b>	<b>0.4-0.8</b>	0.103053	0.177616	<b>1.724</b>
INT SPETT.	<b>SA3</b>	<b>0.7-1.1</b>	0.064573	0.128403	<b>1.989</b>
INT SPETT.	<b>SA4</b>	<b>0.5-1.5</b>	0.158026	0.312864	<b>1.980</b>

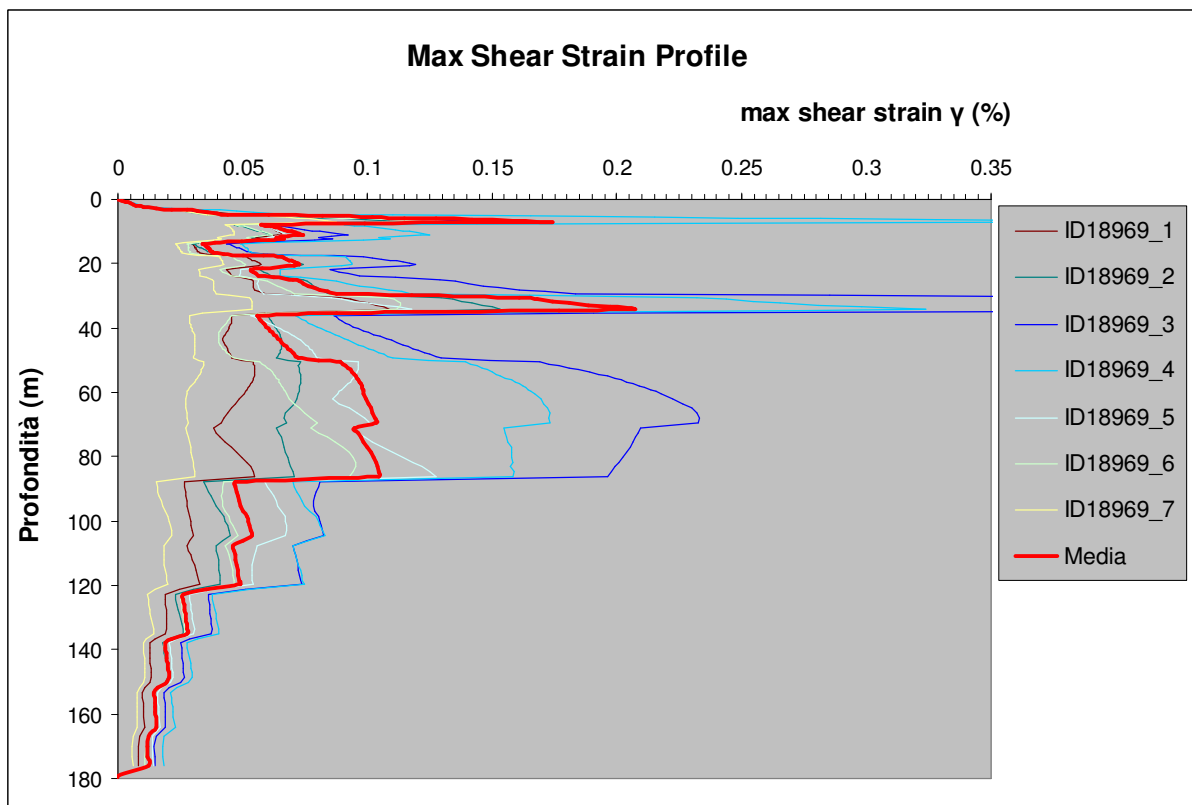
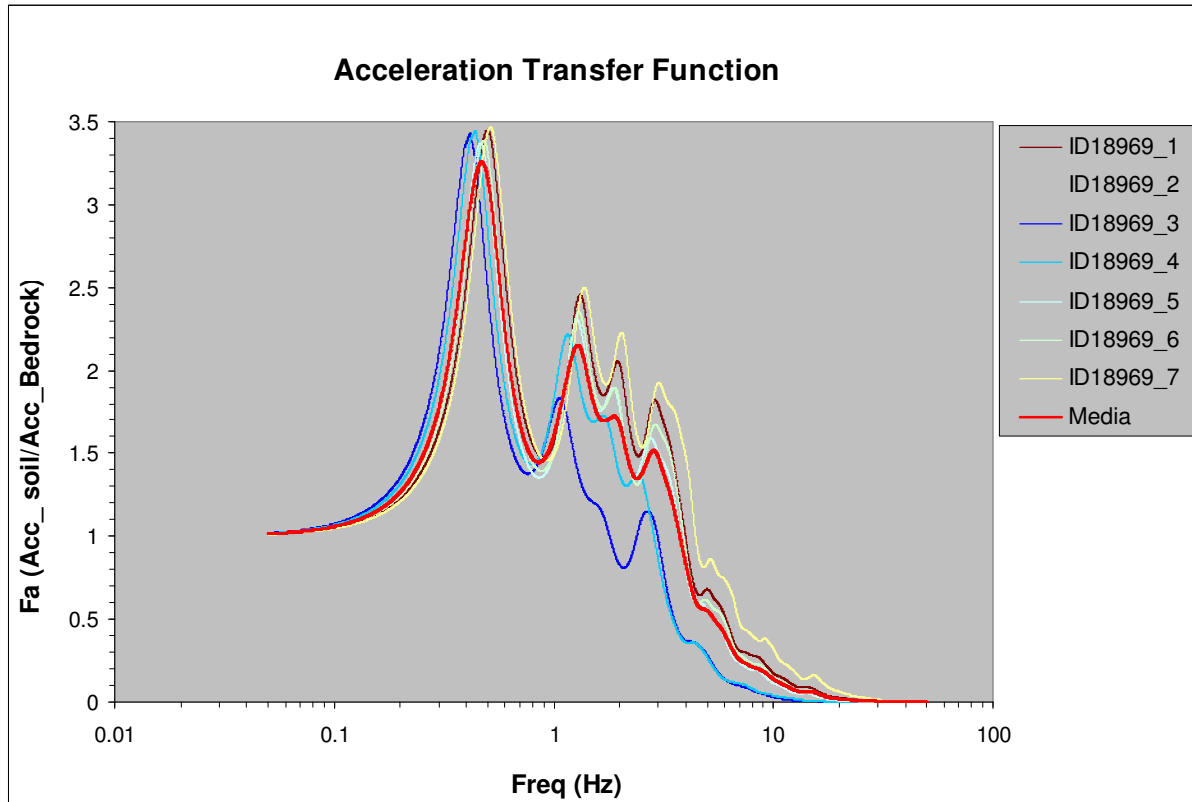
**Fattori SI:**

		Periodo(s)	Bedrock	Soil	FA
INT SPETT.	<b>SI1</b>	<b>0.1-0.5</b>	7.006972	8.962644	<b>1.279</b>
INT SPETT.	<b>SI2</b>	<b>0.5-1.0</b>	11.049362	22.426016	<b>2.030</b>
INT SPETT.	<b>SI3</b>	<b>0.5-1.5</b>	22.069873	45.784273	<b>2.075</b>

<b>ASl<sub>pu</sub>/ΔT=</b>	<b>404.5644</b>
<b>H<sub>SM</sub>=</b>	<b>447.695</b>
<b>H<sub>0408</sub>=</b>	<b>435.454</b>
<b>H<sub>0711</sub>=</b>	<b>314.801</b>
<b>H<sub>0515</sub>=</b>	<b>306.814</b>

**ZONA RNS\_05**





**V<sub>sH</sub> (0-30)=221 (m/s)**

**PGA=0.220**

**F<sub>PGA</sub>=1.202**

**Fattori SA:**

		Periodo(s)	Bedrock	Soil	FA
INT SPETT.	<b>SA1</b>	<b>0.1-0.5</b>	0.161864	0.179793	<b>1.111</b>
INT SPETT.	<b>SA2</b>	<b>0.4-0.8</b>	0.101911	0.159118	<b>1.561</b>
INT SPETT.	<b>SA3</b>	<b>0.7-1.1</b>	0.063921	0.106549	<b>1.667</b>
INT SPETT.	<b>SA4</b>	<b>0.5-1.5</b>	0.156511	0.266252	<b>1.701</b>

**Fattori SI:**

		Periodo(s)	Bedrock	Soil	FA
INT SPETT.	<b>SI1</b>	<b>0.1-0.5</b>	6.902271	8.863661	<b>1.284</b>
INT SPETT.	<b>SI2</b>	<b>0.5-1.0</b>	10.936045	19.158128	<b>1.752</b>
INT SPETT.	<b>SI3</b>	<b>0.5-1.5</b>	21.870432	38.790141	<b>1.774</b>

<b>ASl<sub>pu</sub>/ΔT=</b>	<b>402.498169</b>
<b>H<sub>SM</sub>=</b>	<b>447.082</b>
<b>H<sub>0408</sub>=</b>	<b>390.104</b>
<b>H<sub>0711</sub>=</b>	<b>261.221</b>
<b>H<sub>0515</sub>=</b>	<b>261.104</b>

Il trend osservabile è un graduale e progressivo approfondimento del bedrock sismico procedendo da S verso N così come un generale decremento di rigidità sismica degli orizzonti alluvionali e marini nelle prime decine di m superficiali (vedi Figura 5.4). In particolare, le zone RNN\_01, 02, 03, 04, sono caratterizzate da una più cospicua presenza di orizzonti ghiaiosi e dai relativi contrasti di impedenza sismica; in corrispondenza di questi ultimi, soprattutto quelli più superficiali, talora si evidenzia lo sviluppo di deformazioni di taglio significative, potenzialmente determinanti condizioni di non linearità. Coerentemente la PGA risulta presentare la medesima tendenza generale di incremento da S verso N.

Talora i livelli deformativi (max shear strain) stimabili in corrispondenza degli orizzonti potenzialmente liquefacibili e/o di significativi contrasti di rigidità, tramite i moti di input e condizioni al contorno adottati, risultano pari o superiori ai limiti di generale applicabilità dei metodi di analisi EQL, suggerendo all'occorrenza l'opportunità di un approccio anche tramite metodi di analisi non lineare, generalmente più adeguati nel campo delle medie-grandi deformazioni.

*Gli accelerogrammi (input ed output) e gli spettri ottenuti dalle modellazioni, relativi alla caratterizzazione di ciascuna zona a comportamento dinamico omogeneo (es. RNN\_04, RNN\_03, ecc.), sono stati numerati da 01 a 10 secondo la codifica prevista dagli standard di archiviazione, in modo progressivo da N verso S.*



## 10.2. Potenziale di liquefazione

### 10.2.1 Suscettibilità a liquefazione ed analisi tramite metodi semplificati

Il comportamento non drenato dei terreni incoerenti superficiali soggetti ad elevate deformazioni cicliche (con ridotta capacità di drenaggio in relazione alla velocità di applicazione dei carichi), per la natura sostanzialmente incompressibile dell'acqua, può indurre la generazione di sovrappressioni interstiziali in grado di portare il terreno a liquefazione.

In prima battuta è quanto mai opportuno ricordare le evidenze storiche riguardo la periodica occorrenza di tali fenomeni lungo le coste romagnole in occasione dei maggiori terremoti storici conosciuti; specificamente, in base alle cronache, gli effetti legati all'evento del 1916 sono risultati particolarmente intensi sul tratto meridionale della costa romagnola, in conseguenza sia della magnitudo che della posizione degli epicentri, in quanto le relative sorgenti sismogenetiche sono individuabili (nel database DISS3) a poche miglia dalla costa, lungo lo specchio di mare frontostante i comuni di Rimini, Riccione, Misano e Cattolica, (sorgenti ITCS030, ITIS033, ITIS034).

Le evidenze storiche in termini di effetti sul territorio vengono riportate nel recente catalogo di Galli P. (2000) e nel web-gis *Catalogo italiano degli Effetti Deformativi del suolo Indotti dai forti Terremoti (CEDIT) - CERI* dell'Università "Sapienza" di Roma, che censisce gli effetti indotti sul terreno da terremoti storici verificatisi in un arco temporale che va dall'anno 1000 d.C. al 2016; in figura 10.5, viene riportato uno stralcio del catalogo di Galli (2000) raffigurante gli eventi principali geolocalizzati lungo la costa romagnola, con particolare riferimento agli eventi della Provincia Riminese e nei tratti costieri limitrofi.

Epicentral parameters of the seismic events								Sites with indication of liquefaction					
Ref.	Date	Latitude	Longitude	$I_0$	$M_c$	$M_s$	Area	Site*	Latitude	Longitude	$d$ (km)	$I_s$	Type
136	1786.12.25	43.980	12.580	8.0	5.59	5.5	Rimini	Rimini	44 04	12 34	10	8.0	A1 E
177	1875.03.17	44.070	12.550	8.0	5.72	5.2	Rimini	Cervia	44 16	12 21	27	7.0	A1
178	1875.03.17	44.070	12.550	8.0	5.72	5.2	Rimini	Cesenatico	44 12	12 24	19	8.0	A1-2
230	1916.05.17	44.000	12.630	8.0	5.72	6	Rimini area	Rimini	44 03	12 34	8	8.0	A1
231	1916.08.16	43.970	12.670	8.0	5.59	6.1	Rimini urea	Cattolica	43 58	12 44	5	8.0	A1-2 A4-5
232	1916.08.16	43.970	12.670	8.0	5.59	6.0	Rimini area	Ghetto delle Fontanelle	43 59	12 40	2	8.0	A4-5
233	1916.08.16	43.970	12.670	8.0	5.59	6.0	Rimini urea	Pesaro	43 55	12 55	20	8.0	A1
234	1916.08.16	43.970	12.670	8.0	5.59	6.0	Rimini urea	Riccione	44 01	12 39	5	8.0	A1 A4
235	1916.08.16	43.970	12.670	8.0	5.59	6.0	Rimini area	Rimini	44 04	12 34	14	8.0	C

- A = ground fissuring and related phenomena
  - A1 = only ground fissures
  - A2 = water emission
  - A3 = mud, sand and gravel venting
  - A4 = mixed water and sand venting (sand boils)
  - A5 = mud volcanoes
- B = surface deformation
  - B1 = local settlement
  - B2 = local swelling
- C = differential settlement of building
- D = liquefaction evidence s.l. or without description.

Figura 10.5 – Stralcio da "New empirical relationships between magnitude and distance for liquefaction" – Table 4, Galli, 2000.

Una prima indicazione in merito alla suscettibilità a liquefazione in condizioni sismiche dei terreni si può ottenere attraverso la sovrapposizione delle curve di distribuzione granulometrica dei campioni già utilizzati per la MS di livello I-II prelevati con i campi di potenziale liquefacibilità proposti da Tsuchida H. (1970). In

tal caso essi ricadono entro i campi di potenziale suscettibilità per terreni Coefficiente di Uniformità  $U_c < 3.5$  e  $U_c > 3.5$ .

In via generale, per verificare e quantificare la possibilità di occorrenza di fenomeni di liquefazione possono essere impiegate le procedure che, nell'ambito dell'Ingegneria Geotecnica Sismica, sono denominate 'metodi semplificati'. Tali metodi, applicabili solo nelle condizioni di piano di campagna orizzontale o con deboli pendenze e depositi olocenici, richiedono la valutazione, fino alla profondità critica da p.c., del coefficiente di sicurezza  $FS$ .

Se il fattore  $FS > 1,0$  la liquefazione è da escludere; se  $FS < 1,0$  è invece possibile che avvengano fenomeni di liquefazione, ma in ogni caso vanno verificati anche i cedimenti post-sismici sia in sabbie sature che fuori falda, nonché in argille particolarmente compressibili potenzialmente soggette a fenomeni degradazione ciclica.

Nel caso specifico si sono utilizzate solo le penetrometrie CPTe/u di nuova esecuzione e di archivio (vedi carta delle indagini e report in allegato 1 e 6), avvalendosi delle prove CPT con punta meccanica solo per considerazioni generali e informazioni di tipo litostratigrafico utili a selezionare e correlare a scala areale le varie prove CPTe/u; ciò ha consentito di valutare la stratigrafia lungo la costa a partire dal piano campagna attuale costantemente fino ad almeno – 20.0 mt; tuttavia oltre i 18/20 mt da p.c. la pressione litostatica tende ragionevolmente ad inibire il fenomeno e a rendere superflue tali valutazioni se non per situazioni o soluzioni progettuali particolari.

In base alla ricostruzione stratigrafica generale si possono fare le seguenti assunzioni generali:

- I litotipi prevalentemente sabbiosi che costituiscono le Unità A e B, rientrano nei fuso granulometrici dei sedimenti incoerenti potenzialmente suscettibili al fenomeno della “liquefazione” come indicato in normativa DGR 630/2019, DM2018 (par. 7.11.3.4.2) e Linee Guida AGI 2005 (terreni con coefficiente di uniformità  $U_c < 3,5$  e  $U_c > 3,5$ )
- i terreni appartenenti all'Unità C, a prevalente contenuto limo – argilloso e dotati di significativo comportamento plastico ( $FC > 20\%$  e Indice Plastico  $IP > 10$ ), risultano ricadere al di fuori dei fusi granulometrici dei sedimenti potenzialmente suscettibili al fenomeno della “liquefazione” secondo quanto indicato al punto n. 3 del paragrafo A1 dell'Allegato A3 - DGR 630/2019 nonché secondo quanto ipotizzato da vari autori (Seed - Idris 1967, Kishide 1970, Tsuchida, 1970).
- Gli occasionali orizzonti sabbiosi centimetrici/decimetri, occasionalmente intercalati all'interno dell'Unità C, sebbene rientranti fra quelli potenzialmente liquefacibili, dati la scarsa continuità laterale, le elevate pressioni litostatiche di confinamento e l'elevato spessore di terreni coesivi argillosi soprastanti, può essere ritenuto inibito ed ininfluenza dal punto di vista del potenziale di liquefazione atteso.
- Solo modestissimi ed occasionali orizzonti di limi-argillosi all'interno dell'Unità C, risultano caratterizzati da bassissima resistenza alla punta ed elevata compressibilità e, quindi, localmente risultano potenzialmente suscettibili di degradazione ciclica della resistenza non drenata.

### *10.2.2 Stima del potenziale di liquefazione tramite metodi CPT*

Dai dati della campagna geognostica risulta che lo spessore del corpo sedimentario sabbioso costiero (rappresentato in loco dalle Unità A e B), costituito da sabbie prevalenti e alternanze di livelli sabbiosi con sottili orizzonti limosi ed argillosi ma a comportamento generale prettamente incoerente, risulta variabile fra i valori di circa 5.5-13.0 mt (eccetto le zone di chiusura contro la paleo falesia in cui va assottigliandosi per chiudersi a becco di flauto); tuttavia alla base del cuneo sabbioso, talora, sono presenti orizzonti metrici di sabbie limose alluvionali e/o ghiaietto di barra di foce, determinando un'ulteriore spessore locale di materiali incoerenti potenzialmente liquefacibili. Data l'estensione dell'area in studio, si sono adottate le azioni sismiche derivate dalla suddivisione in 10 settori omogenei in relazione agli assetti geologici e stratigrafici adottati per la modellazione di RSL.

La stima del potenziale di liquefazione può essere effettuata in condizioni "free-field" con i "metodi semplificati" indicati in Allegato A3 della DGR 630/2019, come aggiornata dalla *DGR 476/2021 e successiva integrazione DGR 564/2021* e, a tal fine, per ogni verticale si è utilizzato il picco di accelerazione massima in superficie  $a_{max}$  (PGA) desunto, per ciascuna zona di RSL, mediante analisi della risposta locale sotto l'azione sismica di riferimento.

Per il caso in esame risulta possibile analizzare la potenziale liquefacibilità dei terreni attraverso metodi basati sullo stato tensionale in cui il fattore di sicurezza alla liquefazione viene definito tramite il rapporto tra resistenza ciclica *CRR* e azione sismica di progetto *CSR* (Cyclic Stress Ratio) per cui  $FS=CRR/CSR$ ; in particolare ci si può avvalere di metodologie di tipo storico – empirico fra cui quelle basate su prove CPT come raccomandato nelle Linee Guida AGI 2005 e ICMS 2008.

Per quanto riguarda la scelta del metodo si è adottata la formulazione di Robertson 2009-2015 (*R09*), ritenuta particolarmente idonea e riconosciuta per affidabilità e diffusione a livello internazionale e nel mondo accademico; in particolare la stima in continuo del contenuto in fine % *FC* (Robertson & Fear, 1995) risulta ben calibrata sulla situazione litostratigrafica e granulometrica dei sedimenti in posto. Tale metodo, in assenza di puntuali e diffuse prove di laboratorio, consente una stima della resistenza ciclica di riferimento sulla scorta della resistenza alla punta in funzione del parametro di comportamento del terreno *Ic* (soil behavior index), in quanto il valore di resistenza ciclica finale dei terreni è influenzato da diversi fattori genetici e costitutivi oltre al solo "contenuto in fine apparente".

Fra gli altri metodi altrettanto riconosciuti quali ad es. quello proposto Idriss-Boulanger (2014), nonostante abbia comportato un ulteriore aggiornamento di alcuni parametri e delle case-history di riferimento, a parere dello scrivente risulta molto sensibile alle valutazioni/stime del contenuto in fine dei terreni e, il modello di interpretazione dell'*FC* insito nel metodo, richiederebbe un'approfondita e specifica calibrazione basata su di un vasta base di dati di laboratorio.

In tal senso per l'analisi di tipo areale ed in base ai riscontri ottenuti da studi pregressi in aree limitrofe del medesimo ambito costiero, al grado di conoscenza della stratigrafia, di affidabilità delle prove e dei dati utilizzati, si è scelto quindi di utilizzare il metodo di Robertson 2009-2015 (*R09*) secondo un adeguato fattore

di sicurezza di riferimento FS ( $FS=CRR/CSR$ ), al fine di garantire lo stesso livello di confidenza, in termini probabilistici, proprio degli altri metodi CPT maggiormente diffusi in letteratura (*IB2014, IB08, Moss 2006*), adottando una curva limite che discrimini gli ambiti di liquefazione/non liquefazione secondo un livello di confidenza minimo pari all'85% (curva con probabilità di liquefazione  $PL=15\%$ ).

A attraverso la formulazione di Ku et al. (2012), per cui  $P_L = 1 - \Phi \left[ \frac{0.102 + \ln(F_s)}{0.276} \right]$  (con  $\Phi$  = distribuzione standard normale), si evince come l'adozione di  $FS=1.2$  garantisca il livello di confidenza richiesto ( $PL=15\%$ ).

Tale scelta appare suffragata anche da un confronto con i dati sperimentali di laboratorio ciclico (vedi prove triassiali cicliche in allegato n. 2), opportunamente rapportati alle condizioni di campo (taglio semplice) attraverso la relazione di Seed H.B. e Peacock W.H. (1971), da cui si evince come le resistenze normalizzate ( $CRR_{7.5}$ ) stimabili con il metodo R09 con fattore di sicurezza limite  $FS=CRR/CSR=1.2$ , in corrispondenza degli orizzonti campionati, appaiano coerenti e commisurate alle resistenze cicliche rilevabili dai test di laboratorio per un numero di cicli pari a  $N=15$ .

Inoltre secondo un approccio prettamente deterministico, tale soglia di  $FS=1.2$  viene altresì raccomandata dall'autore stesso per valutazioni inerenti opere ordinarie, in quanto il metodo mantiene insito, comunque, un certo grado di conservatività (comunicazione personale).

L'adozione dei metodi semplificati di verifica a liquefazione, in relazione alle condizioni di pericolosità sismica generale ed alla stima dei carichi ciclici ipotizzabili, richiede l'adozione di una  $M_w$  (magnitudo momento) di riferimento che, per il caso in esame, viene assunta pari a  $M_w=6.16$ .

La verifica di calcolo, riportata in allegato n. 6, è stata effettuata come da normativa attraverso l'utilizzo del software CLiq vers. 2.3.1.15 della software house Geologismiki, utilizzando le prove Cpte/u identificate nella "Carta delle Indagini" e riportate nel database, la cui stratigrafia è stata discretizzata mediando i valori ottenibili secondo orizzonti di 5 cm.

Il metodo R09 è basato su un proprio fattore caratteristico di scalatura della magnitudo ( $MSF$ ) e specifici coefficienti riduttivi ( $Rd-K\alpha-K\sigma$ ) atti a determinare i valori di  $CRR$  (cyclic resistance ratio) e  $CSR$  (cyclic stress ratio) necessari a definirne il  $FS$  (fattore di sicurezza) per ciascuno strato rispetto ad una soglia limite di riferimento prefissata. Essendo uno studio di tipo areale ed in assenza di specifiche indicazioni progettuali il calcolo è stato effettuato assumendo condizioni di free-field ed un livello di falda ipotizzabile in condizioni di massimo innalzamento medio stagionale.

Dall'analisi congiunta degli accelerogrammi utilizzati per le analisi di  $RSL$ , oltre alla  $PGA$  media attesa a suolo libero è stato definito anche il profilo medio di  $CSR$ . Tuttavia ai fini dell'azione sismica, trattandosi di ampie aree di studio nonché in riferimento alle indicazioni contenute nel NASEM Report-2016, si è optato per l'utilizzo della sola  $PGA$  ricavata per ciascuna delle zone studiate, per cui i rispettivi valori (arrotondati), muovendosi da N a S, risultano pari a:

<b>ZONE RSL</b>	<b>PGA (ag/g)</b>
RNN_04	0.28
RNN_03	0.28
RNN_02	0.25
RNN_01	0.28
RNC	0.26
RNS_01	0.26
RNS_02	0.25
RNS_03	0.24
RNS_04	0.23
RNS_05	0.22

Il piano/quota di riferimento utilizzato per le verifiche è pari al piano campagna attuale (p.c.).

Come indicatore di rischio complessivo, oltre al valore di *FS* per ciascun singolo strato, viene stimato anche il potenziale di liquefazione “*IPL*” lungo la colonna stratigrafica fino alle profondità sondate secondo il metodo di Iwasaki et Al. 1982, come recentemente rivisto ed aggiornato da Sonmez (2003), integrando in modo pesato il potenziale di liquefazione di ciascuno strato su tutto il profilo stratigrafico indagato e per cui:

**IWASAKI 1982**

IPL=0      Rischio liquefazione molto basso  
 0<IPL≤5    Rischio liquefazione basso  
 5<IPL≤15   Rischio liquefazione alto  
 IPL>15     Rischio liquefazione molto alto

**SONMEZ 2003**

IPL=0      Rischio liquefazione molto basso  
 0<IPL≤2    Rischio liquefazione basso  
 2<IPL≤5    Rischio liquefazione moderato  
 5<IPL≤15   Rischio liquefazione alto  
 IPL>15     Rischio liquefazione molto alto

In funzione del *FS* calcolato sono stati determinati, altresì, le deformazioni massime (*γ<sub>max</sub>* - *LDI*) ed i cedimenti attesi (*ε<sub>v</sub>* - *ΔS<sub>i</sub>*) nei terreni sia in falda che fuori falda (Zhang, 2002, Priebe, 1998), siano essi incoerenti che coesivi (rispettivamente per deformazione volumetrica/riaddensamento e riconsolidazione; Robertson metodo “All Soil, 2009”).

In allegato n. 6-7 viene altresì illustrata l’entità dei cedimenti post-sismici attesi *ΔS*, cumulativa sia per terreni incoerenti che coesivi i quali, all’interno di ciascuna zona, presentano una modesta variabilità areale.

A titolo di riferimento Ishihara e Yoshimine (1992), in relazione ai cedimenti stimati ed al grado di danneggiamento/effetti attesi al suolo, identificano tre ambiti di pericolosità per cui:

Cedimento (cm)	Grado/severità di danneggiamento
ΔS < 10	Assente - Lieve
10<ΔS < 30	Medio
ΔS > 30	Esteso - Severo

Inoltre, in relazione al rapporto di spessore fra strati liquefacibili/non liquefacibili ) e la relativa profondità, altri autori (Crespellani et. al. 1988; Ishihara, 1985; Youd e Garri 1994, 1995) schematizzano la possibilità di

propagazione verso l'alto e/o di avere manifestazioni superficiali in funzione del moto sismico atteso (vedi figura 10.6).

In ultimo, a supporto del giudizio complessivo e sui potenziali effetti sulla stabilità del terreno e delle strutture ivi insistenti, è opportuno valutare anche altri indicatori di pericolosità quale il parametro *LSN* (Van Ballegooy et al., 2013) (vedi allegato 7).

Il valore di *LSN* viene ricavato tramite l'integrazione, su tutta la colonna stratigrafica, del coefficiente di riconsolidazione verticale  $\varepsilon_v$  calcolato con il metodo di Zhang et al. (2002). In tal modo vengono definiti i seguenti valori e scenari di riferimento:

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

<i>LSN Range</i>	<i>Predominant performances</i>
0 ÷ 10	Little to no expression of liquefaction, minor effects
10 ÷ 20	Minor expression of liquefaction some sand boil
20 ÷ 30	Moderate expression of liquefaction, with sand boil and structural damage
30 ÷ 40	Moderate to severe expression of liquefaction, settlement can cause structural damage
40 ÷ 50	Major expression of liquefaction, undulations and damage to ground surface, severe total and differential settlement of structure
>50	Severe damage, extensive evidence of liquefaction at surface, severe total and differential settlement affecting structure, damage to services

Gli scenari di danno stimabili con il parametro *LSN* risultano significativamente condizionati dal rapporto tra strati liquefacibili/non liquefacibili, la loro posizione e la relativa deformabilità, cosa che il metodo, sulla scorta di prove ad alta risoluzione (quali CPTe/u), riesce a discriminare con buona attendibilità.

Questi indicatori, infatti, portano a stimare rispettivamente la probabilità di sviluppo del fenomeno in relazione all'IPL e gli scenari di deformazione/danno attesi in superficie sulla base dell'assetto stratigrafico rilevato e del rapporto fra orizzonti liquefacibili/non liquefacibili; ciò consente un giudizio più approfondito sul potenziale di danneggiamento e sulla severità delle manifestazioni superficiali attese.

In linea generale, osservando la carta di microzonazione e delle isopotenziali di liquefazione, è possibile apprezzare trend generali per cui i valori di IPL e cedimento  $\varepsilon_v$ , quindi, di pericolosità per liquefazione, tendano ad aumentare progressivamente procedendo da monte verso mare, commisuratamente all'aumento degli spessori del prisma sabbioso costiero; per buona parte del territorio urbanizzato, tali valori risultano essere caratteristici di un potenziale alto, a tratti molto alto. Coerentemente è possibile individuare una fascia a basso-medio potenziale, lungo la parte che si sviluppa nella zona di assottigliamento del prisma sabbioso, ovvero secondo una profondità mediamente variabile fra 30-70 m e sino a 100-250 m di distanza dalla paleo falesia rispettivamente nel tratto di Rimini Nord (RNN) e Rimini Sud (RNS), in virtù dell'assetto morfologico locale. Presenta un assetto più articolato la zona di interdigitazione centrale (RNC)

maggiormente influenzata dall'interazione con le dinamiche e depositi fluviali, penetrando altresì maggiormente entro la zona urbanizzata e talora storica della città.

Un altro trend di rilievo, a scala territoriale comunale, è determinato dal progressivo incremento del potenziale di liquefazione spostandosi dal settore meridionale verso nord, diventando significativamente più alto presso le zone prossime (RNS\_01) ed a nord del portocanale (RNC), verosimilmente in virtù dei maggiori spessori del prisma deposizionale costiero e minore resistenza ciclica delle sabbie costituenti il primo sottosuolo. Un ulteriore significativo incremento di IPL viene rilevato localmente nell'areale prossimo al parco Samuel Hahnemann e sottopasso ferroviario di Via Genghini (zona RNN\_02) nonché al confine settentrionale comunale in zona limitrofa alla Via Tolemaide-Scolo Pedrera Grande (zona RNN\_04).

Anche l'osservazione dei laboratori ciclici su campioni rappresentativi a disposizione porta ad evidenziare una modesta differenza di comportamento tra i depositi costieri di RNN e RNS, ove nel campo dei cicli di riferimento, il CRR rappresentativo per l'Unità A risulta lievemente più alto di quello corrispondente alla stessa unità presso RNN. Di contro dai provini propri dell'Unità B si evince un comportamento differente e per cui, quelli rappresentativi degli ambiti RNS, risultano moderatamente più resistenti allo sforzo ciclico rispetto a quelli prelevati presso RNN. Tale modesta differenza di comportamento può essere condizionata in qualche misura dalle differenze granulometriche, di tessitura e mineralogiche che contraddistinguono i depositi costieri a Sud e a Nord della foce del Marecchia.

Dalle risultanze dei laboratori ciclici effettuati tuttavia non è possibile apprezzare un evidente incremento di resistenza per puro fenomeno di "aging" passando dai settori di mare verso monte; diversamente l'aumento di resistenza ciclica in prossimità della paleofalesia sembrerebbe maggiormente imputabile ad un generale incremento dello stato di addensamento ed alla frequente presenza di tessiture più grossolane.

Anche i provini prelevati nell'ambito dell'Unità C (depositi alluvionali limo-argillosi alla base del cuneo sabbioso) presso RNS, evidenziano una significativa resistenza ciclica, sensibilmente superiore a quella delle sabbie costiere e di entità superiore ad almeno il 40% di quella propria dell'Unità A. Una verifica di resistenza residua post-ciclica (tramite prove TRX\_CIU) condotta su alcuni provini di tale Unità C, dopo aver superato raggiunto la deformazione assiale in doppia ampiezza pari al 5%, ha portato ad osservare una perdita di resistenza non drenata pari a circa il 25% della resistenza originaria.

In ultimo, dall'analisi granulometrica dei terreni campionati in occasione del presente studio (sondaggi S1 ed S2), tramite le formulazioni semplificate di Harzibaba 2005 (FCth-H05) e Rahman 2012 (FCth-R12), per i terreni delle Unità A e B è possibile individuare in prima approssimazione una soglia di contenuto in fine (FCth) oltre la quale il comportamento del materiale non è più governato dai contatti intergranulari dello scheletro solido grossolano ma dalla sempre più prevalente matrice fine. I valori riscontrati con tali metodologie per ciascuna Unità (A e B) presso RNN (sondaggio S2) e RNS (sondaggio S1) risultano:

Parametro	RNN_A	RNN_B	RNS_A	RNS_B
FCth-H05	0.27	0.28	0.28	0.28
FCth-R12	0.40	0.40	0.39	0.40

Pertanto entro i range di  $FC_{th}$  rilevati i metodi di verifica semplificati CPT risultano trovare una coerente applicabilità. L'analogia dei risultati conferma la modesta differenza tessiturale e granulometrica tra le sabbie del litorale a N e S di Rimini; ciò avvalorava il fatto per cui il differente comportamento fra i terreni dell'Unità A e B presso ciascuna zona, data la stessa natura litologica, possa essere prevalentemente imputabile al diverso rapporto nelle alternanze fra orizzonti di sabbie cernite e livelli maggiormente limosi (in termini di frequenza e spessore) nonché al relativo stato di addensamento.

Lungo il tratto costiero di RNC e RNN assume importanza la presenza locale di orizzonti ghiaiosi ad elevata resistenza ciclica e capacità di drenaggio in corrispondenza degli orizzonti basali del cuneo sabbioso marino o la presenza di strutture di paleoalveo nell'ambito dei livelli più superficiali (es. in prossimità del Portocanale, in località San Giuliano Mare, Rivabella o Viserba).

Quindi, per un giudizio complessivo circa i parametri di pericolosità stimati, osservando comparativamente i rispettivi risultati per ciascuna prova, si rileva quanto segue:

- In corrispondenza di zone o prove a medesimo grado di pericolosità per IPL, i valori di cedimento post-sismico atteso risultano sostanzialmente correlabili allo spessore dei materiali potenzialmente liquefacibili, fornendo un valore conservativo senza contemplare il rapporto fra strati liquefacibili/non liquefacibili e la relativa profondità; tale aspetto talora può comportare valori di cedimento non sempre direttamente proporzionali agli andamenti di IPL.
- IPL offre una stima pesata con la profondità del grado di pericolosità in funzione della presenza e spessore lungo la verticale dei vari orizzonti liquefacibili/non liquefacibili (discretizzati secondo le situazioni  $FS < 1$  o  $FS > 1$ ), consentendo di discriminare specifiche soglie di rischio secondo valori di riferimento riconosciuti nella comunità scientifica e professionale, a livello nazionale ed internazionale (IPL=0, 2, 5, 15, >15).
- LSN essendo un estimatore della severità di danno atteso in superficie risulta maggiormente sensibile allo spessore della crosta superficiale, al rapporto fra strati liquefacibili/non liquefacibili e alla relativa profondità. LSN segue generalmente i trend di pericolosità evidenziati da IPL ma rispetto a quest'ultimo, poiché  $\varepsilon_v$  varia in modo maggiormente progressivo in funzione dell'entità del fattore di sicurezza alla liquefazione, talora risulta esaltare maggiormente (in eccesso o in difetto di pericolosità) situazioni stratigrafiche specifiche.
- A fronte di valori di IPL generalmente caratterizzanti un rischio Alto ( $5 < IPL \leq 15$ ) ed a tratti Molto Alto ( $IPL > 15$ ), le caratteristiche geomeccaniche e stratigrafiche dei depositi costieri di Rimini in tali zone determinano valori di LSN e di cedimento massimo generalmente riconducibili a manifestazioni con grado/severità di danneggiamento atteso da basso a medio, quest'ultimo soprattutto nei casi di maggior spessore dei depositi. Solo in corrispondenza delle zone con maggior spessore delle sabbie congiuntamente a bassi valori di resistenza ciclica si perviene alla stima di possibili manifestazioni di liquefazione severe (particolarmente in corrispondenza di alcuni settori presso RNC e RNS\_01).



- Lungo le fasce estese al piede della paleo falesia, caratterizzate da un rischio Basso ( $IPL \leq 2$ ) o Moderato ( $2 < IPL \leq 5$ ), in virtù anche del minor spessore del prisma sabbioso e di evidenze di un maggior grado di resistenza ciclica, i valori di LSN e di cedimento massimo coerentemente evidenziano un grado/severità di danneggiamento atteso generalmente basso, con possibilità di minime - modeste espressioni di liquefazione.
- Talora in corrispondenza dei lungomari e delle zone immediatamente limitrofe è possibile stimare valori di IPL inferiori alle medie della zona di appartenenza in quanto tali settori generalmente risultano morfologicamente corrispondenti alla posizione della “duna principale”, topograficamente un poco più rilevati rispetto alle prospicienti zone a mare e monte della stessa e, quindi, caratterizzati da una maggiore soggiacenza della falda (da pochi decimetri ad oltre 1 m) e da orizzonti sabbiosi superficiali dell’Unità A un poco più addensati rispetto alle aree limitrofe.

Chiaramente gli scenari attesi e derivabili dai metodi semplificati possono essere significativamente influenzati da ulteriori variabili sito specifiche e sismogenetiche quali:

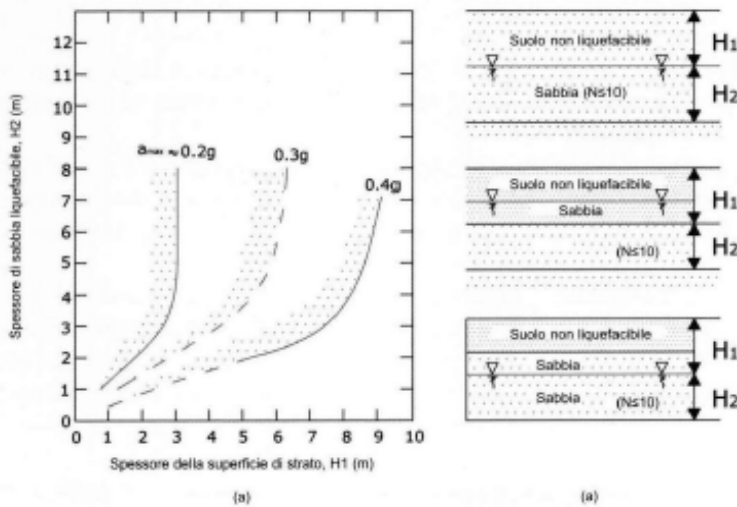
- Fenomeni di direzionalità dell’azione sismica e tipologia di faglia
- Distanza epi/ipocentrale, contenuto in frequenza, durata della fase forte, ecc.
- condizioni idrogeologiche e/o di drenaggio locale
- configurazioni geomorfologiche particolari e/o mancanza di contenimento laterale dei terreni (es. presenza di declivio, corsi d’acqua di significative dimensioni e profondità, banchine portuali, strutture arginali, ecc.)
- presenza di carichi piezometrici e/o falde in pressione
- presenza di gas nel sottosuolo
- fenomeni di interazione terreno struttura e/o presenza di sovraccarichi o carichi concentrati
- preesistenza di sforzi di taglio in condizioni statiche

In allegato n. 6 si riportano i report sintetici delle verifiche a liquefazione effettuate su ciascuna area, mentre in allegato n. 7 vengono illustrate le tabelle parametriche riepilogative di tutti i corrispondenti valori di IPL, LSN e cedimento calcolati per ciascuna zona di RSL ed in condizioni di campo libero (free-field).

*Qualora opere edilizie, infrastrutture o aree di previsione urbanistica ricadano a cavallo dei limiti di potenziale di liquefazione di riferimento (es.  $IPL=2$  o  $IPL=5$ ) e/o di zone caratterizzate da differente fattore di amplificazione sismica, sarà opportuno associare ad esse il parametro di pericolosità più conservativo nell’ambito di variazione; nel caso le aree o infrastrutture interessate da tale intersezione risultino di significativa estensione, tale approccio andrà adottato per un congruo tratto od estensione funzionale al mantenimento delle prestazioni attese per l’infrastruttura e/o area interessata.*

Valutazione delle manifestazioni superficiali in funzione del rapporto fra lo spessore dello strato superficiale non liquefacibile e quello sottostante liquefacibile

Accelerazione [gal] 1 gal = 1 cm/s <sup>2</sup>	Condizione	Propagazione della liquefazione verso l'alto	Manifestazioni superficiali
200	$h_1 \geq 3 \text{ m e } h_2 < 3 \text{ m}$	IMPEDITA	NO
	$h_1 \leq 3 \text{ m e } h_2 > 3 \text{ m}$	NON IMPEDITA	SI
300	$h_1 < 5 \text{ m e } h_2 > 4 \text{ m}$	NON IMPEDITA	SI
	$h_1 > 5 \text{ m e } h_2 < 4 \text{ m}$	IMPEDITA	NO
400 - 500	$h_1 < 7 \text{ m e } h_2 > 3 \text{ m}$	NON IMPEDITA	SI
	$h_1 > 7 \text{ m e } h_2 < 3 \text{ m}$	IMPEDITA	NO



Relazione fra lo spessore dello strato liquefacibile e lo spessore dello strato sovrapposto (Ishihara, 1985)

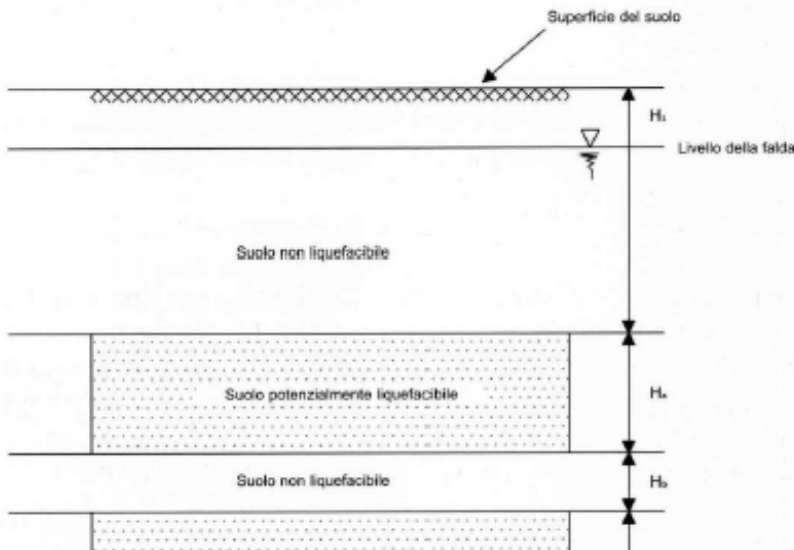


Figura 10.6 – Schema per la valutazione delle manifestazioni superficiali per liquefazione (Crespellani et. al. 1988; Ishihara, 1985; Youd e Garri 1994, 1995)

### *10.3 Verifica di risposta sismica locale in tensioni efficaci*

In corrispondenza della zona RNN\_04, a titolo di verifica su di un'area campione, è stata condotta un'analisi di risposta sismica locale 1D tramite metodo non lineare in tensioni efficaci, con l'ausilio del codice di calcolo DEEPSOIL v7.0.30 (Hashash et al., 2020); tale verifica, è stata condotta col fine principale di verificare il rischio per liquefazione preventivamente stimato entro l'area di interesse con l'ausilio del metodo semplificato CPT R09. Il comportamento isteretico non lineare è stato simulato tramite il modello iperbolico MKZ (Matasovic N, Vucetic M.,1993), secondo le regole modificate di Masing (Phillips C, Hashash YMA, 2009), mentre l'accumulo e dissipazione delle sovrappressioni sismicamente indotte nelle sabbie è stato stimato tramite metodo semplificato PWP (pore water pressure) calibrato su curve di resistenza ciclica caratteristiche per i terreni in esame secondo la procedura di Park & Ahn (2013). Diversamente il comportamento dei depositi coesivi limoso-argillosi sottostanti è stato calcolato con l'ausilio del modello di Matasovi e Vucetic (1995) calibrato attraverso le correlazioni empiriche di Carlton (2014). Il processo di dissipazione delle sovrappressioni (lungo la sola direzione verticale) è invece basato sulla teoria della consolidazione monodimensionale di Terzaghi (1943).

La calibrazione delle sabbie A e B è stata effettuata avvalendosi di provini di terreno rappresentativi a basso grado di disturbo (contraddistinti da una maggior resistenza ciclica rispetto ai corrispondenti provini ricostituiti, solitamente rappresentativi di condizioni più afferenti al lower bound della resistenza ciclica caratteristica di un determinato materiale).

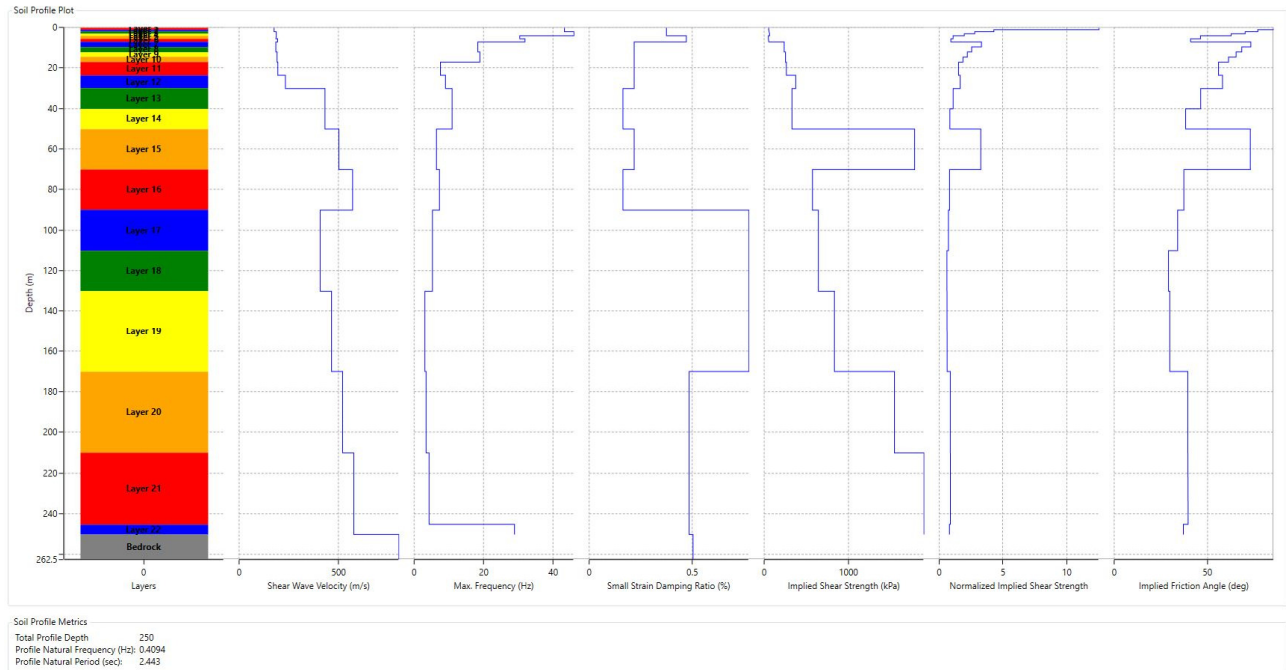
Il profilo analizzato è quello corrispondente ad RNN\_04 (figura 10.7a) già analizzato tramite software Strata con metodo lineare equivalente (EQL), adottando i medesimi accelerogrammi di input ed in figura 10.7b vengono riportati i profili finali ottenuti in termini di: accelerazione (g), spostamento (m), deformazione di taglio massima (%), sforzo di taglio (ad) e massima sovrappressione (Max PWP Ratio = Ru).

Da tali profili è possibile individuare lo sviluppo di significative deformazioni di taglio nell'ambito dei terreni incoerenti saturi superficiali (Unità A e B), coerentemente al generale sviluppo di elevate pressioni dei pori ( $0.85 < Ru < 1.0$ ) (in funzione dell'accelerogramma di riferimento) e, quindi, al conseguente sviluppo di significativi spostamenti finali attesi. Data la significativa non linearità del comportamento atteso in superficie con lo sviluppo di sovrappressioni attese, i fenomeni amplificativi in termini di PGA rimangono maggiormente inibiti (se non a tratti deamplificati) rispetto a quanto stimato con modello 1D EQL.

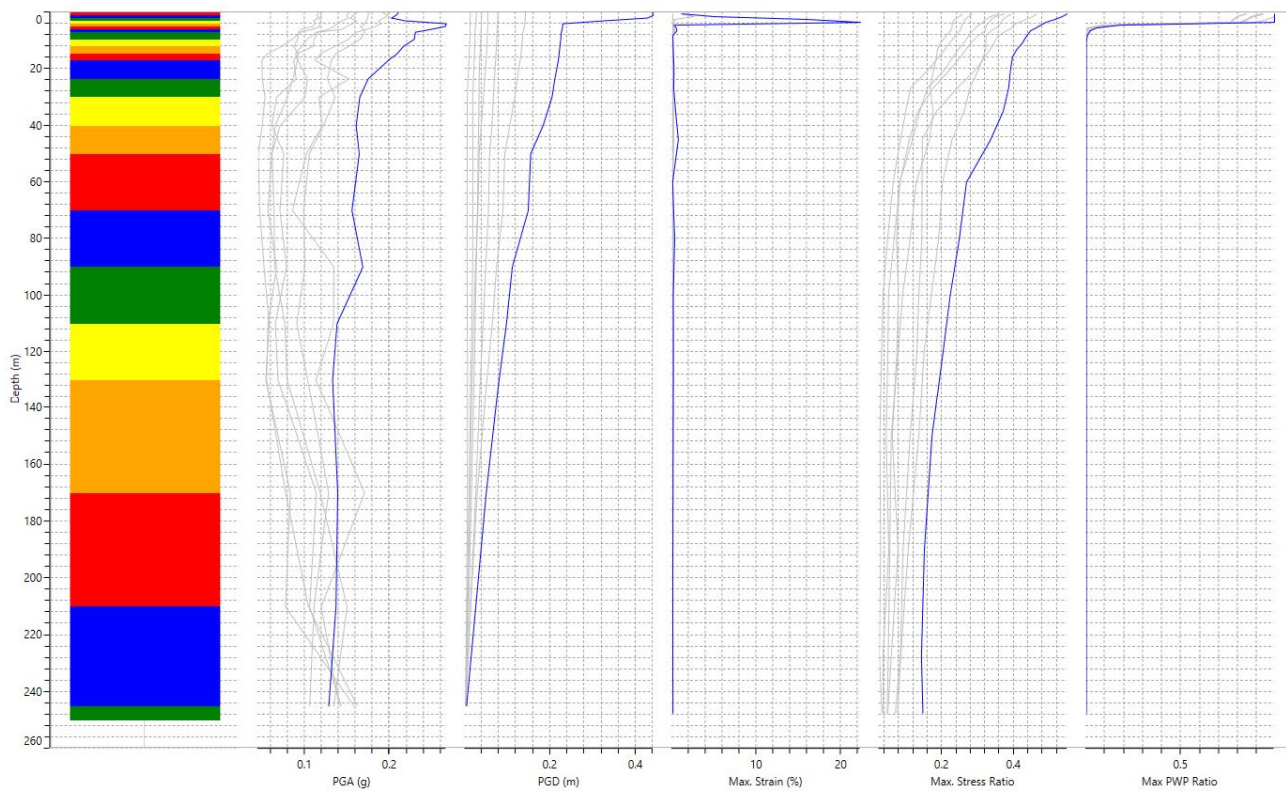
Tutto ciò, nel punto di verifica, evidenzia la potenziale suscettibilità delle sabbie a sviluppare significativi livelli deformativi e conseguenti sovrappressioni (in condizioni free field) sotto l'azione del sisma di progetto, supportando di fatto la stima del rischio per liquefazione ivi condotta tramite i metodi semplificati CPT adottati e risultato generalmente "Alto".

*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Rimini (RN)*  
**Relazione Tecnico Illustrativa**

**Soil Profile Definition**



**a)**



**b)**

*Figura 10.7 – Profili rappresentativi di modello (a) e di output (b) per l'analisi di RSL non lineare ed in tensioni efficaci in corrispondenza della zona RNN\_04*

#### *10.4 Modello RSL 2D*

In sede di offerta migliorativa si è proposta la realizzazione di un modello per l'analisi di risposta sismica locale tramite modello bidimensionale (2D) lungo il tratto costiero di Rimini a Sud del porto canale (Zone RNS\_01 – 05). Tuttavia sulla scorta dell'assetto geologico/morfologico rilevato e delle indagini eseguite non sono emerse condizioni tali da richiedere l'adozione di tale modello per la stima della risposta sismica di sito; tale modellazione infatti, soprattutto per situazioni puntuali ed in assenza delle condizioni che ne giustificano l'utilizzo, in virtù della sua estensione e delle necessarie approssimazioni, nonché per le intrinseche caratteristiche e complessità di calcolo, rischia di introdurre maggiori incertezze rispetto ai modelli 1D, caratterizzabili invece con una miglior risoluzione stratigrafica.

Infatti in tale contesto, data la modesta differenza di profondità del bedrock e dei relativi contrasti di rigidità sismica, l'assenza di elementi morfologici che possono determinare amplificazione significative, di geometrie sepolte e/o contatti laterali fra litotipi con caratteristiche fisico – meccaniche molto diverse, risulta maggiormente condizionante il comportamento dinamico (in termini di profilo di rigidità e curve di decadimento/damping) delle prime decine di metri di sottosuolo più superficiali. Questi ultimi infatti, a livello locale, risultano determinati più che altro dallo spessore e stato di addensamento dei materiali incoerenti del prisma sabbioso costiero e dal grado di consistenza dei litotipi prevalentemente coesivi (generalmente variabile con la profondità e pressioni di confinamento) costituenti il letto alluvionale.

In ogni caso il modello 2D è stato sviluppato al fine di valutare le condizioni generali supposte e la sostanziale coerenza con i profili 1D illustrati al par. 10.1.3 - 10.1.4.

Pertanto in tale contesto costiero, a meno di situazioni geomorfologiche o aspetti progettuali particolari, onde evitare l'introduzione di ulteriori variabili e di elementi di incertezza, si ritiene opportuna l'adozione di modelli di analisi 1D ben calibrati su indagini in sito e di laboratorio.

#### *ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE 2D*

##### *Modellazione numerica e codice di calcolo*

Le analisi numeriche sono state condotte in primis tramite il codice di calcolo bidimensionale LSR2D (Stacec srl), in licenza al dott. Alessandro Merli, effettuando lungo la "Sez. 2D", di congrua lunghezza (per limitare gli effetti di bordo ed apprezzare le variazioni laterali), un'analisi agli elementi finiti in condizioni "lineari equivalenti".

Secondo tale approccio il deposito è stato discretizzato tramite una mesh di elementi di forma triangolare, consentendo una efficace modellazione della variazione geometrica del contatto deposito-basamento, così come delle irregolarità della superficie topografica e dei contatti stratigrafici. La generazione della mesh è una delle fasi più delicate dell'analisi, dipendendo da essa sia l'accuratezza della soluzione e sia l'onere computazionale. In generale si può affermare che tanto più la mesh è fitta tanto più la soluzione è accurata e tanto maggiori sono il tempo e la memoria richiesta dall'elaborazione. L'utilizzo di una mesh

eccessivamente grossolana si traduce in un filtraggio delle componenti di alta frequenza poiché le piccole lunghezze d'onda non possono essere adeguatamente modellate da nodi troppo distanti tra loro.

L'altezza  $h$  di ogni elemento deve essere scelta in modo che risulti:

$$h \leq \left(\frac{1}{8} \div \frac{1}{5}\right) \frac{V_s}{f_{max}}$$

dove:

- $h$ : passo della mesh.
- $V_s$ : velocità di propagazione delle onde di taglio nel mezzo discretizzato.
- $f_{max}$ : frequenza max considerata nell'analisi (generalmente pari a 20-25 Hz).

Nel caso in studio, in relazione allo spessore dei sismostrati e della necessità di valutare adeguatamente la risposta sismica anche per strutture caratterizzate da modi di vibrare caratteristici con periodi  $T \geq 0.15$  sec. quali ad es. edifici ordinari in muratura e c.a. di vecchia e recente realizzazione di 1-2 piani), è stata adottata una mesh con passo  $h \leq 5$  mt, localmente raffittita in funzione dello spessore degli strati e delle irregolarità stratigrafiche (vedi figura 10.8).

*La dimensione della sezione e la scala del modello ha imposto la necessità di rappresentare i sismostrati rappresentativi accorpendo e mediando (con media equivalente) le caratteristiche dei vari orizzonti litostratigrafici ed a comportamento dinamico omogenei.*

Inoltre, considerata la grande estensione del tratto costiero (circa 7400 m) e relativo assetto stratigrafico (esteso sino a profondità di 200-250 m), la necessità di mantenere le idonee condizioni di calcolo ha determinato la generazione di una mesh caratterizzata da un grandissimo numero di nodi e triangoli, con un onere computazionale non gestibile con strumenti di calcolo ordinari. In conseguenza di ciò e delle evidenze di indagine geologica e geofisica, si è optato di concentrare l'attenzione sulla sola zona RNN\_03, centrale e ritenuta sufficientemente rappresentativa per una valutazione qualitativa dell'assetto generale; per cui la zona modellata (RNN\_03) presenta un fronte con estensione lineare di 1772 m e profondità media dei depositi soprastanti il bedrock sismico pari a circa 190 m (vedi figura 10.8). Tale modello 2D è stato sviluppato sulla scorta di n. 144889 nodi e n. 287862 triangoli della mesh, determinando un deposito con frequenza fondamentale propria pari a circa  $f_0 = 0.45$  Hz ( $T \approx 2.23$  s) e secondaria pari a circa  $f_1 \approx 4$  Hz.

La caratterizzazione dei sismo strati è avvenuta con i medesimi parametri e curve di degrado/damping adottate per le simulazioni 1D e la colonna (colonna 3) e punti di controllo (P6) dei risultati sono stati posizionati in prossimità del centro della sezione per ovviare agli effetti di bordo, sempre presenti (talora anche in misura significativa) nei modelli multidimensionali.

Le equazioni del moto sono risolte nel dominio del tempo attraverso il calcolo con il metodo di Newmark ed in modo particolare con il metodo CAA (Constant Average Acceleration Method) che è incondizionalmente stabile e non introduce alcun damping numerico.

Il moto sismico di input viene applicato simultaneamente a tutti i nodi della base sotto forma di onde trasversali SV e/o onde di compressione P (in plane motion) con direzione di propagazione verticale ed ha il significato fisico di un moto registrato su affioramento piano del basamento (outcropping bedrock).

In ogni problema di propagazione di onde sismiche, parte dell'energia si allontana indefinitamente dalla regione di interesse verso il semispazio circostante. L'estensione finita della zona discretizzata comporta necessariamente la presenza di confini che devono modellare il più accuratamente possibile questa aliquota di energia persa per radiazione. Questa situazione è stata risolta attraverso l'applicazione di smorzatori viscosi anche ai lati del modello, simulando dunque le perdite per radiazione di energia appena evidenziate.

La non linearità del terreno viene tenuta in conto attraverso l'esecuzione di analisi lineari equivalenti. Il modulo di taglio  $G$  e il rapporto di smorzamento  $D$  vengono fatti dipendere dal livello della deformazione tangenziale  $\gamma$  indotta dalle sollecitazioni sismiche. A partire dai valori iniziali dei parametri di rigidità e smorzamento, con una prima analisi si determina, per ciascun elemento, un primo valore caratteristico (o effettivo) della deformazione tangenziale  $\gamma_{eff}$ . Dalle curve  $G/G_0 - \gamma$  e  $D - \gamma$  si determinano nuovi valori dei parametri dinamici, le matrici di rigidità e smorzamento di ciascun elemento vengono aggiornate e si esegue una nuova analisi determinando un nuovo valore caratteristico. Il procedimento viene ripetuto fino a quando lo scarto percentuale tra i valori di  $G$ ,  $D$  e  $\gamma_{eff}$  viene ritenuto arbitrariamente accettabile. In genere 5-6 iterazioni sono sufficienti per contenere gli scarti in poche unità percentuali, anche nel caso di comportamenti marcatamente non lineari. Il valore caratteristico  $\gamma_{eff}$  è un valore considerato mediamente rappresentativo della storia temporale  $\gamma(t)$  irregolare cui è soggetto il generico elemento, ed è espresso come un'aliquota  $\alpha$  costante del valore massimo di  $\gamma(t)$ .

Le proprietà dissipative del terreno sono modellate attraverso la matrice di dissipazione denominata "C". Essa deriva dall'assemblaggio delle matrici di dissipazione dei singoli elementi calcolate secondo la formulazione di Rayleigh completa.

L'adozione di una formulazione alla Rayleigh comporta uno smorzamento dipendente dalla frequenza che può condizionare in maniera sensibile i risultati di un'analisi numerica. Per minimizzare tale variazione i coefficienti di Rayleigh vengono calcolati in funzione delle frequenze naturali dell'intero deposito.

In definitiva il software richiede in input, per ciascun materiale, i seguenti parametri:

- peso dell'unità di volume, modulo di taglio e smorzamento a basse deformazioni, coefficiente di Poisson dei materiali;
- la curva di attenuazione con il livello di deformazione tangenziale del modulo di rigidità, normalizzata rispetto al valore iniziale ( $G/G_0$ );
- la curva di variazione del rapporto di smorzamento con il livello di deformazione tangenziale ( $D\%$ );

- la costante  $\alpha$  per il calcolo del valore caratteristico della deformazione tangenziale (effective strain ratio) a partire dal valore massimo di  $\gamma(t)$  (in genere con la regola di Idriss-Sun 1992 pari a  $\alpha = (M_w - 1)/10$  in cui  $M_w =$  magnitudo); nel caso in esame, assumendo  $M_w = 6.14$ , risulta  $\alpha = 0.51$  (strain ratio).

In uscita il codice fornisce:

- Accelerazioni massime in tutti i nodi della mesh.
- Sforzi e deformazioni tangenziali massime in ciascun elemento.
- Storia temporale dell'accelerazione nei nodi selezionati (componenti verticali e orizzontali).

Parallelamente, onde verificare la coerenza delle analisi e della modellazione della mesh in relazione all'assetto geologico-stratigrafico, su alcune verticali caratteristiche sono state condotte analisi numeriche in condizioni monodimensionali tramite il codice STRATA (Kottke e Rathje, 2008), che modella una colonna di terreno come un continuo stratificato a comportamento visco-elastico lineare ed in cui le equazioni del moto sono risolte nel dominio della frequenza attraverso il calcolo e la successiva convoluzione delle funzioni di trasferimento di ogni strato, analogamente a quanto fatto dal ben noto codice di calcolo SHAKE91 (Idriss e Sun, 1992). Anche tale metodologia, di tipo iterativo, utilizza l'approccio lineare equivalente considerando i medesimi dati di input ed al contorno, utilizzando una suddivisione "semplificata" in sismostrati alla stregua di quanto modellato col codice bidimensionale.

La comparazione, oltre a validare i risultati ottenuti, ha altresì consentito di verificare settori in cui è possibile attendersi effetti amplificativi e/o di modifica del moto sismico imputabili a condizioni propriamente 2D per motivi morfologico/stratigrafici e/o topografici.

Generalmente l'entità di questi effetti di valle dipende dalle caratteristiche geometriche della struttura ed in particolare dal rapporto  $H/L$  (Shape Ratio) secondo una regola generale che considera:

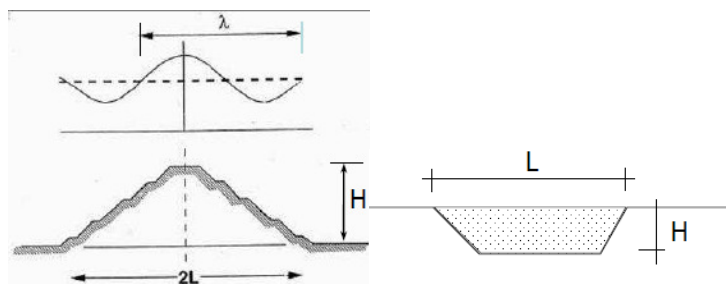
$$v_0 = \sqrt{1 + \left(2.9 \frac{H}{L}\right)^2}$$

ove

$v_0$  = frequenza fondamentale deposito

$H$  = altezza rilievo – profondità massima valle

$L$  = semilarghezza valle – semilarghezza rilievo



Normalmente si ritiene accettabile una modellazione monodimensionale fintanto che il rapporto  $H/L < 0.1 - 0.2$ , ma avvicinandosi ai bordi della valle per via della possibile focalizzazione delle onde sismiche (interferenza tra campo d'onda riflesso e rifratto e sulla generazione delle onde di superficie su superfici non piane) i modelli 1D, soprattutto in particolari condizioni stratigrafiche, generalmente non sono in grado di simulare adeguatamente il moto sismico.



Gli effetti della topografia sono significativi quando le dimensioni delle irregolarità sono simili a quelle della lunghezza d'onda delle fasi sismiche incidenti per cui  $2L \approx \lambda$  ove  $L$  è la semilarghezza del rilievo e  $\lambda = V/v$  è la lunghezza d'onda della sollecitazione. Generalmente l'effetto è massimo quando  $f=2$ , in cui  $f=2L/\lambda$

**In questo caso la morfologia è sub orizzontale, per cui non sussistono le condizioni morfologiche amplificative di tipo 2D.**

Per la comparazione dei risultati è stata identificata la verticale e nodo di riferimento rispettivamente denominati “Colonna 3” e “Punto 6” presso il centro della sezione (vedi figura 10.8).

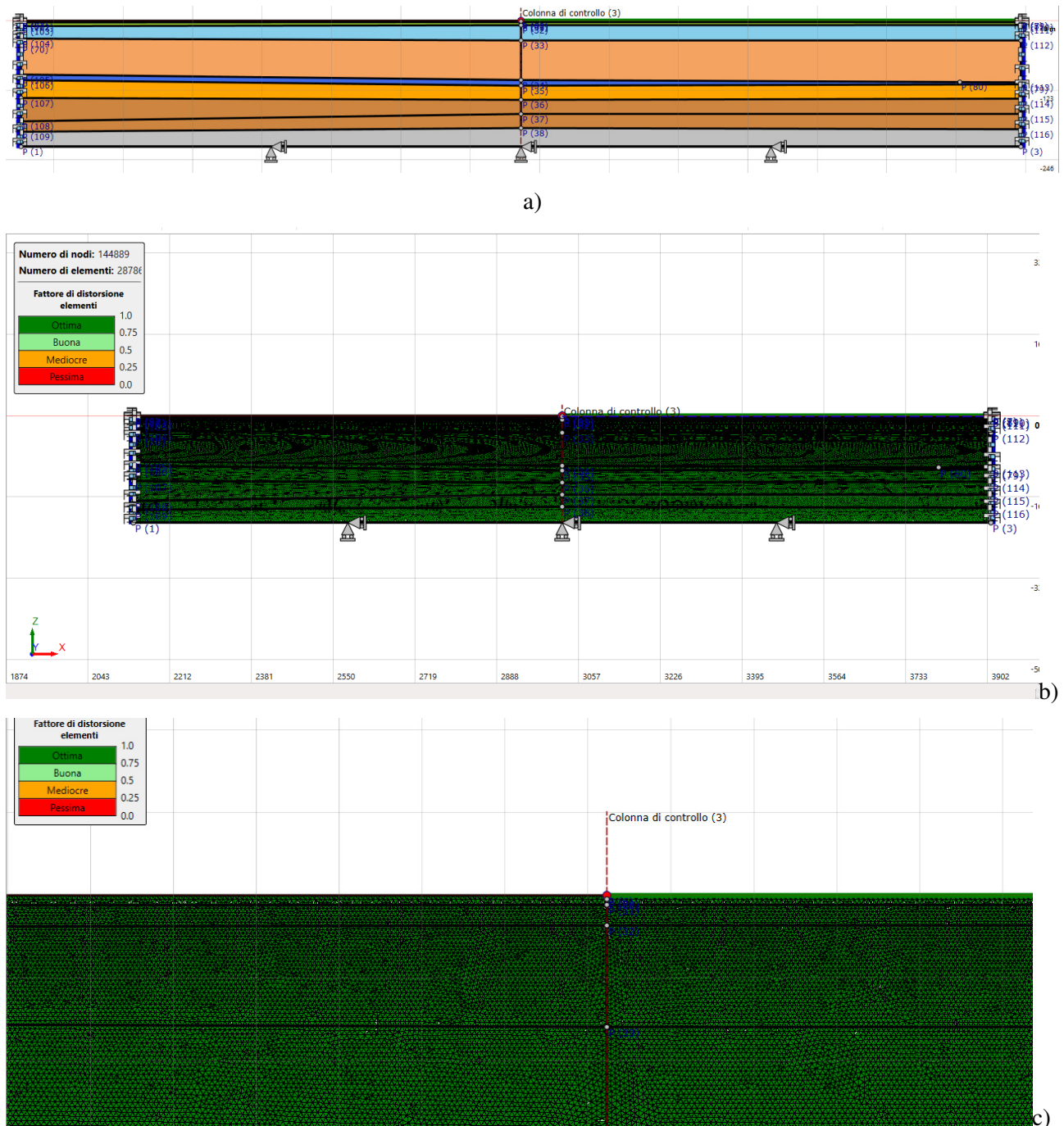
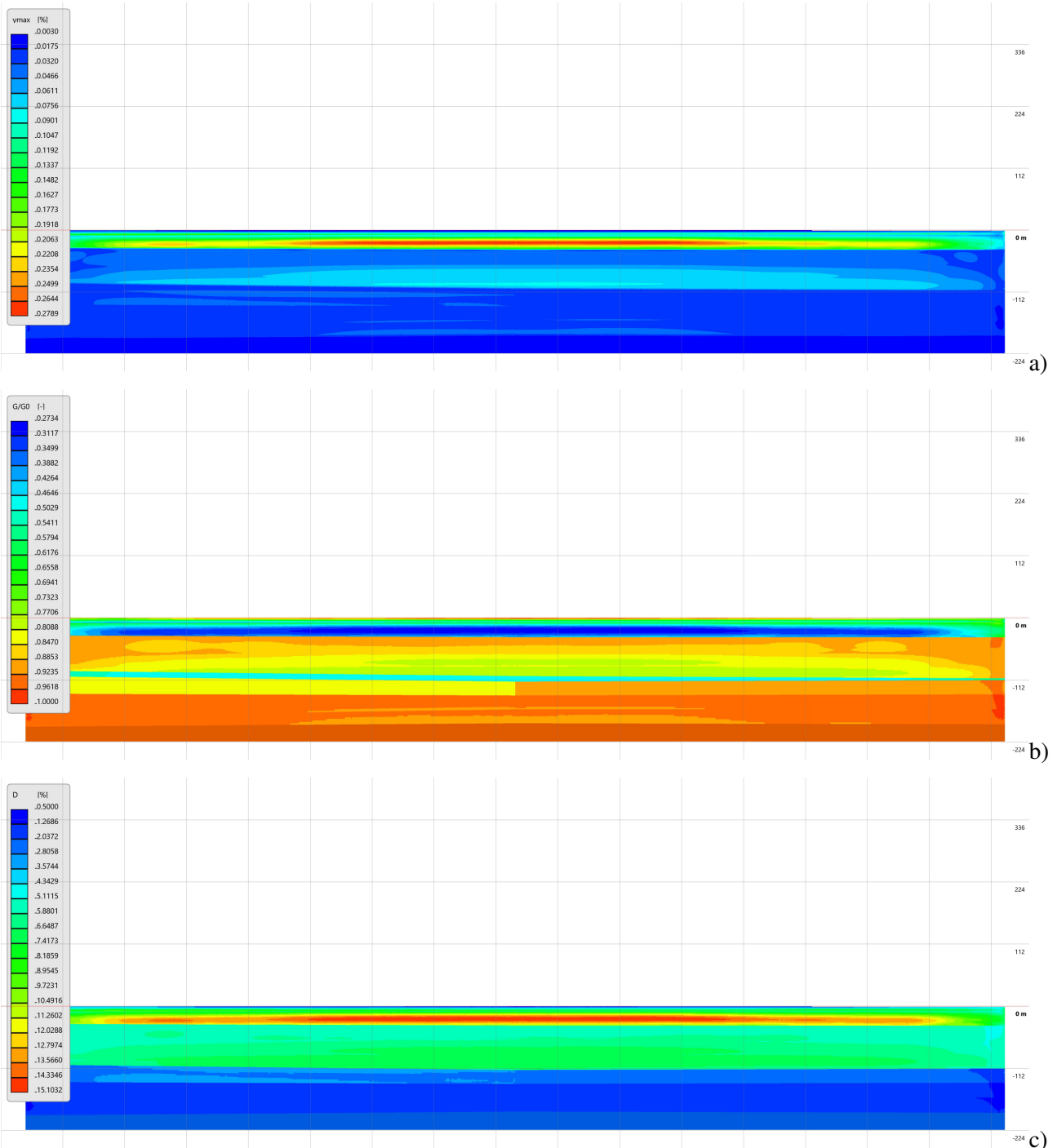


Fig. 10.8 – Discretizzazione modello elementi finiti (FEM) con relative condizioni al contorno a) e mesh b) della sezione RNN\_03 in studio con particolare della colonna e punti di controllo c).

*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Rimini (RN)*  
Relazione Tecnico Illustrativa

A titolo di esempio i risultati di analisi rappresentati nella sezione di figura 10.9, in termini di andamento della deformazione di taglio massima, degradazione del modulo  $G/G_0$ , damping (%) e accelerazione massima (g) indotti nel deposito dall'accelerogramma TR475\_ID18968\_1, evidenziano come l'alterazione del moto sismico venga prevalentemente condizionata dai contrasti di rigidità fra sismostrati e dal loro rapporto con il bedrock sismico (in termini di rigidità sismica e profondità); ciò risulta sostanzialmente coerentemente a quanto rilevabile nei profili di analisi 1D rappresentati al Par. 10.1.



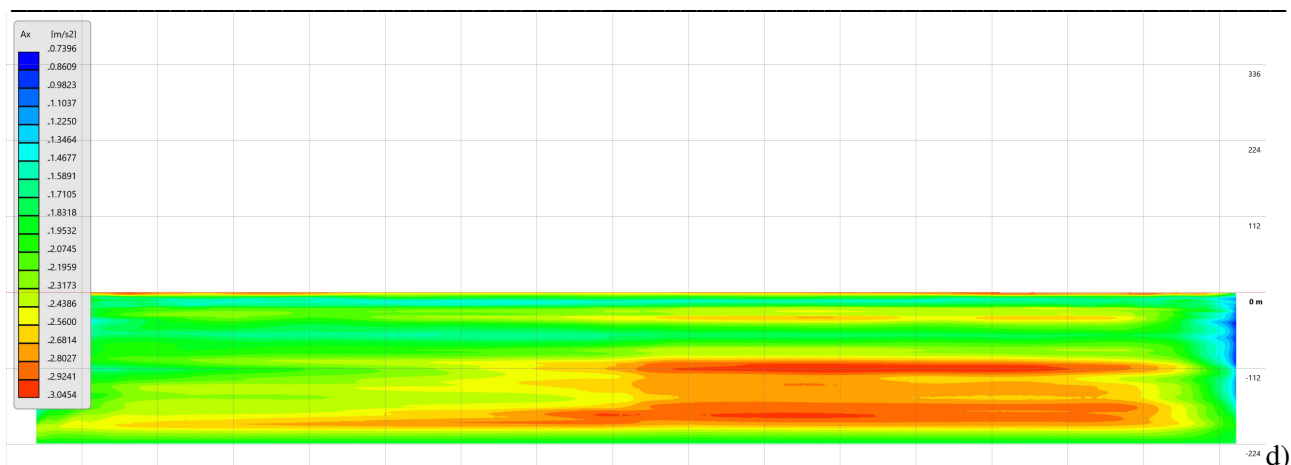


Fig. 10.9 – Sezione di analisi in termini deformazione di taglio max a), degradazione del modulo  $G/G_0$  b), damping (%) c) e accelerazione massima d).

A tal proposito, alla luce delle variabili ed incertezze di modello, si rileva come i valori di PGA stimati alla superficie libera in corrispondenza del *Punto 6* e *Colonna di controllo 3* siano sostanzialmente comparabili fra modello 1D (con stratigrafia semplificata) e 2D, risultando rispettivamente pari a  $PGA_{1D}=0.252$  g e  $PGA_{2D}=0.259$  g

#### CONSIDERAZIONI ANALISI RSL 2D

I dati numerici relativi ai fattori di amplificazione ed alla PGA attesa al sito di controllo, anche in relazione al confronto tra condizioni 1D e 2D, pongono in evidenza i seguenti aspetti:

- A. la sezione analizzata è adeguatamente rappresentativa per una definizione del modello geofisico locale e le frontiere laterali, in virtù delle caratteristiche e significativo spessore dei depositi deformabili, sembrano apportare elementi di alterazione “artificiale” al moto sismico atteso (imputabile al filtraggio degli smorzatori viscosi propri del modello di calcolo); in ogni caso tali frontiere non vengono considerate per un confronto dei risultati rappresentativi.
- B. la necessità di confrontare analisi 1D e 2D su un ambito di grande estensione e profondità impone una semplificazione dei modelli di calcolo, consentendo un confronto qualitativo al fine di appurare la presenza o meno di significativi effetti di amplificazione per caratteristiche morfologiche e/o stratigrafiche;
- C. la PGA rilevata ai punti di controllo è sostanzialmente comparabile;
- D. la morfologia sub orizzontale e la sostanziale regolarità geometrica dei sismostrati sono tali da non evidenziare significative condizioni amplificative di tipo 2D;
- E. in relazione all’assetto stratigrafico e morfologico generale i risultati ottenuti arealmente risultano sostanzialmente coerenti con situazioni di analisi monodimensionale (1D). In tal caso l’azione sismica risulta prevalentemente condizionata dall’assetto stratigrafico e dall’entità dei contrasti di impedenza tra i sismostrati e dalla posizione del bedrock sismico rispetto alla superficie libera.

In relazione all'assetto stratigrafico e morfologico generale, ad eccezione della zona di chiusura delle alluvioni e delle scarpate morfologiche di cui sopra, i risultati ottenuti arealmente risultano sostanzialmente coerenti con situazioni di analisi monodimensionale (1D). In tal caso l'azione sismica risulta prevalentemente condizionata dall'assetto stratigrafico e dall'entità dei contrasti di impedenza tra i vari strati rappresentativi ed il bedrock sismico ovvero dalla posizione (profondità) di quest'ultimo rispetto alla superficie libera.

Pertanto, considerato che:

- le zone sottoposte a 3° Livello di approfondimento, secondo cui è stato discretizzato il litorale sulla base alle indagini geognostiche e geofisiche utilizzate, sono state definite secondo un adeguato grado di omogeneità geologico-strutturale e geomorfologica;
- la morfologia sub-orizzontale e la sostanziale regolarità geometrica dei sismostrati sono tali da non evidenziare significative condizioni amplificative di tipo 2D;
- le risultanze di analisi fra modelli 1D e 2D risultano sostanzialmente coerenti;
- I modelli di analisi 1D consentono generalmente una maggior dettaglio/risoluzione stratigrafica puntuale con minori incertezze/variabili di modello;

*per la stima delle azioni sismiche e fattori di amplificazioni attesi agli scopi del presente studio, si ritiene adeguato e coerente far riferimento alla discretizzazione in microzone ed ai relativi risultati di analisi 1D riportati al Paragrafo 10.1 ed ai relativi allegati n. 4 e 5.*

## **11. CONFRONTO CON LA DISTRIBUZIONE DEI DANNI DEGLI EVENTI PASSATI**

Come già ampiamente trattato nel precedente capitolo 3, le informazioni relative agli eventi sismici di riferimento per il territorio comunale di Rimini, sono state desunte prioritariamente dall'analisi del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15) che fornisce dati parametrici omogenei, sia macrosismici, sia strumentali, relativi ai terremoti con intensità massima > 5 o magnitudo > 4.0 di interesse per l'Italia nella finestra temporale 1000-2019 e che si riferisce al DataBase Macrosismico Italiano 2015 (DBMI15) vers. 3.0. La consultazione per località di tale catalogo, disponibile liberamente all'indirizzo <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15>, ha fornito i risultati già mostrati nel Capitolo 3.

La costa romagnola è stata colpita in passato da terremoti rovinosi, i cui effetti sul tessuto economico-sociale e sull'ambiente costruito sono descritti in modo dettagliato nelle

cronache e nei documenti coevi a partire dal XVII° secolo, sebbene vi siano informazioni significative già a partire dal sisma del 1308.

In particolare vi è testimonianza dei danni ai monumenti ed ai beni storico-culturali prodotti dai terremoti del 1672, del 1786, del 1875 e del 1916. A titolo di esempio in Figura 11.1 sono localizzati gli edifici di culto e i palazzi di Rimini danneggiati dal terremoto del 1672 (Guidoboni e Ferrari, 1986).



*Figura 11.1: Localizzazione degli edifici di culto e dei palazzi maggiormente colpiti dal terremoto del 14 aprile 1672 nella città storica di Rimini (da Guidoboni et al., 1986)*

Ulteriori informazioni sui terremoti storici di Rimini sono reperibili in altre pubblicazioni quali: "Il terremoto di Rimini e della costa romagnola: 25 dicembre 1786" e "San Marino e il terremoto".

In sintesi, il territorio riminese è soggetto ad una sismicità rilevante sia in termini di frequenza che di energia. Dai cataloghi storici (Stucchi et al., 2007) risulta infatti che negli ultimi secoli la città di Rimini è stata interessata da vari terremoti di magnitudo stimata tra 5,5 e 6, che hanno causato effetti di intensità fino a IMCS = VIII (PSC Rimini, 2009).

Nell'areale comunale però i dati macrosismici sufficientemente dettagliati e con una densità spaziale tale da poter distinguere e quantificare aree a differente comportamento di risposta sismica locale, ciò in virtù sia

delle diverse tipologie edificatorie oggetto di segnalazione che dello stato di conservazione del patrimonio edilizio riferibili alle singole cronache storiche. In queste ultime tuttavia, in alcuni casi, è possibile individuare descrizioni di effetti cosismici distintivi come ad es. fenomeni di liquefazione e/o idrogeologici particolari, frane, eventi di maremoto, ecc. (CFTI5Med, Catalogo dei Forti Terremoti in Italia (461 a.C.-1997) e nell'area Mediterranea (760 a.C.-1500) - INGV).

Chiaramente le informazioni più estese e dettagliate, seppur sostanzialmente descrittive, si possono desumere dagli eventi sismici più recenti quale il terremoto del 1916. Al proposito risultano particolarmente interessanti le descrizioni di G. Alfani (Note ed osservazioni sui terremoti della regione litoranea Adriatica nell'agosto 1916, Pubblicazioni dell'Osservatorio Ximeniano dei PP. Scolopi, n.122. Firenze 1916), il quale percorrendo il luoghi del terremoto da Nord a Sud (da Rimini a Fano) e raccogliendo le modeste informazioni strumentali dell'epoca, annota la situazione generale ed i particolari effetti cosismici caratteristici di cui, in particolare per l'areale costiero fra Rimini e Cattolica, ne riportiamo alcuni cenni:

Credo di poter rispondere con una certa sicurezza, che la più intensa fu quella del 16 agosto. Infatti (a parte i danni più gravi i quali potevano essere anche dovuti alle lesioni sofferte nei fabbricati per la scossa precedente), l'ampiezza dei tracciati risulta rispettivamente nelle macchine dell'Osservatorio Ximeniano, e di Imola come segue :

OSSERVATORIO XIMENIANO

IMOLA

17 Maggio 1916, ampiezza 194 mm.

17 Maggio, 128 mm.

16 Agosto 1916, - » 200 »

16 Agosto, 138 »

moto sismico: ma ho semplicemente adottata la nota relazione di West; la quale si attaglia assai bene e fornisce dei risultati assai buoni. Con essa, dunque, ho ricavato che il valore di accelerazione in quel punto fu di circa 1590 mm. sec.<sup>2</sup>

Questo valore è del resto molto verosimile, quando si rifletta ai danni causati e si faccia un confronto sommario con i valori e con le rovine dei terremoti di Messina e di Avezano, dove le accelerazioni furono calcolate rispettivamente 2000 e 3500 mm. sec.<sup>2</sup>

All'esterno i fabbricati hanno apparentemente sofferto poco, sicchè un osservatore superficiale riterrebbe Rimini quasi intatta. Ma all'interno degli edifici quale gravità! Tutte le case, pochissime eccettuate, hanno internamente nei tramezzi, nelle volte, nei soffitti, lesioni gravissime e in alcune irrimediabili. I tetti sono sconnessi: alcuni sono slittati nella strada, facendo vittime, e ferendo cittadini. Fortunatamente le scosse molto forti del giorno precedente, avevano fatto abbandonare ai più le case, sicchè è per questa ragione che il numero dei morti e dei feriti è relativamente minimo.

Nelle zone macrosismiche in generale, ma più particolarmente in quelle costiere, si nota di frequente un modo di manifestarsi degli effetti del terremoto a prima vista assai strano e complesso. Si nota, cioè, come vicinissimo a rovine complete vi sono delle località incolumi o quasi. Questo ho osservato molte volte, e anche recentemente. Non vi è dubbio che molta causa di ciò debba attribuirsi all'eventuale migliore sistema di costruzione; ma ritengo che in buona parte il fatto debba avere la sua origine geologica e fisica.

Ora anche a Riccione, dove il suolo è formato da sabbia, potrebbe essere intervenuto un simile fatto, e spiegare come mai alcuni punti abbiano meno sofferto di altri.

Non mancarono qua e là, anche in occasione di questo terremoto, di manifestarsi delle sorgenti che il popolino si affrettò a battezzare per vulcanelli, e la notizia di essi, passando da persona a persona, come sempre avviene in simili casi, crebbe, fino a farli divenire enti pericolosi, anzi, cause del terremoto!

Volli recarmi a visitare anche quelli; ma come mi era accaduto per Avezzano, non mi restò che raccogliere della rena, quale appunto si trova nel sottosuolo di quelle regioni. La ragione di tali emissioni di acqua e rena o di acqua fangosa è presto detta. Si sa che nel sottosuolo si hanno degli strati acquiferi a profondità variabili. Sotto l'impeto della scossa, l'acqua interclusa, che, come è noto dalla fisica, è incomprimibile, cerca uno sfogo, e se lo procura attraverso il mantello superficiale del terreno, trasportando con sé la rena o il fango che tiene già disciolto, o che la violenza dell'agitazione gli mescola. Di quei vulcanelli di fango ne ho veduti quasi sempre nelle zone macrosismiche; sicché si può ritenere come un fenomeno comune nei terremoti più violenti.

Le case pure sconquassate e in parte rovinate. Assai più gravi i danni sono a Tavollo. Il terreno, sebbene in imminente prossimità del mare, è ondulato in modo che molte case si trovano in pendio. Se a questo si aggiunge, oltre la forza del fenomeno sismico, la solita ragione delle costruzioni molto cattive, e si tira la somma, risulteranno più che legittimi i danni avvenuti! Ho riscontrato case intere nelle quali la metà superiore era letteralmente slittata per centimetri sulla parte inferiore, con strapiombi. Ciò dimostra che le fondazioni, oltre ad avere ceduto, hanno anche camminato verso il mare a causa della spinta tellurica. Verso il mare si trovano molte ville e villini che hanno grandemente sofferto.



Per ciò che si riferisce all'ubicazione delle località maggiormente colpite, i danni più gravi si riscontrano nei paesi che si trovano o sullo sprone montagnoso che da Riccione a Pesaro si protende in mare, o nelle vallate dei torrenti, sicchè la zona macrosismica sembra che tenda a irraggiarsi lungo le valli nelle quali scorrono i torrenti.

Innanzitutto, le cattive costruzioni, poi il *confine geologico*. Infatti, da Riccione a Coriano e ad Ospedaletto, si hanno moltissime rovine. Tutti gli edificj, che si trovano su queste due linee sono precisamente sul terreno alluvionale, al contatto con l'ossatura montuosa. Così pure nella valle Conca, e a Tavollo, presso Cattolica ; mentre Tomba, Saludecio, Mondaino, Pozzo Alto, sebbene egualmente interni rispetto alla costa (e perciò alla stessa distanza lineare del punto epicentrale), hanno sofferto assai meno, perchè posti su terreno o roccioso od omogeneo.

Quest'ultimo poi ricordando gli studi del Serpieri, nel valutare i sismi storicamente occorsi nell'area, testualmente riporta:

Nel rileggere tutto quel poderoso lavoro, dopo aver messo insieme il materiale per gli appunti presenti, rimasi meravigliato fortemente dalla somiglianza, dirò anzi, dalla identità del modo col quale questo nuovo terremoto si è manifestato. Si direbbe quasi che i due terremoti, del 1875 e del 1916, sono lo stesso fenomeno colla data cambiata, tanto si rassomigliano !

Oltre a ciò, come sotto riportato da Baratta M., (I terremoti d'Italia. Saggio di storia, geografia e bibliografia sismica italiana (ristampa anastatica, Sala Bolognese 1979) per il terremoto del 1875, si manifestarono anche modesti fenomeni di maremoto (peraltro rilevati anche in occasione del sisma riminese del 1916):

- i) Nella strada Cervia - Cesenatico si aprì una fenditura lunga Km. 1 circa e larga in certi punti 15 cm.
- l) Al momento della scossa un maremoto violento ebbe luogo a poca distanza dalla spiaggia di Rimini-Cervia.

Al netto dei gravi danneggiamenti occorsi agli edifici ed al contesto antropico in occasione dei vari sismi storici, sulla base del catalogo *CFTI5Med, Catalogo dei Forti Terremoti in Italia (461 a.C.-1997)* e *nell'area Mediterranea (760 a.C.-1500)-(INGV)*, per l'areale del riminese si riporta una sintetica descrizione degli effetti registrati anche sul solo ambiente naturale:

- **Evento 1672**

*La costa antistante Rimini fu interessata da un leggero maremoto: le acque furono osservate prima allontanarsi dalla riva e poi tornare verso la spiaggia inondandola per un tratto di circa 15 m (20 passi). La forte agitazione del mare fu notata anche da alcuni marinai che si trovavano a bordo di navi a poca distanza dalla costa.*

- **Evento 1786**

*Nel territorio circostante Rimini si aprirono fenditure nel terreno, che risultò smosso così in profondità da facilitare i successivi lavori agricoli. Nelle cave di gesso della zona collinare attorno alla città molti massi franarono e la roccia risultò sconnessa. Non sono ricordate variazioni sensibili nel regime delle acque, se non un livello dei pozzi piuttosto basso rispetto agli anni precedenti, né fenomeni di intorbidamento; fenomeni simili furono invece registrati a Faetano e a San Marino.*

*Non furono osservate effetti di maremoto o onde anomale: è da rilevare che l'area abitata distava circa 1 km dalla costa e che la scossa accadde durante una festività e a tarda ora della notte.*

- **Evento 1875**

*I pescatori che si trovavano sulle barche per il lavoro notturno osservarono una forte agitazione anomala del mare in diverse località: a Rimini, Pesaro e Ancona e nelle acque dei canali di Cervia e Cesenatico. Nel tratto di mare tra Cervia e Cesenatico fu osservata la formazione di alcune onde di maremoto, che però, sulla costa, non fecero danni (1). Lungo la strada fra Cervia e Cesenatico si aprì una fenditura lunga 1 km e larga fino a 15 cm (2). Nella piazza di Cesenatico si aprì una spaccatura parallela al canale lunga parecchi metri. A Cervia e a Cesenatico si formarono inoltre numerose cavità a forma di imbuto, da cui fuoriuscirono getti d'acqua.*

*A Fermo, anche a causa delle abbondanti piogge, si attivarono delle frane. A Porretta Terme fu notato un abbassamento delle acque di un pozzo di 25 mm (2).*

*Fenomeni luminosi furono osservati a Cervia, Cesenatico, Cagli e San Marino.*

- **Evento 1916**

*Il 17 maggio a Bertinoro le acque sorgive si intorbidarono e aumentarono la loro portata; presso Retinella in un canale si formarono onde anomale; a Savignano le acque dei pozzi si intorbidarono e furono molto agitate.*

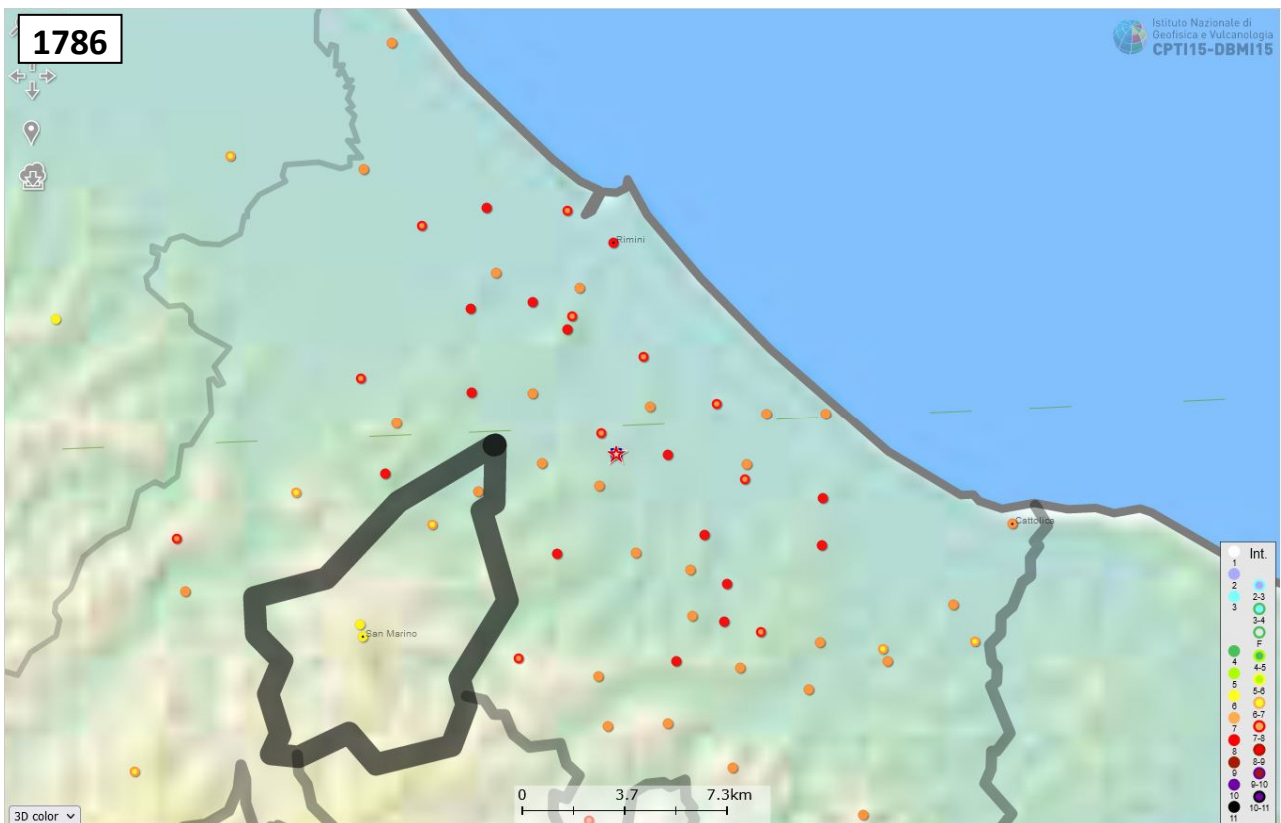
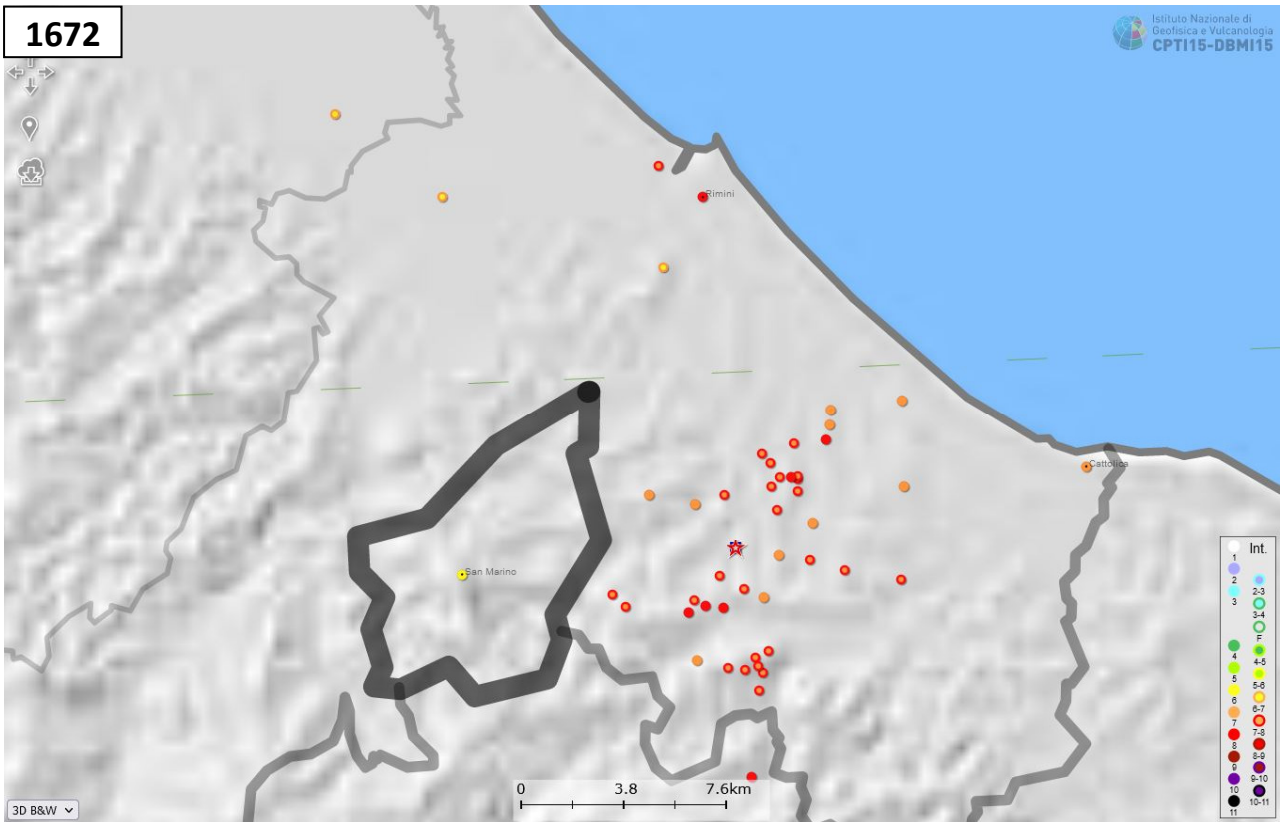
*Il 16 giugno a Savignano fu rilevata agitazione nelle acque dei pozzi.*

*Il 16 agosto a Cattolica si formarono piccole spaccature nel suolo e si formarono 4 sorgenti in mare a circa 50 metri dalla spiaggia; a Tavollo furono osservate ondulazioni nel terreno in prossimità del mare e un blando effetto di maremoto; a Bertinoro aumentarono la portata d'acqua e si intorbidarono le acque di 3 fonti; a San Giovanni in Marignano si intorbidarono le acque di pozzi profondi circa 15 metri; a Savignano fu rilevata agitazione nelle acque dei pozzi.*

Chiaramente confrontando le mappe di risentimento macrosismico del DBMI15 (vedi Figura 11.2), per i terremoti di cui si hanno sufficienti informazioni a livello areale, è possibile apprezzare come storicamente,

*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Rimini (RN)*  
Relazione Tecnico Illustrativa

sulla base degli elementi acquisibili, la distribuzione ed intensità del danneggiamento risultino prioritariamente condizionate dalle distanze epicentrali e le manifestazioni locali influenzate significativamente dall'assetto geologico/stratigrafico dei vari siti.



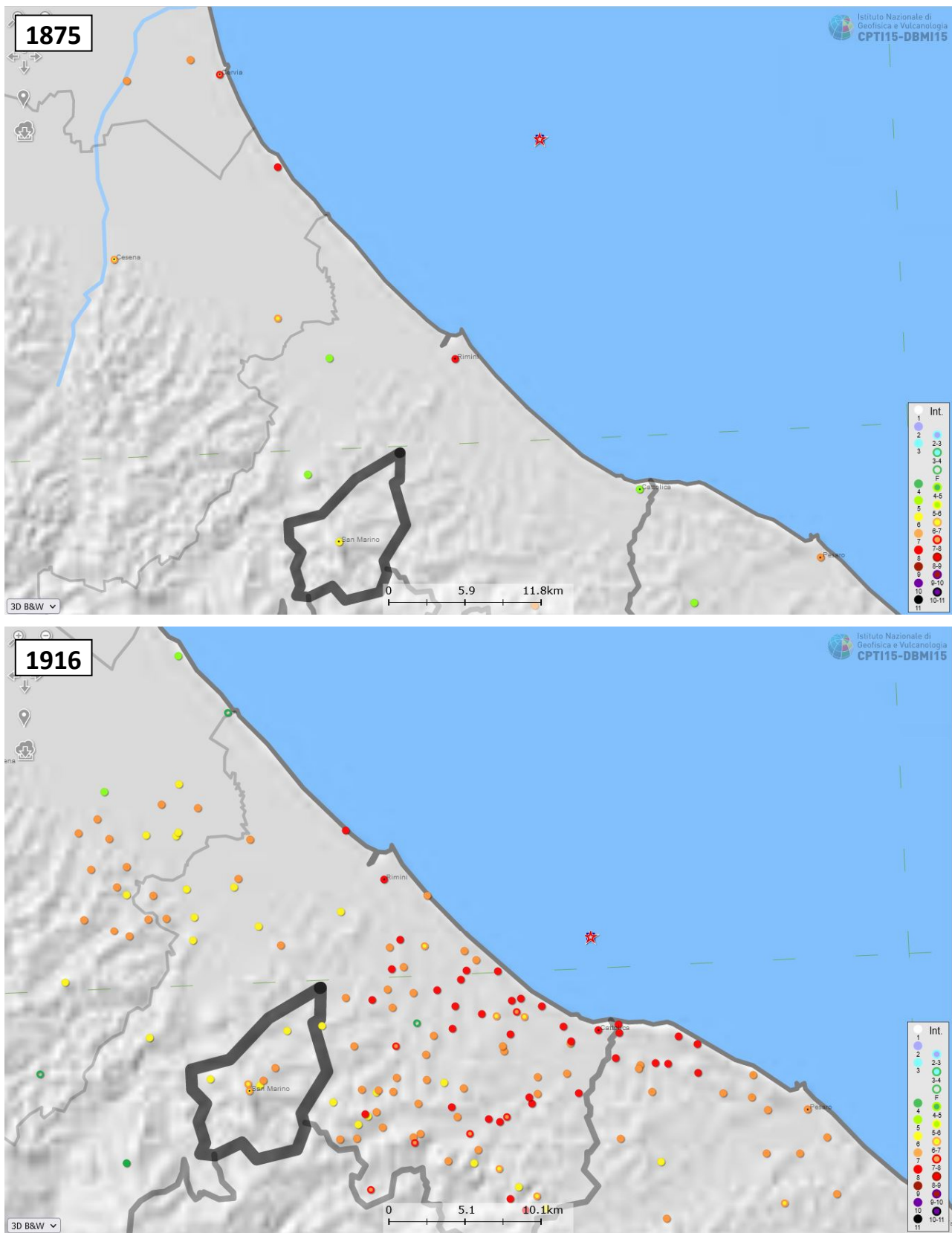


Figura 11.2: Mappe di risentimento macrosismico, comparazione eventi del 1672-1786-1875-1916, database CPTI15-DBMI15

Tuttavia, a mero titolo qualitativo, può risultare interessante un parallelismo fra la narrazione descrittiva di G. Alfani e le mappe di amplificazione sismica di MS riferite ai periodi spettrali medio-alti, in cui i maggiori fattori amplificativi vengono rilevati proprio in corrispondenza delle coperture alluvionali intravallive e della piana costiera, ove l'autore descrive i maggiori danneggiamenti e più intensi effetti cosismici.

Contestualizzando quindi il rischio sismico alla situazione attuale, caratterizzata da un'elevata concentrazione di attività e popolazione nonché da una spiccata vocazione turistica della città, si può asserire come il rischio sismico possa essere decisamente elevato soprattutto nei mesi estivi. A ciò va aggiunto come il comune, nonostante nel 1927 fosse stato classificato come "sismico", nel 1938 fu declassificato per "favorirne lo sviluppo" e ripresa economica, venendo poi riclassificato nuovamente sismico solo a partire dal 1983. Pertanto durante la forte espansione urbanistica del periodo post-bellico ciò ha presumibilmente comportato un'elevata vulnerabilità del tessuto urbano, essendosi sviluppato in carenza di criteri antisismici e, spesso, secondo criteri dettati più dalla contingenza piuttosto che da una mirata programmazione, elementi che contribuiscono ad aggravare ulteriormente il rischio sismico dell'area urbana.

## **12. CONCLUSIONI**

Lo studio di microzonazione sismica effettuato sul territorio del Comune di Rimini, integrando le analisi di III Livello di Approfondimento con l'adeguamento del I-II Livello ai contenuti della DGR 630/2019 e successiva DGR 476/2021 e integrazione DGR 564/2021, ha permesso di valutare la pericolosità sismica sia nelle aree urbane che in quelle di prevista urbanizzazione. I dati sono stati elaborati e restituiti secondo i più recenti standard di rappresentazione e archiviazione dati per la Microzonazione Sismica versione 4.1. Data anche l'abbondanza delle conoscenze litostratigrafiche e vista la estesa campagna geognostica/geofisica di riferimento, la microzonazione sismica è stata estesa anche a porzioni del territorio rurale limitrofo.

Non sono state individuate zone stabili con assenza di effetti amplificativi e, dalla consultazione del database Ithaca, non risultano presenti elementi tettonici attivi e capaci, certi e documentati, che possano determinare effetti superficiali nelle aree urbanizzate in studio.

Sono presenti invece zone stabili suscettibili di amplificazioni locali nelle quali sono attese amplificazioni del moto sismico, con effetto dell'assetto litostratigrafico e morfologico locale e zone suscettibili di instabilità, nelle quali gli effetti sismici attesi e predominanti sono riconducibili a deformazioni permanenti nel territorio e nel primo sottosuolo. In tal caso si tratta da un lato di circoscritte zone, ai margini dell'area collinare, soggette ad instabilità per movimenti gravitativi attivi e quiescenti e dall'altro del potenziale rischio per liquefazione a cui risulta soggetto gran parte dell'area costiera.

Sebbene non si abbiano elementi conoscitivi di dettaglio, in località Covignano si segnala la presenza di cavità sepolte, di origine antropica, realizzate in epoca storica ed a livello puntuale nei terreni arenacei locali;

tuttavia data la scarsità di informazioni disponibili e la natura puntuale degli interventi antropici, non risulta possibile esprimere un'adeguata valutazione tecnica circa gli effetti attesi sulla risposta sismica di sito e/o stima dell'effettiva pericolosità/stabilità puntuale. Pertanto in occasione di interventi edilizi e/o infrastrutturali che si sviluppino entro tale areale si raccomanda un'attenta verifica entro un congruo intorno dell'area di interesse. In sintesi sul territorio studiato sono presenti n. 6 aree instabili per frana con stati di attività quiescenti e attivi di cui solo n. 2 di essi arrivano a lambire solo marginalmente tratti di viabilità secondaria e/o gruppi di case sparse nell'ambito del contesto collinare in località Montalbano - Ghetto Randuzzi, mentre in località La Dogana - Il Palazzo non risultano interferire direttamente con alcun elemento infrastrutturale e/o edilizio significativo.

Diversamente le problematiche di instabilità per liquefazione (zone  $ZS_{LQ}$  e  $ZR_{LQ}$ ) risultano interessare gran parte dell'urbanizzato e delle strutture/infrastrutture strategiche presso le località costiere (viabilità, linea ferroviaria, stazioni ferroviarie, portocanali, scuole, caserme, ecc.), nonché modesta parte dell'area urbana storica. In tal senso le numerose verifiche di *RSL* e del *Potenziale di Liquefazione* hanno permesso di quantificare i possibili effetti conseguenti ad un ipotetico sisma sul territorio oggetto di studio. Nella carta di Microzonazione con approfondimenti (III livello), che rappresenta l'elaborato finale degli studi, ogni microzona è stata caratterizzata mediante 3 importanti fattori: il primo quantifica l'entità e le amplificazioni attese del moto sismico (in termini di accelerazione massima al suolo *PGA* nonché dei vari Fattori di Amplificazione spettrale secondo vari intervalli temporali di interesse), il secondo (potenziale di liquefazione *IPL*) è un indicatore della pericolosità dei terreni nei confronti di potenziali fenomeni di liquefazione nonché della severità delle potenziali manifestazioni superficiali attese, il terzo (espresso numericamente al fianco di ciascun punto di indagine) contempla i cedimenti post-simici attesi a seguito di un eventuale innesco della liquefazione in condizioni di free-field.

Ulteriori considerazioni, per un giudizio complessivo in merito a ciascuna zona di indagine, potranno essere condotte valutando anche i corrispondenti valori di *LSN*, utili a stimare la severità delle manifestazioni e gli scenari di danneggiamento atteso in superficie.

L'innesco e sviluppo della liquefazione, quale fenomeno complesso dal punto di vista dei fattori predisponenti e scatenanti, risulterà comunque fortemente condizionato da specifiche condizioni sismogenetiche (distanza epi/ipocentrale, fenomeni di direttività, contenuto in frequenza del segnale, durata della fase forte, ecc.) e/o dalla presenza di stati tensionali preesistenti, imputabili alla presenza di opere/strutture o situazioni morfologiche ed idrogeologiche particolari.

Considerata la continuità dei depositi sabbiosi costieri, l'entità dei fenomeni e gli aspetti di non linearità ipotizzabili per il comportamento dinamico/ciclico dei terreni, all'occorrenza e/o in fase di progettazione esecutiva per opere strategiche (e/o di rilevanza) potrà essere opportuno condurre ulteriori approfondimenti di studio tramite analisi con prove di laboratorio ciclico/dinamico ed eventualmente di risposta sismica di sito con metodi di calcolo non lineari ed in tensioni efficaci opportunamente calibrati; tali approfondimenti, soprattutto nelle zone a rischio elevato-molto elevato, consentiranno di simulare con maggior precisione i

fenomeni di amplificazione sismica, gli aspetti deformativi e le sovrappressioni interstiziali attesi nelle condizioni sismiche di progetto.

Qualora opere edilizie, infrastrutture o aree di previsione urbanistica ricadano a cavallo dei limiti di potenziale di liquefazione di riferimento (es.  $IPL=2$  o  $IPL=5$  ) e/o di zone/microzone caratterizzate da differente fattore di amplificazione sismica, sarà opportuno associare ad esse il parametro di pericolosità più conservativo nell'ambito di tale variazione; nel caso le aree o infrastrutture interessate da tale intersezione risultino di significativa estensione, tale approccio andrà adottato per un congruo tratto od estensione funzionale al mantenimento delle prestazioni attese per l'infrastruttura e/o area interessata.

In particolare, conformemente a quanto indicato nelle “Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da liquefazioni (LQ)” (D.P.C., versione 1.0, 2018), qualora risulti necessario valutare/verificare situazioni di maggior dettaglio a cavallo o nell'ambito delle zone  $ZR_{LQ}$ , o una revisione/riperimetrazione di maggior dettaglio di tali aree, si renderà necessario un adeguato approfondimento di indagine con applicazione di appropriate metodologie di analisi di suscettibilità alla liquefazione.

All'occorrenza potrà altresì risultare necessario eseguire studi di III° livello di approfondimento anche nelle zone suscettibili di instabilità gravitativa di varia tipologia, così come individuate negli elaborati cartografici di MS o in virtù della specifica destinazione urbanistica e/o di utilizzo delle aree ai sensi del Par. 4.2 della DGR 564/2021.

Tali informazioni potranno essere pertanto di ausilio sia per la progettazione urbanistica che per la pianificazione territoriale ai fini della mitigazione del rischio sismico nelle aree di interesse e per la pubblica incolumità.

### **13. BIBLIOGRAFIA**

Alfani G., "Note ed osservazioni sui terremoti della regione litoranea Adriatica nell'agosto 1916", Pubblicazioni dell'Osservatorio Ximeniano dei PP. Scolopi, n.122. Firenze 1916

Andrus, R. D., and Stokoe, K. H., II. (2000). "Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 126(11), 1015–1025.

Andrus, R.D., Stokoe, K.H., (2004). "Guide for Shear-Wave-Based Liquefaction Potential Evaluation", Earthquake Spectra, Volume 20, No. 2, pages 285±308, Earthquake Engineering Research Institute (EERI) Oakland, California, USA.

Baratta M., "I terremoti d'Italia". Saggio di storia, geografia e bibliografia sismica italiana (ristampa anastatica, Sala Bolognese 1979). Torino 1901

Bouckovalas, G. & Dakoulas, P. (2007). Liquefaction performance of shallow foundation in presence of a soil crust, Earthquake Geotechnical Engineering, Chapter 11, 245-276

Brett W. Maurer, Russell A. Green, Misko Cubrinovski, and Brendon A. Bradley, (2013) "Evaluation of Liquefaction Potential Index (LPI) for Assessing Liquefaction Hazard: A Case Study in Christchurch, New Zealand" - poster

Building Seismic Safety Council, 1994. *NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings*. Federal Emergency Management Agency.

BSSC (1997). *NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures*. 1997 edition, Part 2, Commentary, Building Seismic Safety Council, Washington, DC.

Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani 2015 CPTI15 <https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>

Chen, C. J., & Juang, C. H., (2000). "Calibration of SPT- and CPT based liquefaction evaluation methods." Innovations applications in geotechnical site characterization, P. Mayne and R. Hryciw, eds., Geotechnical Special Publication No. 97, ASCE, New York, pp: 49–64.

Crespellani, T., Nardi, R., Simoncini, C., (1988), "La liquefazione del terreno in condizioni sismiche", Edizioni Zanichelli, Bologna.

Decreto Ministeriale 31/07/2012 Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti - Approvazione delle Appendici nazionali recanti i parametri tecnici per l'applicazione degli Eurocodici – EC8 parte 5

Dipartimento della Protezione Civile, "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica", 2008

Dipartimento della Protezione Civile - Commissione tecnica per la microzonazione sismica. "Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da liquefazioni (LQ)", versione 1.0, Roma, 2018.

DISS (Database of Individual Seismogenic Sources) - vers. 3.2.1 <http://diss.rm.ingv.it/dissmap/dissmap.phtml>

EN 1998 - 5 (2005). Eurocodice 8 (EC8) "Progettazione delle strutture per la resistenza sismica. Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici" UNI EN 1998 - 5, Gennaio 2005.



*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Rimini (RN)*  
Relazione Tecnico Illustrativa

---

Facciorusso, J., 2008. Calcolo del potenziale di liquefazione su vasta scala: approccio deterministico e approccio probabilistico. Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica, Catania

Facciorusso, J., 2009. Criteri per la costruzione di mappe di pericolosità sismica di liquefazione per le grandi aree. ANIDIS 2009 Bologna.

Fortunato C., Martino S., Prestininzi A., Romeo R.W., coauthors Fantini A., Sanandrea P. (2012). "New release of the Italian catalogue of earthquake-induced ground failures" (CEDIT). Italian Journal of Engineering Geology and Environment, DOI: 10.4408/IJEGE.2012-02.O-05

Galli, P. (2000). New Empirical Relationships between Magnitude and Distance for Liquefaction. Tectonophysics, 324, 169 - 187

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). doi: <https://doi.org/10.6092/ingv.it-ctfi5>

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). doi: <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0091-9>

Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Ilhan, O., Xing, G., Numanoglu, O., Groholski, D.R., Phillips, C.A., and Park, D. (2020) "DEEPSOIL 7.0, User Manual". Urbana, IL, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign

Kramer, S.L. (1996). Geotechnical earthquake engineering. Prentice - Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics.

Idriss, I. M., and Boulanger, R. W. (2008). Soil liquefaction during earthquakes. Monograph MNO-12, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA, 261 pp.

Ishihara, K., (1996) "*Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*". Clarendon, Oxford.

Ishihara, K. & Yoshimine, M. (1992). Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes, Soils and Foundations, 32 (1), 173-188

ITHACA (ITHACA Working Group (2019). ITHACA (ITaly HAZard from CApable faulting), A database of active capable faults of the Italian territory. Version December 2019. ISPRA Geological Survey of Italy. Web Portal <http://sgi2.isprambiente.it/ithacaweb/Mappatura.aspx>)

Iwasaki, T., Tatsuoka, F., Tokida, K., and Yasuda, S. (1978). "A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan." Proceedings of the 2nd International Conference on Microzonation, San Francisco, 885-896.

Iwasaki, T., Arakawa, T., and Tokida, K. (1982). "Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes." Proceedings of the Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Southampton UK, 925-939.

*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Rimini (RN)*  
Relazione Tecnico Illustrativa

---

Juang, C.H, Yuan, H., Kun, D., Yang, S.H., & Christopher, R.A. (2005) Estimating severity of liquefaction-induced damage near foundation Soil Dynamics and Earthquake Engineering 25 pp403-411

Juang, C. H., et Al. (2001). Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering "Assessing Probability-based Methods for Liquefaction Potential Evaluation".

Juang, C. H., Chen, C. J., and Jiang, T. (2001). "Probabilistic framework for liquefaction potential by shear wave velocity." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 127(8), 670–678.

Juang, C. H., Jiang, T., and Andrus, R. D. (2002). "Assessing probability based methods for liquefaction evaluation." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 128(7), 580–589.

Jonathan D. Bray and Rodolfo B. Sancio, (2006). "Assessment of the Liquefaction Susceptibility of Fine-Grained Soils"

Lee, D. H., Ku, C. S., and Yuan, H. (2003). "A study of the liquefaction risk potential at Yuanlin, Taiwan." *Engineering Geology*, 71(1/2), 97-117.

Li, D. K., Juang, C. H., and Andrus, R. D. (2006). "Liquefaction potential index: A critical assessment." *Journal of GeoEngineering*, 1(1), 11-24.

Linee Guida AGI – Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica – 2005

Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da amplificazioni – versione 2.0, anno 2022  
<https://www.centromicrozonazioneismica.it/it/download/category/24-linee-guida>

*Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Antonucci A. (2021). Database Macrosismico Italiano (DBMI15), versione 3.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/DBMI/DBMI15.3>*

Merli A., Capatti M.C. & Dezi F. (2016). "Different measuring methods for estimating the hydraulic conductivity on the shallow aquifer along a stretch of the Rimini Coast". VI Italian Conference of Reserchers in Geotechnical Engineering, Bologna 2016.

Merli A., Saccenti A. & Dezi F. (2017). "Indagini preliminari per tecniche di stabilizzazione passive delle sabbie costiere riminesi suscettibili a liquefazione". Proc. of the XXVI National Conference in Geotechnics, CNG 2017, Rome 2017.

Merli A., Dezi F., Tropeano G., Chiaradonna A. & d'Onofrio A. (2019). "Site response analysis in effective stress of a coastal area the North-Western Adriatic seaside (Italy)". Proc. of the 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 7ICEGE, Roma, 2019.

Merli A., Dezi F. (2021). "Assessing the effectiveness of a liquefaction mitigation intervention in some urbanized coastal areas in Italy". Proc. of the 17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE, Sendai, Japan, 2021.

NASEM Report (2016). State of the Art and Practice in the Assessment of Earthquake - Induced Soil Liquefaction and Its Consequences. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (NASEM). ISBN: 978 - 0 - 309 - 44027 - 1. DOI: <https://doi.org/10.17226/23474>.

Papathanassiou, G. (2008). "LPI-based approach for calibrating the severity of liquefaction-induced failures and for assessing the probability of liquefaction surface evidence." *Engineering Geology*, 96(1/2), 94-104.

*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio del Comune di Rimini (RN)*  
Relazione Tecnico Illustrativa

---

Regione Emilia Romagna, Del. G.R. 630/2019 "Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, LR 24/2017)"

Regione Emilia Romagna, Del. G.R. 476/2021 "Aggiornamento dell' Atto di coordinamento tecnico sugli studi di microzonazione sismica per la pianificazione territoriale e urbanistica (artt. 22 e 49, LR 24/2017) di cui alla deliberazione della giunta regionale 29 aprile 2019, n. 630"

Regione Emilia Romagna, Del. G.R. 564/2021 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)"

Report ASCE, (2011), Ku, C.S., et Al., "*Liquefaction Probability by Probabilistic Version of Robertson and Wride Model*". ASCE.

Report NCEER, (1997), Youd, T.L., et Al., "*Liquefaction resistance of soils*" Summary Report of Workshop Participants, National Center for Earthquake Engineering Research (NCEER).

Robertson, P.K., Wride, C.E., (1998). "*Evaluating cyclic liquefaction potential using The cone penetration test*". Canadian Geotechnical Journal, Ottawa.

Robertson P.K., "Performance based earthquake design using the CPT". In proceedings of IS-Tokyo 2009: International conference on performance-based design in earthquake geotechnical engineering- From case history to practice, Tokyo, Japan, 15-18 June(2009).

Schnabel, P. B., Lysmer, J., Seed, H. B. (1972). SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Rep. No. EERC 72 - 12, EERI, Berkeley, Calif.

Seed, H.B., and Idriss, I.M., (1971). "Simplified Procedure for evaluating soil liquefaction potential". Journal Soil Mechanics and Foundations, ASCE .

Sonmez H, 2003. Modification to the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction-prone area (Inegol-Turkey). *Environ. Geology* 44(7):862–871.

S. Toprak, T.L. Holzer, M.J. Bennett, J.C. Tinslay, "*CPT and SPT-based probabilistic assessment of liquefaction potential*." Proceedings of 7th U.S.–Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures Against Liquefaction, Seattle, Technical Report MCEER-99-0019(1999).

S. van Ballegooy, P.J. Malan, M.E. Jacka, V.I.M.F. Lacrosse, J.R. Leeves & J.E. Lyth / Tonkin & Taylor Limited - H. Cowan / New Zealand Earthquake Commission, "Methods for characterising effects of liquefaction in terms of damage severity", 15WCEE Lisboa, 2012

Tonkin and Taylor Ltd (2013) Liquefaction vulnerability study, Tonkin and Taylor Report for The Earthquake Commission 52020.0200/v1.0. February 2013

Toprak, S. and Holzer, T. L. (2003). "Liquefaction potential index: field assessment." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 129(4), 315–322.

Zhang, G., Robertson, P. K., Brachman, R. W. I. (2002). Estimating liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground, Canadian Geotechnical Journal, 39, 1168–80

Zhang, G., Robertson, P. K., & Brachman, R. W. I., (2004). Estimating liquefaction-induced lateral displacements using the standard penetration test or cone penetration test Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 130, 861