



**PROTEZIONE CIVILE**  
 Presidenza del Consiglio dei Ministri  
 Dipartimento della Protezione Civile



Regione Emilia-Romagna



CONFERENZA DELLE REGIONI E  
 DELLE PROVINCE AUTONOME

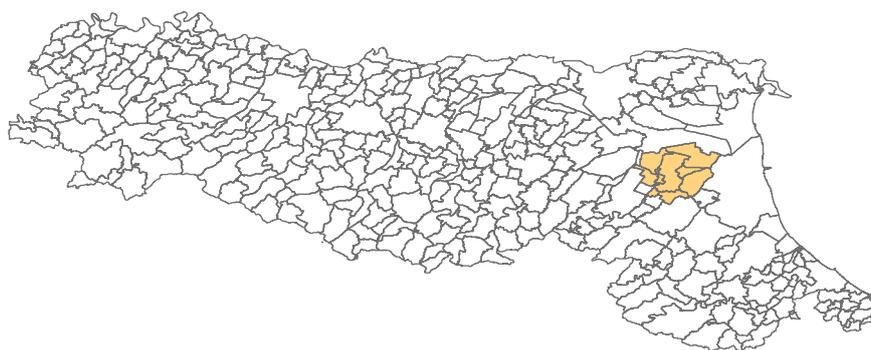
Attuazione dell'articolo 11 della legge 24 giugno 2009, n.77

# MICROZONAZIONE SISMICA

## Relazione illustrativa

### Regione Emilia-Romagna

#### UNIONE DEI COMUNI DELLA BASSA ROMAGNA



Regione



Soggetto realizzatore

ATP  
 Capogruppo Dott.Geol. Alessandro Merli

Gruppo di lavoro:  
 Dott.Geol. Carlo Copioli  
 Dott.Geol. Paolo Ciacci  
 Dott.Geol. Domenico Pileggi  
 Dott.Geol. Bruno Quadrio  
 Dott.Geol. Fabio Vannoni  
 Arch. Chiara Conte  
 Arch. Silvia Malpassi  
 Sogeo Srl  
 Collaboratore:  
 Dott. Geol. Fausto Capacci

Data

Ottobre 2015

## INDICE

1.	PREMESSA .....	1
2.	INTRODUZIONE .....	2
3.	SISMICITA' STORICA E PERICOLOSITA' DI BASE .....	5
4.	ASSETTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO DELL'AREA.....	18
4.1.	Cartografia di base.....	18
4.2.	Inquadramento Geomorfológico.....	18
4.3.	Inquadramento Geologico-Strutturale .....	19
4.4.	Assetto Stratigrafico .....	21
5.	DATI GEOTECNICI E GEOFISICI.....	28
5.1.	Indagini integrative di tipo geofisico.....	30
5.1.1.	<i>Campagna di misure geofisiche integrative</i> .....	31
5.1.2.	<i>Andamento delle Vs nel sottosuolo</i> .....	35
5.2.	Indagini integrative di tipo geotecnico .....	37
5.2.1.	<i>Prospezioni in sito</i> .....	38
5.2.2.	<i>Analisi di laboratorio</i> .....	40
6.	MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO I .....	47
6.1.	Carta geologico-tecnica .....	47
6.2.	Carta delle frequenze naturali del terreno.....	49
6.3.	Carta delle MOPS (Microzone Omogene in prospettiva Sismica).....	52
7.	MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO III (analisi RLS e Liquefazione).....	57
7.1.	Analisi di Risposta Sismica Locale .....	57
7.1.1.	<i>Modellazione numerica e codici di calcolo</i> .....	57
7.1.2.	<i>Moto di Input</i> .....	58
7.1.3.	<i>Modello di sottosuolo e parametri dinamici</i> .....	59
7.1.4.	<i>Spettri di Risposta e Fattori di Amplificazione</i> .....	61
7.2.	Potenziale di Liquefazione .....	83
7.2.1.	<i>Analisi di laboratorio ciclico e cicli equivalenti</i> .....	83
7.2.2.	<i>Stima dei cicli equivalenti Neq</i> .....	85
7.3.3.	<i>Verifiche semplificate-metodo CPT</i> .....	88
8.	CONCLUSIONI.....	93

## ALLEGATI:

1. Sezioni Geo-Litologiche
2. Indagini di Laboratorio
3. Analisi RLS e Fattori di Amplificazione
4. Verifiche di Liquefazione
5. Tabelle Parametriche IPL

## **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”.

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 Decreto del Capo del Dipartimento della Protezione Civile del 15 aprile 2013 pubblicato sulla G.U. della Repubblica Italiana, n.160 del 10 luglio 2013 a titolo “Ripartizione delle risorse di cui all’ordinanza del Capo del Dipartimento della Protezione Civile 20 febbraio 2013, n. 52, emanata in attuazione dell’articolo 11 del decreto legge 28 aprile 2009, n. 39, convertito, con modificazioni, dalla legge 24 giugno 2009, n.77, per l’annualità 2012.”, ha assegnato le risorse finanziarie anche alla Regione Emilia-Romagna, per studi di microzonazione sismica.

Con deliberazione della Giunta Regionale n.1919 in data 16 dicembre 2013, pubblicata sul BURERT Regione Emilia-Romagna in data 3 gennaio 2014, sono stati approvati i criteri per gli studi di microzonazione sismica in Emilia Romagna.

I comuni di Alfonsine, Bagnacavallo, Bagnara di Romagna, Conselice, Cotignola, Fusignano, Lugo, Massa Lombarda, Sant’Agata sul Santerno, facenti parte dell’Unione dei Comuni della Bassa Romagna (RA), essendo in possesso dei requisiti indicati dall’OPCM n. 53/2013 hanno usufruito dei contributi economici previsti per gli enti locali dalla deliberazione della Giunta Regionale n.1919 del 16/12/2013. Gli studi che sono stati previsti per le aree urbanizzate e urbanizzabili dei comuni sopra elencati sono:

- Analisi delle Condizioni Limite di Emergenza (CLE)
- Microzonazione Sismica con approfondimenti di III livello.

Il presente rapporto sintetizza i risultati degli studi multidisciplinari di Microzonazione Sismica realizzati in conformità ai criteri definiti dall’ All. “D” della deliberazione della Giunta Regionale n. 1919/2013. Lo studio sarà accompagnato dall’analisi della Condizione Limite di Emergenza (CLE) oltre che dall’archiviazione informatica di primo e terzo livello secondo le indicazioni dell’allegato “D” della medesima delibera.

## **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.

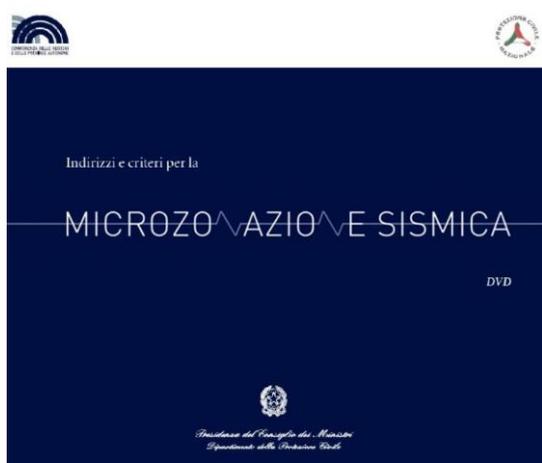
La messa a punto di una procedura condivisa per lo studio di questi fenomeni è stata recentemente oggetto di un intenso lavoro di coordinamento e sintesi delle conoscenze finora disponibili da parte della Conferenza delle Regioni che, con il coordinamento del Dipartimento della Protezione Civile, ha 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 dei Comuni di Alfonsine, Bagnacavallo, Bagnara di Romagna, Conselice, Cotignola, Fusignano, Lugo, Massa Lombarda, Sant'Agata sul Santerno (figura 2.2). In Tabella 2.1 è riportata una sintesi della documentazione e degli elaborati cartografici redatti per gli studi di Microzonazione Sismica:

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

Titolo Elaborato	Scala	N° tavole
Carta delle Indagini	1:5.000	31
Carte delle Frequenze Naturali dei Terreni	1:5.000/25.000	9
Carta Geologico Tecnica	1:5.000	31
Carta delle MOPS (I livello)	1:5.000	31
Carte di Microzonazione Sismica con Approfondimenti (III livello)	1:5.000	31

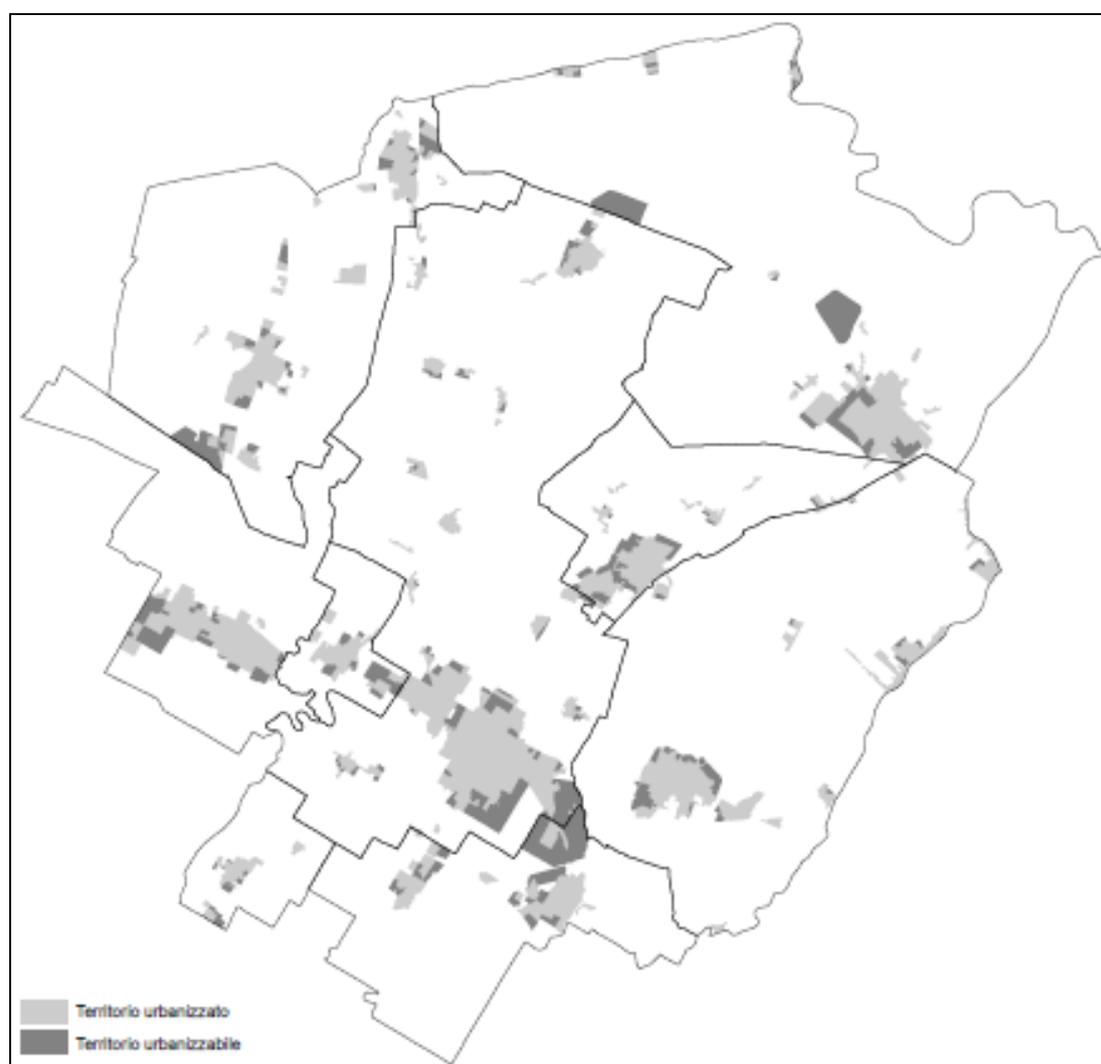


Figura 2.2- Zone urbanizzate e urbanizzabili dei Comuni della Bassa Romagna.

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

Il territorio dell'Unione dei Comuni della Bassa Romagna si trova nel cuore della Provincia di Ravenna e si compone dei Comuni di Alfonsine, Bagnacavallo, Bagnara di Romagna, Conselice, Cotignola, Fusignano, Lugo, Massa Lombarda e Sant'Agata sul Santerno. Si estende su un'area complessiva di 480 km quadrati e conta oltre 100mila abitanti (Figura 3.1).

Per la definizione della sismicità storica del territorio in studio, che risulta tra i più estesi d'Italia, è stato consultato il Database Macrosismico Italiano DBMI11 (Locati et al., 2011). Le successive Tabelle 3.1-3.9 riportano i principali eventi sismici (scosse principali "mainshock") risentiti nei differenti comuni 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- 2.1: Evidenziato in verde il territorio appartenente all'Unione dei Comuni della Bassa Romagna all'interno della Provincia di Ravenna (RA)

*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio dei Comuni della Bassa Romagna (RA)*  
Relazione Tecnico Illustrativa

*Tabella 3.1 – Storia sismica del Comune di **ALFONSINE** (estratta dal DBMI11).*

#	Data	Area Epicentrale	I <sub>0</sub> (MCS)	M <sub>w</sub>	I <sub>s</sub> (MCS)
1	1875 03 17 23:51	Romagna sud-orientale		5.93 ±0.16	4
2	1898 01 16 12:10:05	Romagna settentrionale	6-7	4.79 ±0.33	4
3	1904 11 17 05:02	Pistoiese	7	5.15 ±0.14	NF
4	1909 01 13 00:45	BASSA PADANA	6-7	5.53 ±0.09	5
5	1911 02 19 07:18	Romagna meridionale	7	5.28 ±0.11	5
6	1913 07 21 22:35	VALLE DEL LAMONE	5-6	4.78 ±0.19	NF
7	1915 01 13 06:52	Avezzano	11	7.00 ±0.09	2
8	1916 05 17 12:49:50	Alto Adriatico		5.95 ±0.14	5
9	1916 08 16 07:06	Alto Adriatico		6.14 ±0.14	5
10	1918 11 10 15:12:28	Appennino romagnolo	9	5.88 ±0.11	3-4
11	1919 06 29 15:06:12	Mugello	10	6.29 ±0.09	2
12	1920 09 07 05:55:40	Garfagnana	10	6.48 ±0.09	3
13	1929 04 10 05:43:12	Bolognese	7	5.03 ±0.13	3-4
14	1930 10 30 07:13:13	SENIGALLIA	8	5.81 ±0.09	3
15	1956 02 20 01:29:41	ARGENTA	5-6	4.82 ±0.18	5-6
16	1986 12 06 17:07:20	BONDENO	6	4.61 ±0.10	NF
17	2000 05 06 22:07:04	Emilia Romagna	5	4.17 ±0.09	NF

\*N.F (not felt-non avvertito)

*Tabella 3.2 – Storia sismica del Comune di **BAGNACAVALLO** (estratta dal DBMI11).*

#	Data	Area Epicentrale	I <sub>0</sub> (MCS)	M <sub>w</sub>	I <sub>s</sub> (MCS)
1	1688 04 11 12:20	Romagna	8-9	5.78 ±0.35	8-9
2	1781 04 04 21:20	Romagna	9-10	5.94 ±0.17	4-5
3	1781 07 17 09:40	Romagna	8	5.58 ±0.26	5
4	1875 03 17 23:51	Romagna sud-orientale		5.93 ±0.16	5
5	1895 03 23	COMACCHIO	6	4.74 ±0.31	3
6	1898 01 16 12:10:05	Romagna settentrionale	6-7	4.79 ±0.33	3
7	1898 03 04 21:05	Valle del Parma	7-8	5.41 ±0.09	NF
8	1904 11 17 05:02	Pistoiese	7	5.15 ±0.14	NF
9	1909 01 13 00:45	BASSA PADANA	6-7	5.53 ±0.09	5-6
10	1911 02 19 07:18	Romagna meridionale	7	5.28 ±0.11	4-5
11	1929 04 10 05:43:12	Bolognese	7	5.03 ±0.13	4
12	1935 06 05 11:48:02	Faentino	6	5.16 ±0.25	4
13	1948 06 13 06:33:31	Valtiberina	7	5.05 ±0.14	NF
14	1963 08 09 06:05:30	Faentino		4.99 ±0.18	6
15	1971 10 04 16:43:33	NORCIA		4.99 ±0.16	NF
16	1980 11 23 18:34:52	Irpinia-Basilicata	10	6.89 ±0.09	3
17	1983 11 09 16:29:52	Parmense	6-7	5.06 ±0.09	NF
18	1986 12 06 17:07:20	BONDENO	6	4.61 ±0.10	NF
19	2000 05 06 22:07:04	Emilia Romagna	5	4.17 ±0.09	3
20	2000 05 08 12:29:56	Emilia Romagna	5	4.66 ±0.09	3-4
21	2000 05 10 16:52:12	Emilia Romagna	5-6	4.86 ±0.09	4
22	2003 12 07 10:20:33	Zona Forlì	5	4.22 ±0.09	2

\*N.F (not felt-non avvertito)

*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio dei Comuni della Bassa Romagna (RA)*  
Relazione Tecnico Illustrativa

*Tabella 3.3 – Storia sismica del Comune di **BAGNARA DI ROMAGNA** (estratta dal DBMI11).*

#	Data	Area Epicentrale	Io(MCS)	Mw	Is(MCS)
1	1688 04 11 12:20	Romagna	8-9	5.78 ±0.35	6-7
2	1899 06 26 23:17:22	Valle del Bisenzio	7	5.06 ±0.15	NF
3	1909 01 13 00:45	BASSA PADANA	6-7	5.53 ±0.09	6
4	1986 12 06 17:07:20	BONDENO	6	4.61 ±0.10	NF
5	2000 05 06 22:07:04	Emilia Romagna	5	4.17 ±0.09	5
6	2000 05 08 12:29:56	Emilia Romagna	5	4.66 ±0.09	4-5
7	2000 05 10 16:52:12	Emilia Romagna	5-6	4.86 ±0.09	4
8	2003 12 07 10:20:33	Zona Forlì	5	4.22 ±0.09	NF

\*N.F (not felt-non avvertito)

*Tabella 3.4 – Storia sismica del Comune di **CONSELICE** (estratta dal DBMI11).*

#	Data	Area Epicentrale	Io(MCS)	Mw	Is(MCS)
1	1688 04 11 12:20	Romagna	8-9	5.78 ±0.35	6
2	1895 03 23	COMACCHIO	6	4.74 ±0.31	3-4
3	1895 04 14 22:17	Slovenia	8	6.23 ±0.08	NF
4	1898 01 16 12:10:05	Romagna settentrionale	6-7	4.79 ±0.33	4
5	1956 02 20 01:29:41	ARGENTA	5-6	4.82 ±0.18	F
6	1980 11 23 18:34:52	Irpinia-Basilicata	10	6.89 ±0.09	3
7	1986 12 06 17:07:20	BONDENO	6	4.61 ±0.10	3
8	2000 05 06 22:07:04	Emilia Romagna	5	4.17 ±0.09	3-4
9	2000 05 08 12:29:56	Emilia Romagna	5	4.66 ±0.09	NF
10	2000 05 10 16:52:12	Emilia Romagna	5-6	4.86 ±0.09	2
11	2003 09 14 21:42:53	Appennino bolognese	6	5.29 ±0.09	4

\*N.F (not felt-non avvertito)

*Tabella 3.5 – Storia sismica del Comune di **COTIGNOLA** (estratta dal DBMI11).*

#	Data	Area Epicentrale	Io(MCS)	Mw	Is(MCS)
1	1688 04 11 12:20	Romagna	8-9	5.78 ±0.35	9
2	1898 01 16 12:10:05	Romagna settentrionale	6-7	4.79 ±0.33	NF
3	1956 04 26 03:00:03	Appennino tosco-emiliano	6	4.77 ±0.14	2
4	1971 07 15 01:33:23	Parmense	8	5.64 ±0.09	4
5	1986 12 06 17:07:20	BONDENO	6	4.61 ±0.10	NF
6	1998 03 26 16:26:17	Appennino umbro-marchigiano	6	5.29 ±0.09	3
7	2000 05 06 22:07:04	Emilia Romagna	5	4.17 ±0.09	4-5
8	2000 05 08 12:29:56	Emilia Romagna	5	4.66 ±0.09	4-5
9	2003 12 07 10:20:33	Zona Forlì	5	4.22 ±0.09	NF

\*N.F (not felt-non avvertito)

*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio dei Comuni della Bassa Romagna (RA)*  
Relazione Tecnico Illustrativa

*Tabella 3.6 – Storia sismica del Comune di FUSIGNANO (estratta dal DBMI11).*

#	Data	Area Epicentrale	Io(MCS)	Mw	Is(MCS)
1	1688 04 11 12:20	Romagna	8-9	5.78 ±0.35	6
2	1874 10 07	IMOLESE	7	5.02 ±0.18	4-5
3	1875 03 17 23:51	Romagna sud-orientale		5.93 ±0.16	3
4	1909 01 13 00:45	BASSA PADANA	6-7	5.53 ±0.09	5
5	1911 02 19 07:18	Romagna meridionale	7	5.28 ±0.11	5
6	1967 12 30 04:19:20	BASSA PADANA	6	5.24 ±0.19	6
7	1971 10 04 16:43:33	NORCIA		4.99 ±0.16	NF
8	1983 11 09 16:29:52	Parmense	6-7	5.06 ±0.09	2
9	1986 12 06 17:07:20	BONDENO	6	4.61 ±0.10	NF
10	2000 05 06 22:07:04	Emilia Romagna	5	4.17 ±0.09	NF
11	2000 05 08 12:29:56	Emilia Romagna	5	4.66 ±0.09	3-4
12	2000 05 10 16:52:12	Emilia Romagna	5-6	4.86 ±0.09	NF

\*N.F (not felt-non avvertito)

*Tabella 3.7 – Storia sismica del Comune di MASSA LOMBARDA (estratta dal DBMI11).*

#	Data	Area Epicentrale	Io(MCS)	Mw	Is(MCS)
1	1688 04 11 12:20	Romagna	8-9	5.78 ±0.35	7
2	1875 03 17 23:51	Romagna sud-orientale		5.93 ±0.16	5
3	1887 09 30 15:55	Faenza	5	4.33 ±0.50	3
4	1898 01 16 12:10:05	Romagna settentrionale	6-7	4.79 ±0.33	4
5	1898 03 04 21:05	Valle del Parma	7-8	5.41 ±0.09	NF
6	1899 06 26 23:17:22	Valle del Bisenzio	7	5.06 ±0.15	NF
7	1909 01 13 00:45	BASSA PADANA	6-7	5.53 ±0.09	5
8	1911 02 19 07:18	Romagna meridionale	7	5.28 ±0.11	5
9	1971 07 15 01:33:23	Parmense	8	5.64 ±0.09	3
10	1971 10 04 16:43:33	NORCIA		4.99 ±0.16	NF
11	1986 12 06 17:07:20	BONDENO	6	4.61 ±0.10	NF
12	2000 05 06 22:07:04	Emilia Romagna	5	4.17 ±0.09	3
13	2000 05 08 12:29:56	Emilia Romagna	5	4.66 ±0.09	4
14	2000 05 10 16:52:12	Emilia Romagna	5-6	4.86 ±0.09	NF
15	2003 12 07 10:20:33	Zona Forlì	5	4.22 ±0.09	NF

\*N.F (not felt-non avvertito)

*Tabella 3.8 – Storia sismica del Comune di SANT'AGATA SUL SANTERNO (estratta dal DBMI11).*

#	Data	Area Epicentrale	Io(MCS)	Mw	Is(MCS)
1	1688 04 11 12:20	Romagna	8-9	5.78 ±0.35	6
2	1986 12 06 17:07:20	BONDENO	6	4.61 ±0.10	NF
3	2000 05 06 22:07:04	Emilia Romagna	5	4.17 ±0.09	4-5
4	2000 05 08 12:29:56	Emilia Romagna	5	4.66 ±0.09	4-5
5	2000 05 10 16:52:12	Emilia Romagna	5-6	4.86 ±0.09	NF
6	2003 12 07 10:20:33	Zona Forlì	5	4.22 ±0.09	NF

\*N.F (not felt-non avvertito)

*Tabella 3.9 – Storia sismica del Comune di LUGO (estratta dal DBMI1).*

#	Data	Area Epicentrale	Io(MCS)	Mw	Is(MCS)
1	1505 01 03 02:00	Bolognese	8	5.57 ±0.25	F
2	1570 11 17 19:10	Ferrara	7-8	5.46 ±0.25	NC
3	1688 04 11 12:20	Romagna	8-9	5.78 ±0.35	8
4	1781 04 04 21:20	Romagna	9-10	5.94 ±0.17	5
5	1781 07 17 09:40	Romagna	8	5.58 ±0.26	5
6	1873 03 12 20:04	Marche meridionali	8	5.95 ±0.10	4
7	1874 10 07	IMOLESE	7	5.02 ±0.18	2-3
8	1875 03 17 23:51	Romagna sud-orientale		5.93 ±0.16	4
9	1878 03 12 21:36	Bolognese	6	5.06 ±0.30	3
10	1887 09 30 15:55	Faenza	5	4.33 ±0.50	3
11	1891 06 07 01:06:14	Valle d'Illasi	8-9	5.86 ±0.06	4
12	1897 12 18 07:24:20	Appennino umbro-marchigiano	7	5.13 ±0.14	NF
13	1898 01 16 12:10:05	Romagna settentrionale	6-7	4.79 ±0.33	NF
14	1904 06 10 11:15:28	Frignano	6	5.03 ±0.18	NF
15	1904 11 17 05:02	Pistoiese	7	5.15 ±0.14	NF
16	1909 01 13 00:45	BASSA PADANA	6-7	5.53 ±0.09	6-7
17	1911 02 19 07:18	Romagna meridionale	7	5.28 ±0.11	4-5
18	1914 10 27 09:22:36	Garfagnana	7	5.76 ±0.09	5
19	1916 08 16 07:06	Alto Adriatico		6.14 ±0.14	5
20	1919 06 29 15:06:12	Mugello	10	6.29 ±0.09	4
21	1920 09 07 05:55:40	Garfagnana	10	6.48 ±0.09	4
22	1929 04 10 05:43:12	Bolognese	7	5.03 ±0.13	4
23	1929 07 18 21:01:58	Mugello	6-7	5.02 ±0.17	2
24	1930 10 30 07:13:13	SENIGALLIA	8	5.81 ±0.09	3
25	1935 06 05 11:48:02	Faentino	6	5.16 ±0.25	4
26	1948 06 13 06:33:31	Valtiberina	7	5.05 ±0.14	NF
27	1956 02 20 01:29:41	ARGENTA	5-6	4.82 ±0.18	4
28	1956 04 26 03:00:03	Appennino tosco-emiliano	6	4.77 ±0.14	2
29	1983 11 09 16:29:52	Parmense	6-7	5.06 ±0.09	2-3
30	1984 04 29 05:02:60	GUBBIO/VALFABBRICA	7	5.65 ±0.09	2
31	1986 12 06 17:07:20	BONDENO	6	4.61 ±0.10	NF
32	1989 09 13 21:54:01	PASUBIO	6-7	4.88 ±0.09	3
33	2000 05 06 22:07:04	Emilia Romagna	5	4.17 ±0.09	4
34	2000 05 08 12:29:56	Emilia Romagna	5	4.66 ±0.09	4
35	2000 05 10 16:52:12	Emilia Romagna	5-6	4.86 ±0.09	2
36	2003 09 14 21:42:53	Appennino bolognese	6	5.29 ±0.09	4-5
37	2003 12 07 10:20:33	Zona Forlì	5	4.22 ±0.09	NF

\*N.F (not felt-non avvertito)

\*F. (felt-avvertito)

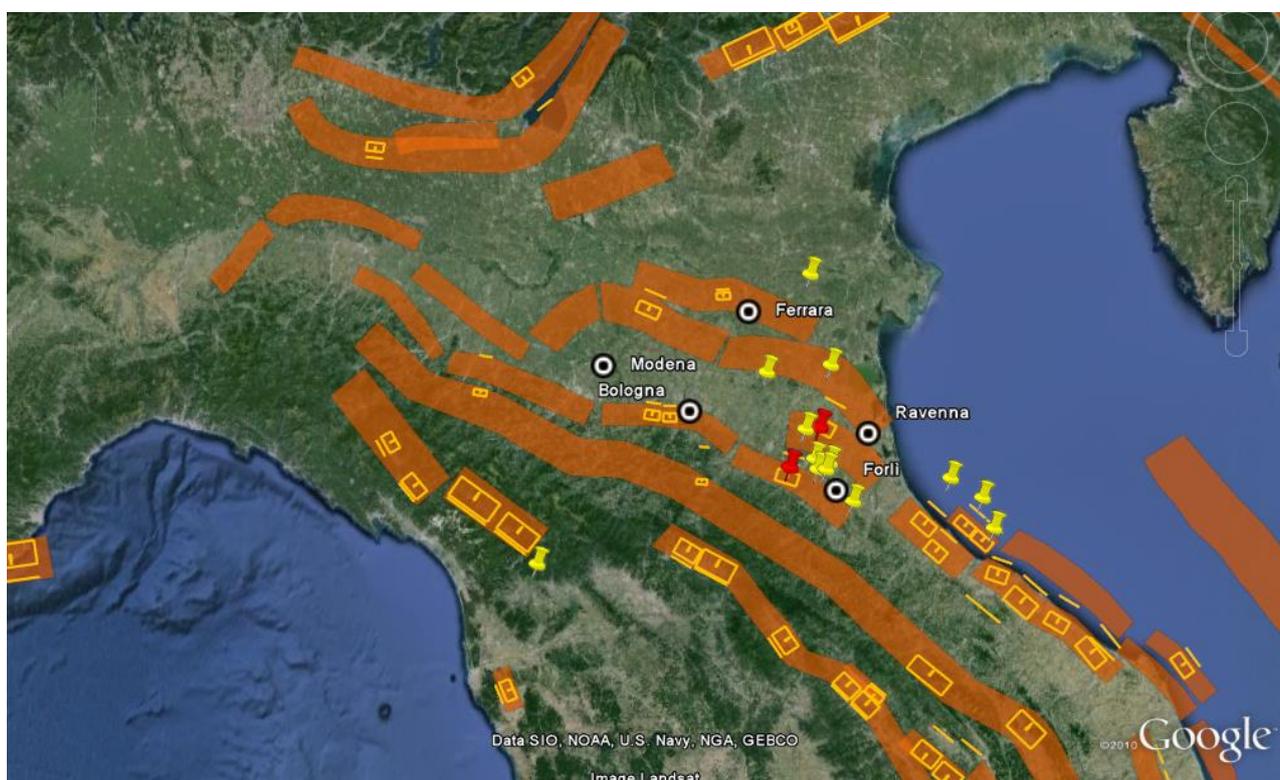
\*N.C. (not classified- non classificato)

L'esame della storia sismica indica 2 eventi di importanza rilevante: il terremoto Romagnolo del 1688 e il terremoto Faentino del 1781.

Il primo sisma ha generato il massimo risentimento e danno ( $VI \leq I_s \leq IX$  MCS) nei Comuni in studio, mentre il secondo risulta importante per fenomenologie di liquefazione.

Da ricerche storiche, infatti, il terremoto del 1781 ha provocato liquefazione indotta nelle località di Castel Bolognese, Pergola e Quartolo (Galli, 2000). Considerando che tali località risultano piuttosto prossime all'area di studio e che non sono attese sensibili differenze da un punto di vista litologico, è molto probabile

che tali fenomenologie si siano verificate anche nel territorio in esame. Ad ogni modo, nonostante l'ipotesi formulata appaia ragionevole, non esistono dati storici che attualmente confermino quanto appena espresso. In Figura 3.2 sono riportate le coordinate epicentrali dei terremoti, che tra tutti gli eventi selezionati dal catalogo, mostrano  $I_s$  (MCS)  $\geq 5$  (solo eventi parametrizzati) in rapporto alle sorgenti sismogenetiche individuate dal catalogo DISS (Database of Individual Seismogenic Sources) dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. I due eventi di maggior rilievo (terremoto Romagnolo del 1688 e terremoto Faentino del 1781) sono indicati mediante segna-posto in rosso.



*Figura 3.2–Epicentri degli eventi sismici selezionati da DBMI11 in rapporto alle sorgenti sismo-genetiche individuate dal catalogo DISS (Database of Individual Seismogenic Sources) dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.*

Dalla disposizione generale degli epicentri è possibile risalire ai principali sistemi di faglie che hanno contribuito maggiormente alla sismicità storica del territorio della Bassa Romagna. In dettaglio si tratta di 2 differenti sistemi di cui 1 appenninico (Etrurian Fault System) ed 1 costiero (Adriatic inshore e offshore).

In figura 3.3 è 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* (<http://www.isprambiente.gov.it/>).

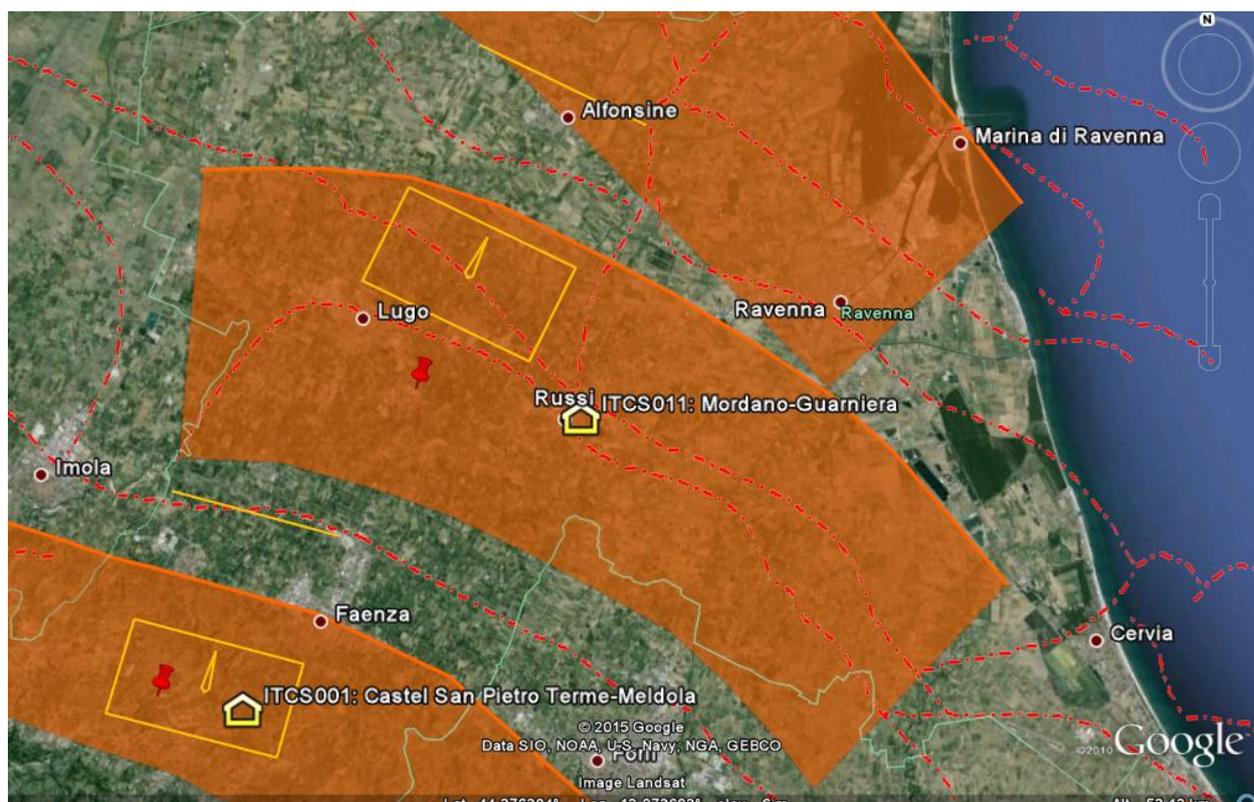


Figura 3.3–Principali faglie che ricadono nell’area di studio. Oltre alle zone sismogenetiche individuate dal DISS (Database of Individual Seismogenic Sources) dell’Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, è possibile visualizzare l’andamento delle principali faglie attive (in rosso tratteggiato) tratte dal catalogo ITHACA (<http://www.isprambiente.gov.it/>).

Com’è possibile osservare i 2 principali eventi di rilievo (terremoto Romagnolo del 1688 e terremoto Faentino del 1781) sono legati rispettivamente ai sistemi di faglie **Mordano-Guarniera** (codice DISS - ITCS011) e **Castel San Pietro Terme-Meldola** (codice DISS -ITCS001).

Entrambi i sistemi di faglia , oltre ad aver generato importanti terremoti storici, hanno recentemente avuto un ruolo fondamentale nelle sequenze sismiche che hanno interessato la zona nel 2000 e nel 2003.

La figura 3.4 riporta l’ubicazione degli epicentri (sia scosse principali “mainshock” che secondarie “aftershock”) delle 2 sequenze sopra citate.

E’ inoltre possibile osservare i meccanismi focali legati alle scosse principali e una sezione cronostatigrafica che con andamento SSW-NNE attraversa l’area di studio.

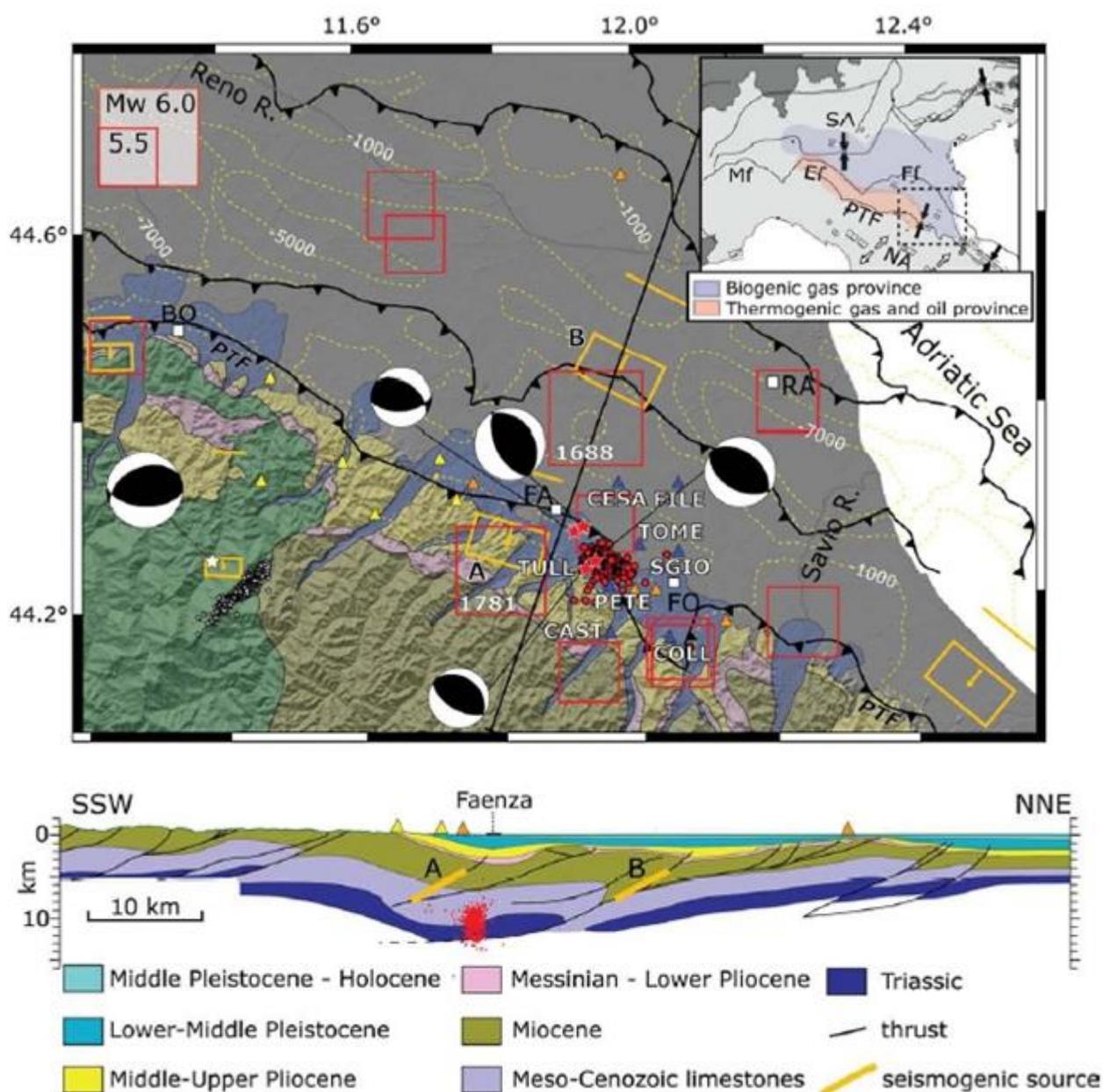


Figura 3.4– In alto: Ubicazione degli epicentri (sia mainshock che aftershock) delle sequenze sismiche del 2000 e del 2003 indicati rispettivamente da pallini rossi e stelline. I meccanismi focali rappresentati si riferiscono alle scosse principali delle 2 sequenze. I quadrati in rosso indicano le aree che, con accertata sismologia storica, hanno risentito di magnitudo momento  $M_w \geq 5.5$  (gruppo di lavoro CPTI2004). I triangoli rappresentano l'ubicazione delle stazioni di misura utilizzate durante le sequenze. In basso: sezione crono-stratigrafica sulla quale è possibile visualizzare gli ipocentri delle differenti scosse. Con A e B vengono indicate le 2 sorgenti sismogenetiche che hanno dato origine ai terremoti storici del 1688 e del 1781(modificata da DISS 3.0).

Nelle tabelle 3.10 e 3.11 vengono indicate le principali caratteristiche dei sistemi **Castel San Pietro Terme –Meldola** e **Mordano-Guarniera** sulla base di evidenze empiriche e dati di letteratura.

Tabella 3.10 Principali parametri del sistema Castel San Pietro Terme –Meldola (da DISS 3.0).

<b>Castel San Pietro Terme-Meldola</b>	
Min Depth (km)	2
Max Depth (km)	8
Strike (deg)	110 - 140
Dip (deg)	30 - 40
Rake (deg)	80 - 100
Slip Rate (mm/y)	0.1 - 0.5
Max Magnitude (Mw)	5.8

Tabella 3.11 Principali parametri del sistema Mordano-Guarniera (da DISS 3.0).

<b>Mordano-Guarniera</b>	
Min Depth (km)	3
Max Depth (km)	8
Strike (deg)	95 - 145
Dip (deg)	20 - 40
Rake (deg)	80 - 100
Slip Rate (mm/y)	0.1 - 0.5
Max Magnitude (Mw)	5.9

Com'è possibile osservare, le 2 tabelle, riportano i valori di Magnitudo Momento massima (Mw-max) associabili alle 2 zone sismogenetiche (rispettivamente 5.8 e 5.9). Tali valori risultano fondamentali nella definizione della Magnitudo di Riferimento dell'area in esame.

Le verifiche di stabilità e di liquefazione dei terreni (previste dal III livello di approfondimento della Microzonazione Sismica) richiedono, infatti, un valore di Magnitudo di partenza legato alle caratteristiche sismiche dell'area da analizzare. Pertanto una scelta accurata e ragionata, di tale valore, comporterà importanti risvolti nella progettazione di opere e nella pianificazione territoriale.

Per la stima del valore di Magnitudo di Riferimento per il territorio della Bassa Romagna, oltre ai già citati valori Mw-max associati alle singole sorgenti sismogenetiche, sono stati presi in considerazione:

- i contributi alla pericolosità sismica computati per tutte le sorgenti sismogenetiche in termini di Magnitudo-Distanza (**Disaggregazione M-R**);
- i singoli valori di Magnitudo (strumentali ed analitici) stimati e computati a partire dagli eventi del catalogo parametrico DBMI-CPTI11;
- Zonazione Sismogenetica **ZS9** (Ordinanza PCM 20 marzo 2003 n. 3274).

La formulazione della “**disaggregazione**” (Bazzurro e Cornell; 1999) realizzata a partire dalle mappe di pericolosità INGV (Spallarossa e Barani; 2007), fornisce una distribuzione di coppie magnitudo – distanza (M-R- $\epsilon$ ) dove  $\epsilon$  è legato alla legge di attenuazione utilizzata per il territorio italiano. Realizzata a partire dai valori medi di scuotimento relativi a suolo rigido (accelerazione orizzontale di picco PGA) corrispondenti a 9 differenti periodi di ritorno (RP), la distribuzione M-R- $\epsilon$  può essere calcolata per ciascuno dei 16852 nodi che formano la griglia della mappa di Pericolosità Sismica Nazionale (<http://esse1-gis.mi.ingv.it/>). In figura 3.5 è mostrato il diagramma di disaggregazione riferito al nodo maggiormente prossimo al centro abitato di Lugo.

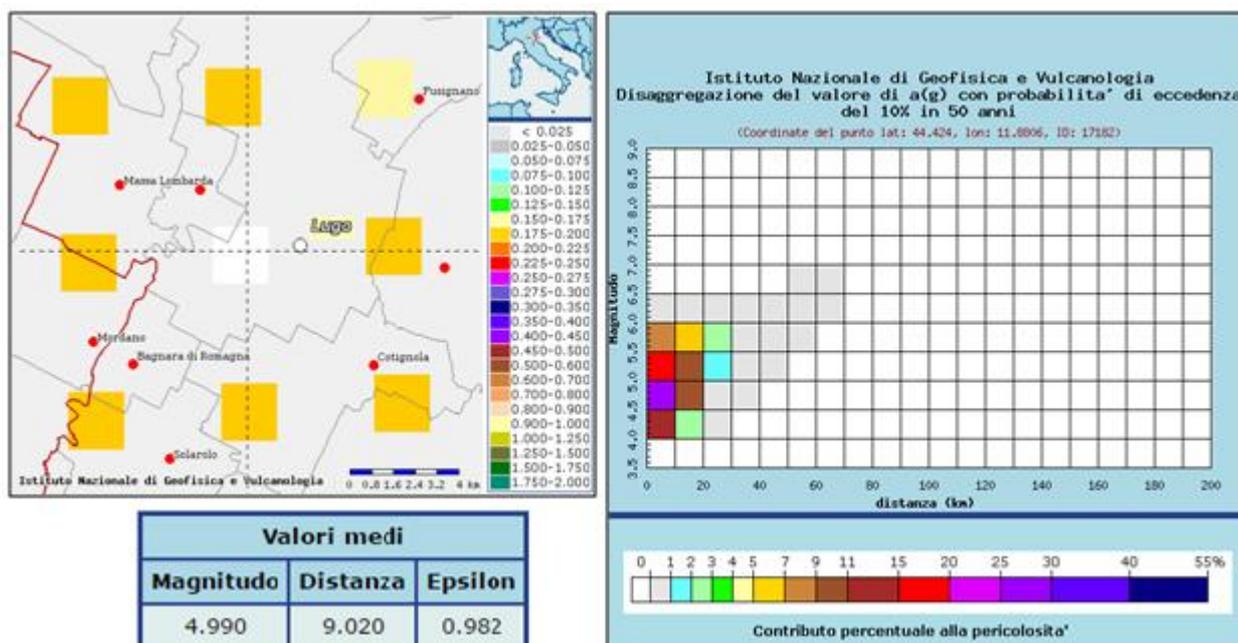


Figura 3.5–Diagramma di “Disaggregazione” per Lugo (RA) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni.

Com’è possibile osservare il massimo contributo alla pericolosità di Lugo (25-30%) è legato a Magnitudo comprese tra 4.5 e 5 per distanze inferiori ai 10 Km.

Dalla distribuzione M-R- $\epsilon$  sono inoltre stati estratti i valori medi di Magnitudo-Distanza che ad esempio, in prossimità di Lugo (zona baricentrica all’area), risultano  $M = 4.9$  e  $R = 9$  Km.

In generale, i valori tendono ad essere poco cautelativi rispetto a quelli determinati dalle singole zone sismogenetiche (tabelle 3.10 e 3.11), inoltre la natura a “scala territoriale” dello studio in oggetto mal si adatta a tale tipo di formulazione. Alla luce di quanto appena espresso, è stato scelto, di non far riferimento ai valori M-R determinati da **disaggregazione** per le successive verifiche di stabilità e di liquefazione.

Differentemente il dato medio di Mw-Max, computato a partire da tutti gli eventi del catalogo parametrico DBMI-CPTI11, risulta di 5.91. Dunque, si accorda molto bene con i valori legati alle 2 aree sismogenetiche precedentemente descritte, anche perché nella definizione di tale Magnitudo, sono intervenuti i terremoti generati dai questi 2 sistemi di faglia.

Tale valore sembra essere realistico per l'area in esame; tuttavia essendo basato unicamente su l'analisi dei terremoti storici, non ha alcuna caratteristica "previsionale" per possibili terremoti futuri. La Magnitudo di Riferimento, infatti, dovrebbe non solo tener conto dei terremoti storici ma anche di quelli potenziali che potrebbero verificarsi, stimabili in base alle caratteristiche delle varie sorgenti sismogenetiche (qualsiasi statistica basata sui terremoti storici prende in considerazione una finestra temporale decisamente breve).

Ragionando in tal senso, la parametrizzazione prevista dalla Zonazione ZS9 risulta senza dubbio la più completa e recente.

Lo studio ZS9 del 2004 ("Gruppo di Lavoro per la redazione della Mappa della Pericolosità Sismica" dell'INGV) 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. L'area di studio ricade nella "Dorsale Ferrarese" definita come ZS n. 912 in figura 3.6 e 3.7.

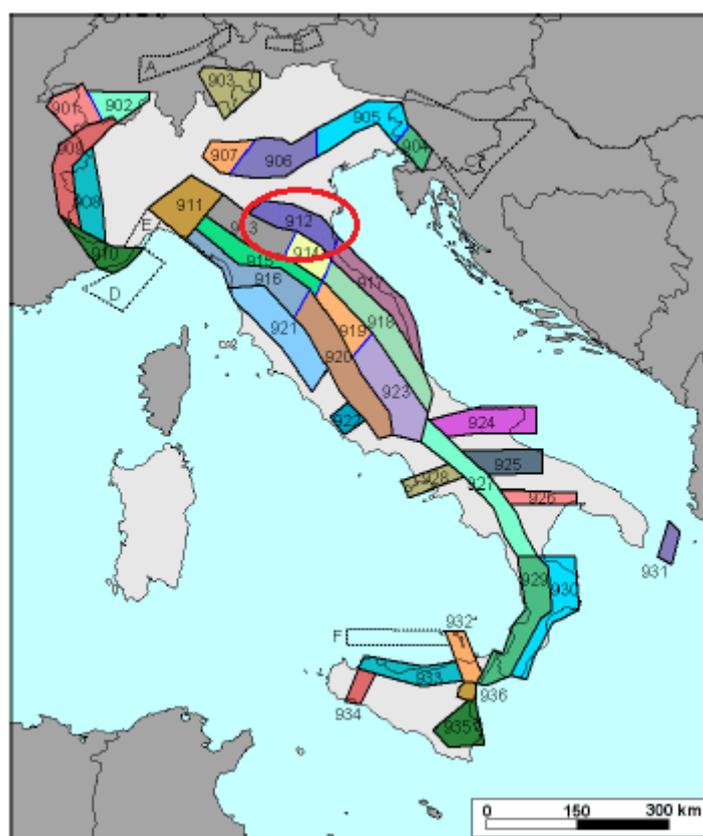


Figura 3.6–Zonazione Sismogenetica ZS9 ("Gruppo di Lavoro per la redazione della Mappa della Pericolosità Sismica" dell'INGV, 2004). Evidenziata in rosso la ZS n. 912 "Dorsale Ferrarese".

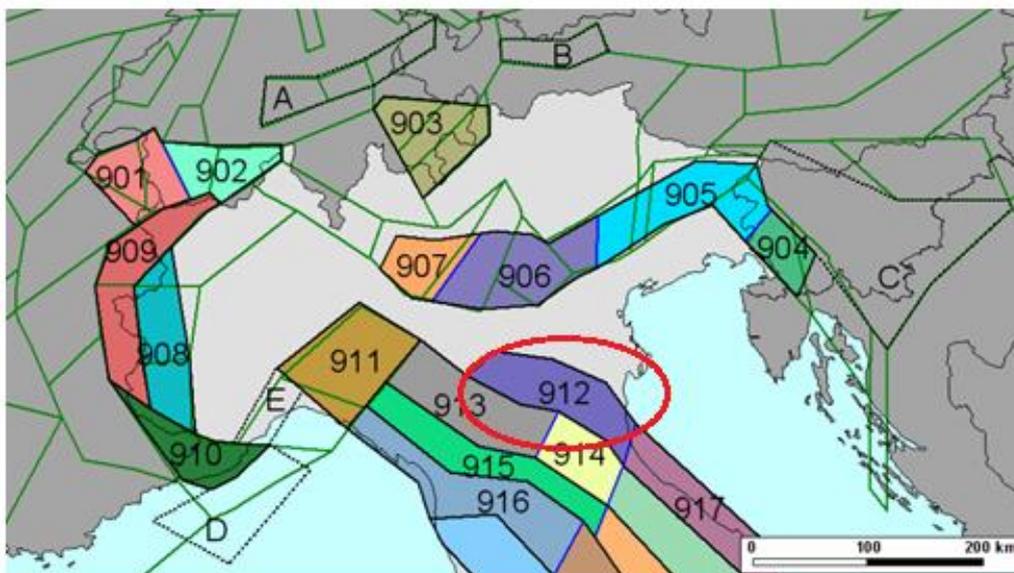


Figura 3.7–Dettaglio della Zonazione Sismogenetica ZS9 (“Gruppo di Lavoro per la redazione della Mappa della Pericolosità Sismica” dell’INGV, 2004). Evidenziata in rosso la ZS n. 912 “Dorsale Ferrarese”.

Le caratteristiche associate a tale zona prevedono:

- un meccanismo focale prevalente di tipo “inverso”;
- una Magnitudo Momento Massima “Osservata” ( $M_w$ -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” ( $M_w$ -max2) definita aggiungendo un margine di sicurezza rispetto alla  $M_w$ -max1.

In dettaglio, l’area n.912 prevede sia la  $M_w$ -max1 che la  $M_w$ -max2 pari a 6.14. Le caratteristiche dell’area, permettono di ritenere, infatti, tale valore già di per sé sufficientemente cautelativo e a carattere “previsonale”.

Pertanto la  **$M_w$ max di 6.14** è stata considerata come Magnitudo di Riferimento per l’area di studio. Tale valore è stato adottato, dunque, nelle verifiche di stabilità e di liquefazione dei terreni previste dagli approfondimenti di III livello della Microzonazione Sismica.

Per completare l’inquadramento sismico dell’area, in accordo con quanto descritto nell’Allegato A4 alla Delibera dell’Assemblea legislativa progr. n°112 - oggetto n°3121 del 2 maggio 2007 della Regione Emilia-Romagna, per ciascun Comune in studio è stato, infine, calcolato lo spettro di risposta a probabilità uniforme che descrive le caratteristiche del moto sismico atteso per un periodo di ritorno di 475 anni (con smorzamento pari al 5%).

In Figura 3.7 sono mostrati i vari spettri normalizzati computati a partire dai valori di accelerazione massima orizzontale di picco al suolo ( $T = 0$ ) rilasciati dalla Regione Emilia-Romagna e riportati in Tabella 3.12.

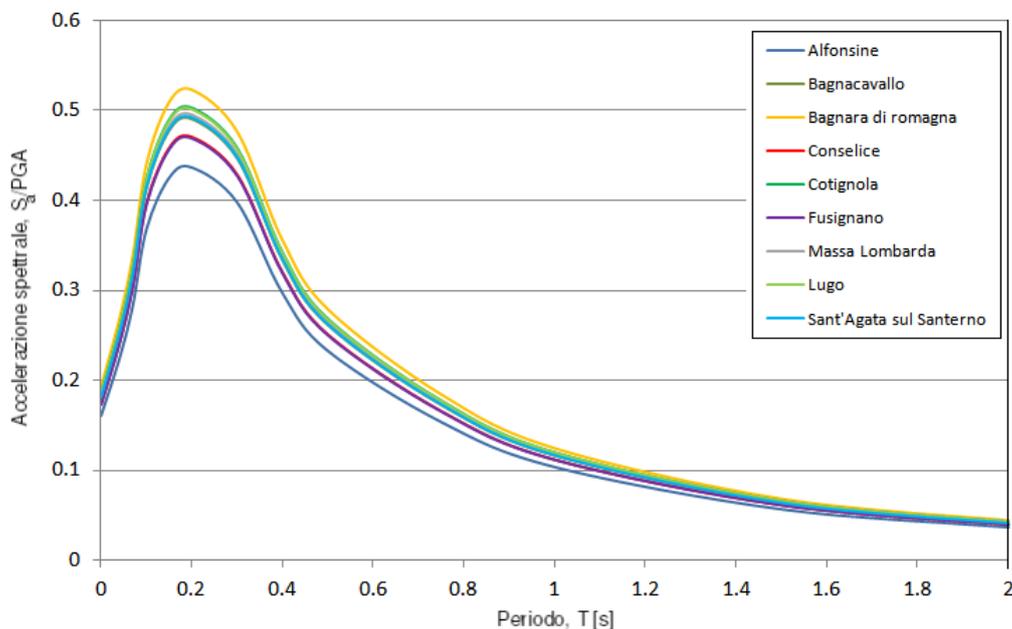


Figura 3.5– Spettri normalizzati computati a partire dai valori di accelerazione massima orizzontale di picco riportati in Tabella 3.12.

Tabella 3.12 – valori di accelerazione massima orizzontale di picco al suolo

<b>Comune</b>	<b>Accelerazione massima orizzontale di picco (g)</b>
<b>Alfonsine</b>	<b>0.161</b>
<b>Bagnacavallo</b>	<b>0.181</b>
<b>Bagnara di Romagna</b>	<b>0.193</b>
<b>Conselice</b>	<b>0.174</b>
<b>Cotignola</b>	<b>0.186</b>
<b>Fusignano</b>	<b>0.173</b>
<b>Massa Lombarda</b>	<b>0.183</b>
<b>Lugo</b>	<b>0.185</b>
<b>Sant'Agata sul Santerno</b>	<b>0.182</b>

## **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 222 Lugo scala 1:50.000 (Progetto Carg 2009).
- Carta Geologica D'Italia Foglio 223 Ravenna scala 1:50.000 (Progetto Carg 2002).
- Carta Geologica D'Italia Foglio 239 Faenza scala 1:50.000 (Progetto Carg 2007).
- Carta Geologica D'Italia Foglio 240 Forlì - Cervia scala 1:50.000 (Progetto Carg 2005).
- Il Paesaggio Geologico dell'Emilia-Romagna della Regione Emilia-Romagna - Servizio Geologico, sismico e dei suoli Anno 2009.
- Piano Strutturale Associato dei Comuni della Bassa Romagna (Marzo, 2009).

### **4.2. Inquadramento geomorfologico**

Il territorio dell'Unione dei Comuni delle Bassa Romagna si sviluppa interamente all'interno della Pianura Padana, una depressione tettonica formatasi fra le Alpi e gli Appennini quando tali catene montuose si sollevarono ed emersero dal mare in seguito a fenomeni orogenetici, colmata successivamente da depositi di materiali sciolti di origine fluviale, deltizia e marina. In particolare l'area oggetto di studio è totalmente ricompresa all'interno della Pianura Alluvionale, caratterizzata dal fatto che i sedimenti sono stati trasportati esclusivamente dai fiumi appenninici.

Il territorio è caratterizzato da una superficie topografica piuttosto regolare che si immerge progressivamente verso NE fino a raggiungere il livello del mare; esso può essere distinto in due settori: un settore di alta pianura ed uno di bassa pianura.

L'alta pianura si sviluppa a ridosso del margine appenninico ed è caratterizzata da quote comprese tra 50 e 10 m s.l.m., da gradienti relativamente elevati (circa 1 m di quota ogni 300 m) e da un reticolo idrografico generalmente inciso. Le quote topografiche più elevate si registrano a sud di Castel Guelfo, fino ad arrivare a nord all'allineamento Bagnacavallo - Lugo – Massa Lombarda - Buda.

La bassa pianura è caratterizzata da quote inferiori (comprese tra 10 e -1 m s.l.m.), da gradienti bassi (circa 1 m di quota ogni 2 km) e da un reticolo idrografico non inciso, generalmente pensile. Nel margine settentrionale del Foglio 222 è tipicamente diffusa una morfologia valliva caratterizzata da ampie zone depresse (aree di intercanale e casse di espansione) separate da rilevati e dossi (argini e canali). In particolare, a nord degli abitati di S. Biagio e Filo e ad ovest di Longastrino (Foglio 223), si individuano aree topograficamente depresse che raggiungono quote di 1 m al di sotto del livello del mare.

Il reticolo di corsi d'acqua è piuttosto fitto. I fiumi principali, che scorrono da SO verso NE, seguendo il gradiente topografico regionale, sono (da ovest) il T. Sillaro, il F. Santerno e il F. Senio. Nel margine NE del Foglio 222 (Progetto Carg 2002) è presente, con andamento NO-SE quasi perpendicolare ai precedenti corsi d'acqua, un tratto artificializzato del F. Reno, nel quale confluiscono il T. Sillaro, in prossimità dell'abitato di S. Biagio, e il F. Santerno, a nord di Voltana. Questi corsi d'acqua sono alimentati da bacini idrografici montani relativamente poco estesi: quello del T. Sillaro è di c.a. 135 km<sup>2</sup>, quello del F. Santerno è di c.a. 420 km<sup>2</sup> e quello del F. Senio è di c.a. 270 km<sup>2</sup>.

Nelle zone di alta pianura, limitatamente al margine di SO a sud di Castel Guelfo, il T. Sillaro è inciso nei depositi della pianura lungo scarpate di terrazzo di pochi metri. Nell'area restante i corsi d'acqua sono confinati entro argini, in gran parte artificiali, che diventano particolarmente elevati nel settore della bassa pianura dove il massimo dislivello argine-pianura raggiunge i 10 m.

I corsi d'acqua secondari sono costituiti da una fitta rete di torrenti, fossi, scoli e canali di bonifica che drenano gran parte dell'area, ma che si concentrano particolarmente nei quadranti settentrionali della bassa pianura.

Si sottolinea il fatto che le forme dei depositi e i processi sedimentari legati all'attività dei corsi d'acqua sono stati profondamente modificati dall'intervento antropico; l'attuale aspetto geomorfologico dell'area, come la maggior parte della pianura emiliano-romagnola, è un chiaro prodotto dell'interazione tra l'evoluzione naturale della piana alluvionale e l'attività dell'uomo.

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

L'assetto strutturale delle successioni sepolte plio-pleistoceniche nel settore di pianura in esame è dato da una serie di pieghe e *thrust* ad andamento parallelo con orientazione circa NO-SE ed è stato descritto a scala regionale nei lavori di Pieri & Groppi (1981), CNR (1990) e Regione Emilia-Romagna & CNR (2002).

L'area di studio si estende in un settore caratterizzato da una prima fascia di pieghe e sovrascorrimenti sepolti, più prossima al margine appenninico e circa parallela ad esso e da una seconda fascia più esterna e con forma arcuata (rispettivamente "pieghe romagnole e ferraresi" in Pieri & Groppi, 1981). Tra queste due fasce dominate dalle culminazioni strutturali si estende nella parte centrale e settentrionale un'ampia sinclinale, il cui asse è orientato circa NO-SE lungo l'allineamento Fusignano - Conselice, ed immergente blandamente verso SE.

La sinclinale è limitata verso sud da una fascia di anticlinali e fronti di *thrust* allineati fra Bagnacavallo - Lugo - Massa Lombarda - Buda e, a nord, da una culminazione strutturale con un asse orientato secondo l'allineamento Longastrino - Argenta - Consandolo. Tra i *thrust* di Bagnacavallo - Lugo - Massa Lombarda - Buda e il *thrust* del fronte pedecollinare appenninico, che in questo settore corre tra Faenza e Imola, si

sviluppa un'area strutturalmente articolata e la sinclinale compresa tra le due culminazioni risulta variamente segmentata e deformata. Nel settore centrale, immediatamente ad est di Alfonsine e Bagnacavallo, si

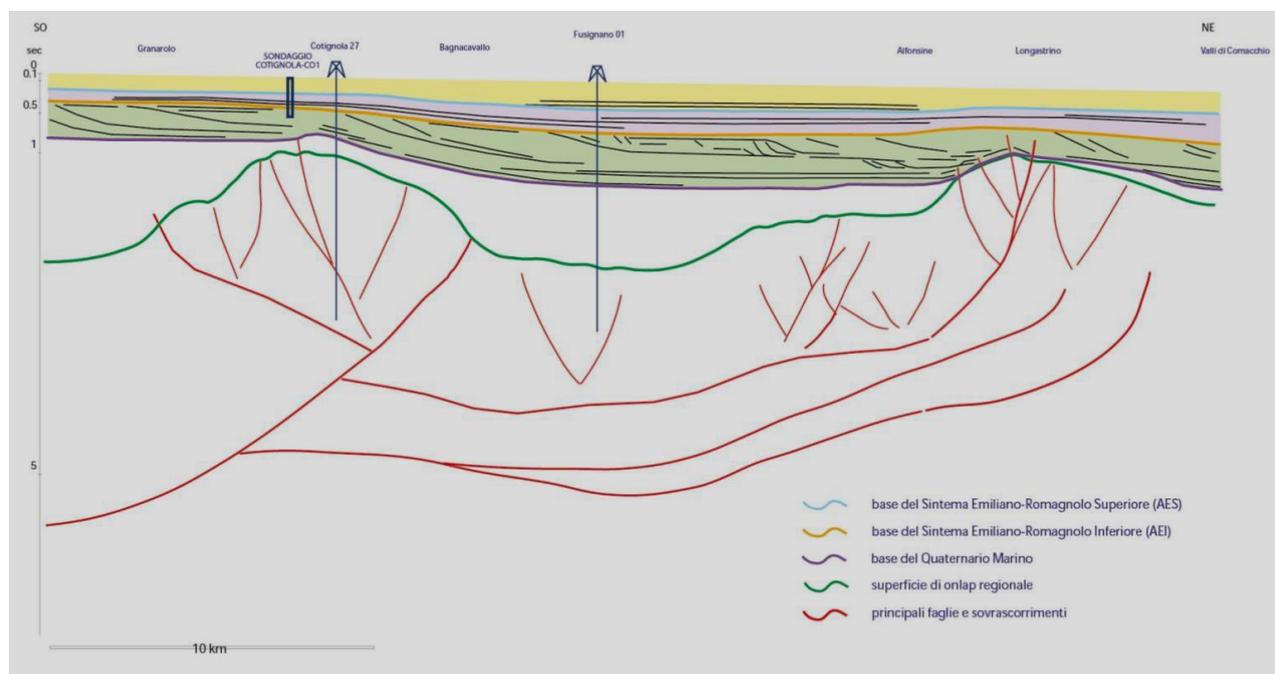
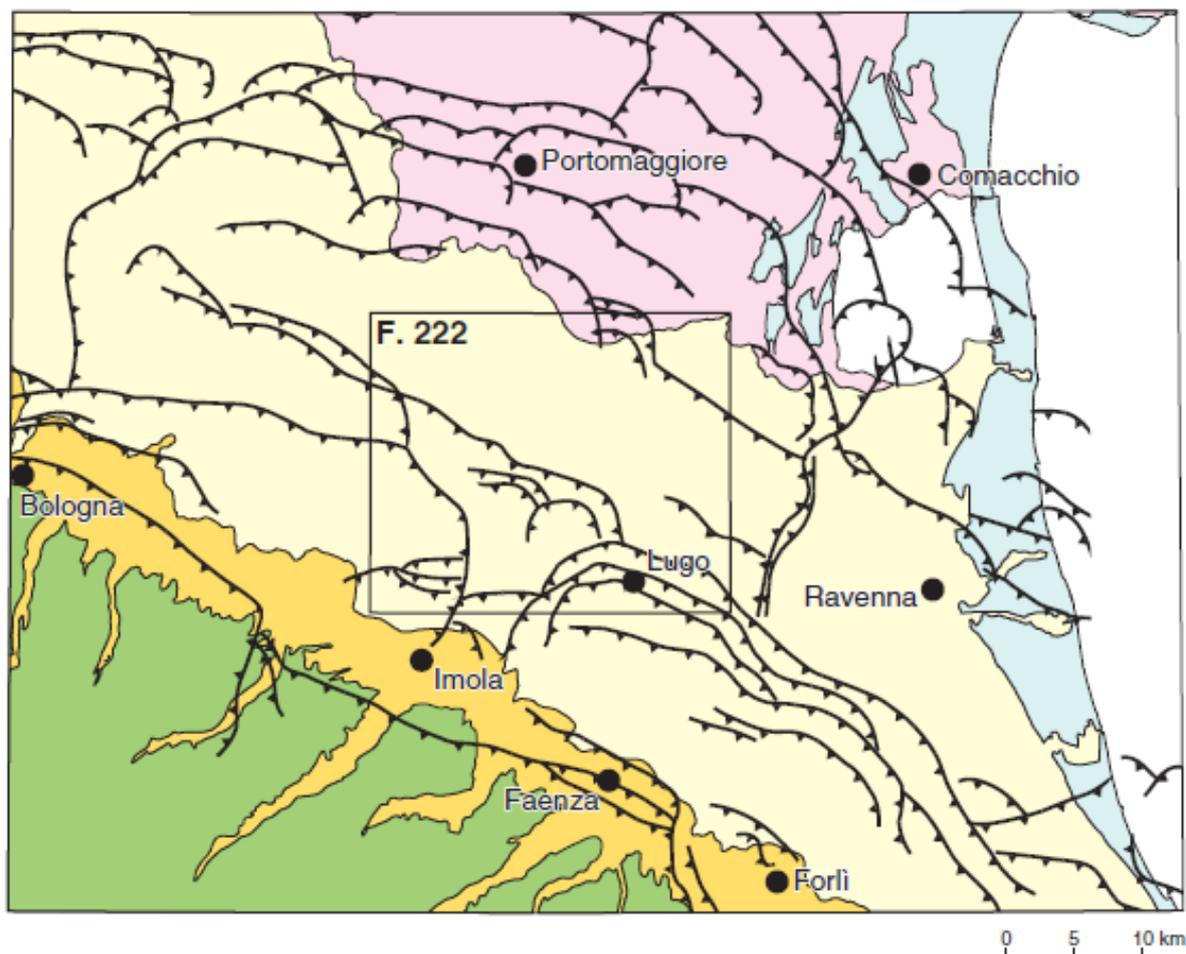


Figura 4.1–Profilo sismico ENI-AGIP. La traccia in pianta attraversa con direzione SO-NE l'area di studio (modificato da Note illustrative del Foglio 222 Lugo).

osservano importanti discontinuità trasversali all'andamento generale dei lineamenti tettonici, imputate alla presenza delle rampe laterali dei *thrust* e/o di *tear faults*.

I risultati, appena esposti, scaturiscono dall'interpretazione di dati geofisici e di sondaggio legati alle attività estrattive ENI-AGP (per maggiori dettagli note illustrative Foglio 222 progetto CARG). In Figura 4.1 è riportata l'interpretazione di una sezione sismica profonda, realizzata tra Faenza e le Valli di Comacchio che riassume l'assetto strutturale precedentemente delineato.

In Figura 4.2 è riportato uno stralcio della mappa geologico-strutturale allegata al Foglio 222-Lugo progetto CARG, dove è possibile osservare gli andamenti in pianta dei principali sovrascorrimenti profondi evidenziati dall'indagine sismica.



DEPOSITI OLOCENICI E PLEISTOCENICI DEL MARGINE APPENNINICO E DELLA PIANURA PADANA

- |  |   |
|--|---|
|  Depositi di conoide e terrazzo alluvionale               |  Depositi di piana alluvionale |
|  Depositi deltizi del Fiume Po                            |  Depositi costieri             |
|  <b>SUCCESSIONI SEDIMENTARIE DELLA CATENA APPENNINICA</b> |   |
|  Sovrascorrimenti principali sepolti                      |   |

Figura 4.2– Inquadramento geologico-strutturale. Sono riportate le tracce dei principali sovrascorrimenti sepolti; i depositi affioranti del margine appenninico e della pianura padana sono distinti sulla base dei principali domini deposizionali (modificato da Regione Emilia-Romagna, 1999 e Regione Emilia-Romagna & CNR, 2002).

#### 4.4 Assetto stratigrafico

La Pianura Padana rappresenta l'avanfossa delle Alpi Meridionali e dell'Appennino, delineatasi strutturalmente a partire dall'Oligocene, quando entrambe le catene sono diventate 'padano-vergenti'.

I depositi quaternari di età successiva al Pleistocene medio, che costituiscono in prevalenza lo strato acquifero della regione Emilia Romagna, fanno parte del riempimento del Bacino Perisuturale Padano legato all'orogenesi dell'Appennino Settentrionale (Regione Emilia Romagna e Eni-Agip, 1998). A partire dall'Oligocene la Pianura Padana ha costituito un bacino di avanfossa fortemente subsidente, nel quale si è realizzato un ciclo di sedimentazione marina che si è concluso nel Messiniano. Nel settore pedeappenninico la sedimentazione marina si è avuta prevalentemente dal Pliocene inferiore al Pleistocene medio-superiore, con forte accentuazione della subsidenza, differenziata nello spazio e controllata dalle strutture tettoniche. A scala padana la successione plio-quaternaria ha carattere regressivo, con alla base sabbie e peliti torbiditiche seguite da un prisma di sedimentazione fluvio-deltizio, progradante, che presenta a tetto depositi continentali.

Durante tutto il Pleistocene medio i sedimenti che riempiono l'avanfossa padana, sono interamente costituiti da formazioni in facies marina, anche se sporadicamente interrotti da episodi trasgressivi più o meno generalizzati: solo a partire da questa epoca compaiono depositi aventi carattere continentale, specificatamente fluviale. Il passaggio dalla sedimentazione marina a quella continentale, è contrassegnato da depositi di transizione quali sabbie e ghiaie, talora cementate, di ambiente litoraneo e peliti sabbiose e ghiaie di ambiente deltizio, databili alla fine del Pleistocene inferiore.

Il ritiro delle acque dal golfo padano, che avviene da ovest verso est e dai margini delle catene verso l'asse della pianura, non è di tipo univoco e progressivo, al contrario, con movimenti alterni, per cui nei sedimenti si ha l'alternanza tra i depositi marini e di transizione con gli episodi di tipo continentale. L'alternarsi delle diverse facies è legato alle glaciazioni che si sono succedute nel Quaternario con le relative variazioni del livello del mare e a movimenti tettonici che determinano sollevamenti nella catena e subsidenza nella pianura.

Le facies che succedono a quelle marine ed in generale l'insieme dei depositi quaternari di origine continentale rappresentano geologicamente un'unità stratigrafica conosciuta col nome di Super-Sintema Emiliano-Romagnolo (precedentemente definita come ciclo Qc da Ricci Lucchi *et alii*, 1982). I cicli deposizionali all'interno del *Super-Sintema* sono organizzati in due principali sottosistemi con diverso ordine gerarchico e definiti come Sintema Inferiore (AEI) e Sintema Superiore (AES). Il primo è dominato da facies fluvio-deltizie per lo più costituiti da sabbie di provenienza padana, mentre nel secondo si sviluppano prevalentemente le facies francamente fluviali di conoide e di piana alluvionale legate a sistemi di provenienza appenninica.

Un'ulteriore suddivisione gerarchica è stata realizzata per l'unità AES in differenti sub-sistemi, ognuno dei quali delimita depositi geometricamente discordanti tra loro.

In Figura 4.3 è riportata uno stralcio della sezione geologica Imola-Comacchio (allegata al Foglio 222-Lugo) sezione che chiarisce i rapporti giacitureali tra i differenti sub-sistemi.

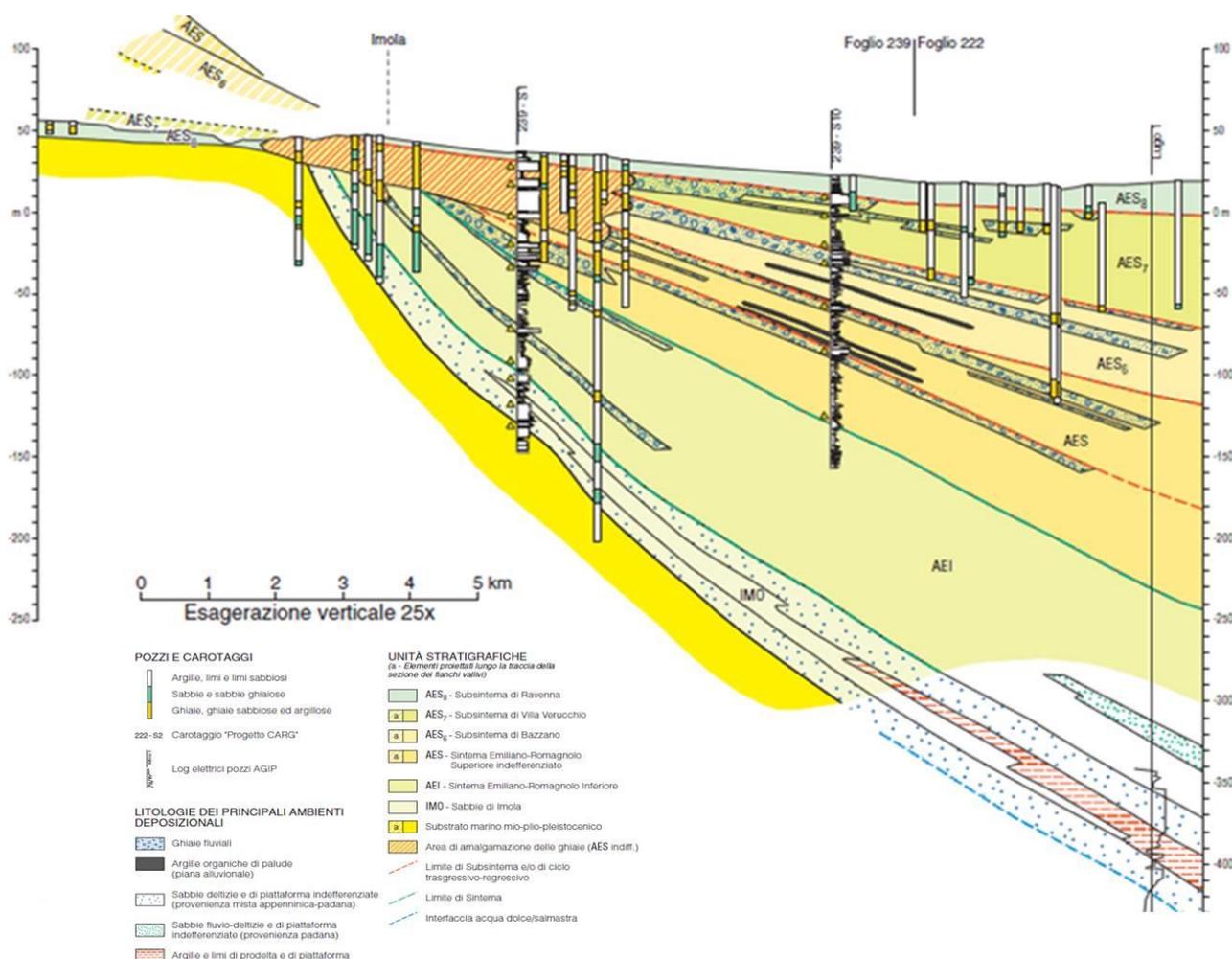


Figura 4.3– Particolare della sezione geologica profonda Imola-Comacchio che ritrae l’assetto stratigrafico del sottosuolo del settore della valle del F. Santerno.

In dettaglio, dall’ alto verso il basso, l’area di studio (si noti l’ubicazione di Lugo nella sezione di figura 4.3) è interessata dalla seguente successione:

- **Sub-sistema di Ravenna (AES<sub>8</sub>)** : Rappresenta la totalità dei depositi di superficie affioranti nell’area di studio. Litologicamente si tratta di argille, limi ed alternanze limoso-sabbiose di piana inondabile, argine, canale e rotta, bruni e giallastri di piana alluvionale drenata con suoli al tetto. Il limite superiore, coincidente con il piano topografico, è formato da suoli variabili sia con elementi calcarei che non calcarei.  
 I suoli non calcarei o scarsamente calcarei hanno in affioramento generalmente colore bruno scuro e bruno scuro giallastro con uno spessore dell’orizzonte decarbonato da 0.5 a 1m circa. Spesso si rinvencono reperti archeologici di età dal Neolitico al Romano. I suoli calcarei appartengono alla

sotto-unità AES8a (Unità di Modena). Questa sotto-unità di età post-romana è litologicamente rappresentata da un'alternanza di sabbie, limi ed argille, distinti in depositi di ambiente alluvionale prevalente (canale ed argine, piana inondabile) e di ambiente deltizio subordinato (canale distributore ed aree interdistributrici). I depositi di canale e di argine sono concentrati lungo gli alvei attuali dei Fiumi Sillaro e Santerno, mentre i depositi fini di tracimazione si sviluppano tra le aste fluviali e nel settore settentrionale. La distribuzione dei depositi testimonia l'estinzione naturale dei corsi d'acqua in ambienti di "valle".

Il corpo centrale del sub-sintema di Ravenna AES<sub>8</sub> è composto da litologie sepolte appartenenti ad un cuneo trasgressivo-regressivo che si apre verso NE, è costituito prevalentemente da depositi di piana alluvionale ed in maniera subordinata da depositi deltizi, litorali e marini. I depositi di piana alluvionale includono localmente sabbie di canale fluviale a geometria nastriforme e più diffusamente alternanze di sabbie e limi di argine e limi ed argille di piana inondabile. I depositi deltizi litorali includono un esteso cuneo di argille limose organiche palustri-lagunari passanti verso E e NE a sabbie di cordone e fronte deltizia.

Il limite inferiore del sub-sintema di Ravenna AES<sub>8</sub> è rappresentato dal contatto netto tra i depositi fini, scuri, di piana non drenata, palude, laguna e barriera trasgressiva, alla base dell'unità, con i depositi grossolani di canale e argine fluviale al tetto del sub-sintema di Villa Verucchio AES<sub>7</sub>.

#### **[OLOCENE- PLEISTOCENE SUP.]**

- **Sub-sintema di Villa Verucchio (AES<sub>7</sub>):** Tale unità non affiora nell'area di studio ma è unicamente presente nel sottosuolo. Si tratta di depositi fluviali terrazzati con spessi livelli ghiaiosi che costituiscono i depositi grossolani sommitali di un ciclo trasgressivo-regressivo sepolto. I depositi di questo ciclo sono descritti, in maniera piuttosto esaustiva, da una serie di sondaggi eseguiti dalla Regione Emilia Romagna. L'unità ha uno spessore di varie decine di metri e poggia in contatto netto sulle ghiaie e sabbie di canale fluviale del ciclo sottostante (AES<sub>6</sub>).

La porzione basale trasgressiva del ciclo è costituita da depositi fini di tracimazione fluviale contenenti vari livelli di qualche metro di argille e limi localmente ricchi di sostanza organica, di origine palustre. Questi depositi passano sottocorrente, verso il settore di NE della pianura, ad argille organiche lagunari, sabbie marine di cordone litorale e di fronte deltizio e argille e limi di prodelta.

Nella porzione intermedia il ciclo è costituito da fitte alternanze di sabbie limose, limi sabbiosi, limi ed argille di argine, rotta e piana inondabile dove sono frequenti livelli pedogenizzati, parzialmente o totalmente decarbonatati. In questo intervallo i livelli di ghiaie e le sabbie di canale fluviale sono subordinate e confinate in corpi lenticolari nastriformi (associazione di piana alluvionale) e

limitati ai settori a ridosso del margine appenninico. Nella porzione sommitale il ciclo è caratterizzato da abbondanti depositi grossolani ghiaiosi e sabbiosi di canale fluviale che formano dei corpi composti a geometria relativamente tabulare, spessi complessivamente fino a 10-15 metri. I depositi ghiaiosi di AES<sub>7</sub> si concentrano presso il margine SO della pianura dove costituiscono dei corpi che si aprono a ventaglio dagli sbocchi vallivi dei fiumi principali verso la pianura aperta (conoide alluvionali). I lobi di conoide alluvionale presenti nel sottosuolo sono riferibili al T. Sillaro e al F. Santerno. Questi depositi grossolani dell'intervallo sommitale di AES<sub>7</sub> sono sede della prima importante falda acquifera ampiamente sfruttata nel territorio di pianura.

Il limite di tetto di AES<sub>7</sub> non affiora nell'area di studio. Esso viene posto, nel sottosuolo, in corrispondenza del tetto dei depositi grossolani di canale fluviale sopra descritti oppure in corrispondenza del tetto delle tracimazioni di piana alluvionale ben drenata che ne costituiscono l'equivalente laterale e/o sottocorrente. Tale superficie è ricoperta dai depositi organici di piana alluvionale e di palude/laguna, appartenenti alla base, trasgressiva, del subsistema sovrastante (AES<sub>8</sub>).

#### **[PLEISTOCENE SUP.]**

- **Sub-sistema di Bazzano (AES<sub>6</sub>)** : Tale unità non affiora nell'area di studio ma è unicamente presente nel sottosuolo. I depositi di AES<sub>6</sub> poggiano in contatto netto sulle ghiaie e sabbie di canale fluviale del ciclo sottostante. Alla base il ciclo è costituito, nel settore meridionale della piana, da depositi fini alluvionali con talora sostanza organica di origine palustre passanti sottocorrente, nel settore settentrionale, ad argille organiche lagunari e sabbie di cordone litorale.

Nella porzione intermedia il ciclo è costituito da fitte alternanze di sabbie limose, limi sabbiosi, limi ed argille di argine, rotta e piana inondabile. In questo intervallo le ghiaie e le sabbie di canale fluviale sono subordinate e confinate in corpi lenticolari nastriformi (associazione di piana alluvionale) e limitate alle porzioni a ridosso del margine appenninico. Nel settore settentrionale, intercalati ai depositi alluvionali, è presente anche un sottile livello a facies lagunari che registra un'ingressione marina di entità minore rispetto a quella di base dell'unità. Verso l'alto il ciclo mostra un progressivo aumento di depositi ghiaiosi e sabbiosi di canale fluviale, spessi fino ad una decina di metri che si alternano a depositi argillosi e limosi di tracimazione fluviale, con contatti netti. I depositi ghiaiosi, che si concentrano nel settore meridionale della piana, tendono a giustapporsi lateralmente e verticalmente costituendo corpi tabulari estesi fino ad una decina di chilometri (associazione di conoide alluvionale). Essi si sfrangono sottocorrente in corpi nastriformi passando a depositi sabbiosi e sabbioso-limosi di canale o argine fluviale (associazione di piana alluvionale). L'unità è sigillata al tetto, con contatto netto, dai depositi argillosi di piana alluvionale, palude e laguna del ciclo sovrastante (AES<sub>7</sub>).

#### **[PLEISTOCENE MED.]**

- **Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore indifferenziato (AES)** : Tale unità non affiora nell'area di studio ma è unicamente presente nel sottosuolo. Esso costituisce la porzione superiore del Supersintema Emiliano-Romagnolo comprende l'insieme dei depositi continentali di conoide, di piana alluvionale di provenienza appenninica. Si tratta della sopra-unità indifferenziata dei sottosistemi precedentemente descritti (AES<sub>8</sub>, AES<sub>7</sub> ed AES<sub>6</sub>) corrispondenti, ciascuno, ai cicli deposizionali suddetti, di cui affiora solo quello superiore (AES<sub>8</sub>).

Nel sottosuolo della pianura alluvionale alla base dell'unità AES<sub>6</sub> sono presenti 2 ulteriori cicli deposizionali inferiori che sono conosciuti in modo approssimativo e pertanto non sono stati formalizzati separatamente come altri sub-sistemi.

Litologicamente, la parte inferiore nel sottosuolo, è composta da: ghiaie fluviali di provenienza appenninica, sabbie fluviali di provenienza appenninica, sabbie fluvio deltizie di piattaforma indifferenziate, argille e limi di prodelta e piattaforma.

**[OLOCENE - PLEISTOCENE MED.]**

- **Sintema Emiliano-Romagnolo Inferiore (AEI)** : Costituisce la parte più antica del Supersintema Emiliano-Romagnolo. Nel area di studio non è presente in affioramento ma è stato individuato nel sottosuolo, sulla base dei dati geognostici (log ENI-AGIP). Il limite inferiore coincide con quello del supersintema ed affiora solamente a ridosso del margine appenninico dove è fortemente discordante sui depositi marini del Pleistocene medio (IMO) e mio-pliocenici. Questa discordanza angolare si realizza anche nel sottosuolo più prossimo al margine appenninico ed è espressa dal contatto netto fra i depositi fluvio-deltizi alla base del supersintema e i depositi sabbioso-ghiaiosi litorali e di delta-conoide riferiti al tetto di IMO.

Al suo interno l'unità è costituita da alternanze cicliche di depositi fini (prevalentemente argille e limi) e depositi grossolani (prevalentemente sabbie e subordinatamente ghiaie) riferibili ad associazioni di facies di piana alluvionale non drenata e soprattutto di piana fluvio-deltizia e costiera. Solo il settore più prossimo al margine della catena è dominato da sistemi alimentati dai fiumi appenninici mentre il settore in studio è dominato prevalentemente dai sistemi alimentati dal Fiume Po. In particolare, nelle zone depocentrali del bacino, si riconoscono tre cicli deposizionali distinti, attribuibili a sequenze di facies fluvio-deltizie e di piattaforma del sistema padano. Lo spessore dell'unità aumenta complessivamente verso N e NE fino a raggiungere c.a. 140 m nell'area depocentrale compresa fra Conselice e Fusignano.

**[PLEISTOCENE MED.]**

- **Sabbie di Imola (IMO)** : Rappresenta la più recente delle Unità Marine ed affiora diffusamente nel margine appenninico. Nell'area di studio la ritroviamo unicamente nel sottosuolo. Le Sabbie di Imola (IMO) sono costituite da depositi sabbiosi e sabbioso ghiaiosi di ambiente costiero e

subordinatamente da peliti di piana alluvionale o laguna. Tale formazione è stata oggetto di dettagliati studi di terreno, corredati da numerose analisi biostratigrafiche e petrografiche, che hanno condotto al riconoscimento di 2 principali cicli deposizionali: il ciclo inferiore è costituito da sedimenti sabbiosi e sabbioso-ghiaiosi di spiaggia e delta-conoide; il ciclo superiore è formato da una porzione inferiore prevalentemente argillosa di piana alluvionale e costiera, alla quali si sovrappongono in trasgressione depositi di spiaggia simili a quelli basali, ma in genere francamente sabbiosi. Il limite tra i 2 cicli de posizionali è una superficie di discontinuità, marcata dal contatto erosivo tra sabbie di spiaggia e sovrastanti argille di piana alluvionale.

Il limite basale sulle argille plio-pleistoceniche è un contatto netto con discordanza angolare, che individua una superficie di discontinuità di carattere regionale. Anche il limite superiore è marcato da una discontinuità regionale che sovrappone i depositi quaternari continentali del super-sistema Emiliano-Romagnolo alle sabbie di Imola.

**[PLEISTOCENE MED.-PLEISTOCENE INF.]**

- **Substrato plio-pleistocenico** : Unicamente nel sottosuolo si tratta di argille marose, parzialmente siltose, talora sabbiose, di colore grigio azzurre e talora grigio plumbeo. La stratificazione è poco o per nulla evidente per bioturbazione. Sono riconoscibili sottili livelli discontinui di biocalcareni a grana fine sottilmente laminati. Sono sempre presenti microfossili mentre è variabile la concentrazione di microfanie. Tali unità argillose rappresentano il sub-strato geologico dell'area.

**[PLEISTOCENE INF.-PLIOCENE MED. E SUP.]**

In figura 4.4 è riportato uno stralcio della sezione crono-stratigrafica AGIP tratta dai lavori di Cassano et al. (1986) che con andamento SSO-NNE attraversa l'area di studio.

Com'è possibile osservare, sulla base dei risultati delle numerose perforazioni profonde, il contatto tra i sedimenti quaternari e il sub-strato plio-pleistocenico (indicato in rosso in figura 4.4) ha un andamento piuttosto irregolare con profondità variabili.

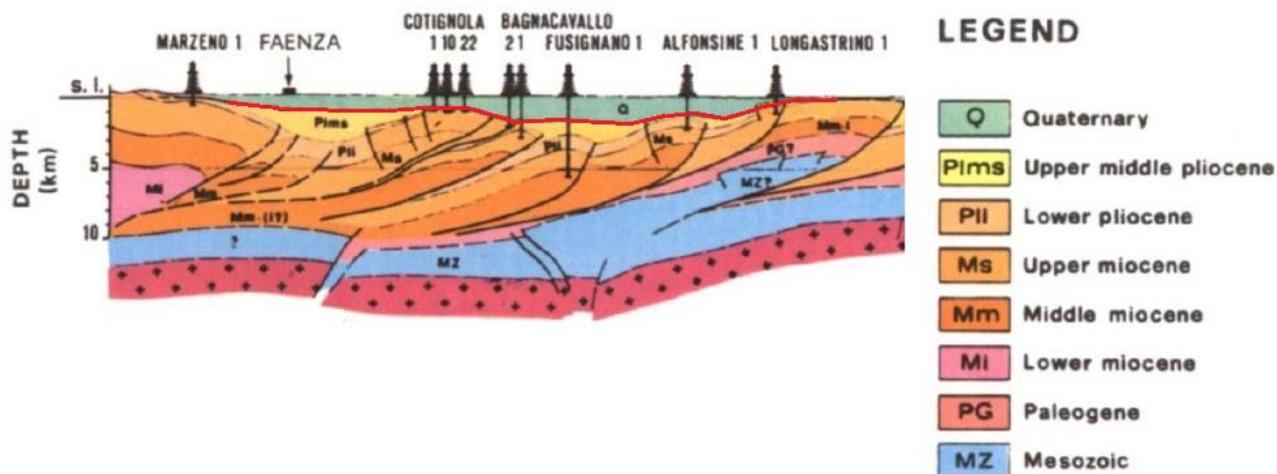


Figura 4.4– Sezione cronostratigrafica realizzata da dati di perforazione AGIP e indagini gravimetriche. La linea in rosso indica il contatto tra i sedimenti quaternari e il sub-strato plio-pleistocenico (modificata da Cassano et al. 1986)

In dettaglio, il contatto manifesta 3 evidenti massimi ubicati ai margini dell'area di studio (Cotignola, Alfonsine e Longastrino) dove le profondità del sub-strato attese sono all'incirca comprese tra 350 e 450 m. Nella parte centrale del bacino, nei pressi di Bagnacavallo e Fusignano, è evidente un avvallamento morfologico; le profondità del sub-strato attese in quest' area sono tra circa 550 e 650 m.

## 5. DATI GEOTECNICI E GEOFISICI

Le indagini associate agli strumenti urbanistici dei Comuni di Alfonsine, Bagnacavallo, Bagnara di Romagna, Conselice, Cotignola, Fusignano, Lugo, Massa Lombarda e Sant'Agata sul Santerno in concomitanza con ulteriori sondaggi e prove realizzate dalla Regione Emilia Romagna, hanno permesso di delineare una quadro conoscitivo preliminare del territorio, indispensabile per gli approfondimenti del di I livello 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 mentre la Regione Emilia Romagna ha commissionato una serie di prove volte alla conoscenza del territorio.

In dettaglio, si tratta di N.567 prove di tipo geotecnico e N.180 prove di tipo geofisico, per un totale di N.747 indagini pregresse distribuite sul territorio in studio.

La figura 5.1 riassume le differenti tipologie di indagini pregresse che sono state esaminate per lo studio di Microzonazione Sismica.

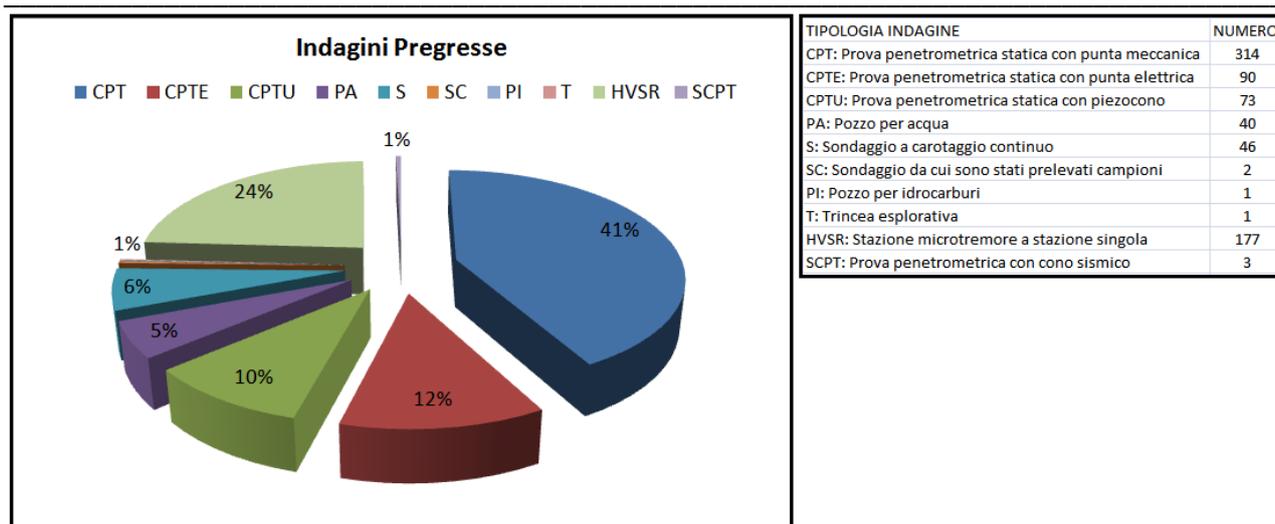


Figura 5.1– Indagini pregresse distribuite sul territorio dell’Unione dei Comuni della Bassa Romagna.

Le informazioni disponibili, sono state integrate con ulteriori N. 232 prove in sito per un totale di N. 979 indagini (integrative e pregresse) distribuite sul territorio in studio.

In dettaglio, le prove integrative, risultano così suddivise:

- N. 151 indagini geofisiche di sismica sia di superficie che in foro;
- N. 81 indagini di tipo geotecnico.

La figura 5.2 sintetizza le differenti tipologie di prove integrative realizzate appositamente per gli studi di Microzonazione Sismica.

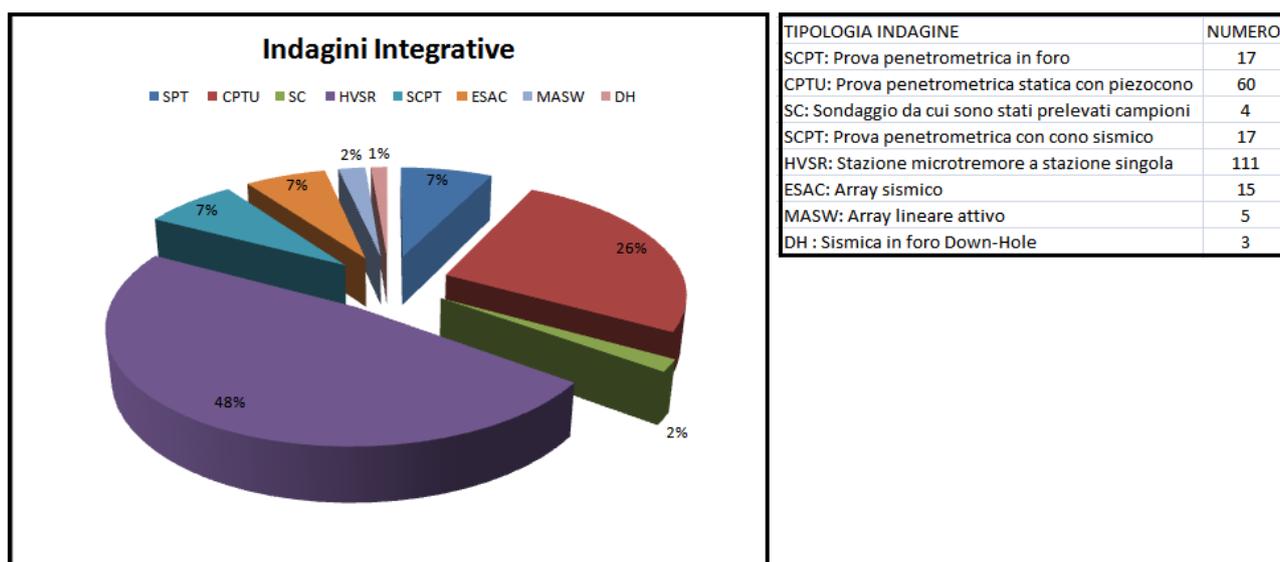


Figura 5.2 – Indagini integrative realizzate appositamente per la Microzonazione Sismica

Oltre alle prospezioni integrative in sito, la campagna di indagine ex-novo, ha previsto una serie di campionamenti per analisi di laboratorio. In dettaglio sono state realizzate le seguenti analisi:

- Ricostituzione Campioni N.15
- Valutazione delle densità relative N.2
- Valutazione del peso specifico N.2
- Valutazione del contenuto in acqua N.15
- Analisi granulometriche N. 22
- Limiti di Attenberg N. 9
- Prove Edometriche N. 5
- Prove di Colonna Risonante N. 7
- Prove Triassiali Cicliche N. 20

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 3.0.

([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 integrative 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 e con cono sismico). I principali svantaggi di tali

metodologie risiedono, sia nell'esiguo volume di sottosuolo esplorato, sia nei costi d'indagine relativamente alti.

**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, oltre ad essere applicata su stendimenti che prevedono l'utilizzo congiunto di più sensori, può essere inoltre, realizzata attraverso un'unica stazione di misura. Questa 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. Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare, infatti, la principale frequenza di vibrazione del suolo definita di "risonanza" e sfruttarla per scopi stratigrafici.

*5.1.1 Campagna di misure geofisiche integrative*

Dal 24/11/2014 al 19/02/2015 sono state realizzate n. 151 indagini di tipo geofisico per la Microzonazione Sismica del territorio dei Comuni della Bassa Romagna. Si tratta, sia di prospezioni non invasive di tipo indiretto (basate sull'analisi delle fasi d'onda Superficiali) sia di prospezioni di tipo diretto realizzate in foro. In dettaglio, le indagini sismiche in modalità indiretta sono state realizzate sia con sorgente di energizzazione artificiale (MASW) sia attraverso registrazione delle vibrazioni ambientali (Antenna Sismica e HVSR). In Tabella 5.1 è riportata una suddivisione di dettaglio delle prospezioni svolte, mentre nelle figura 5.3 e 5.4 è possibile osservare una parte della documentazione fotografica realizzata durante la campagna di acquisizione dati.

*Tabella 5.1 – Suddivisione per tipologia delle indagini geofisiche integrative.*

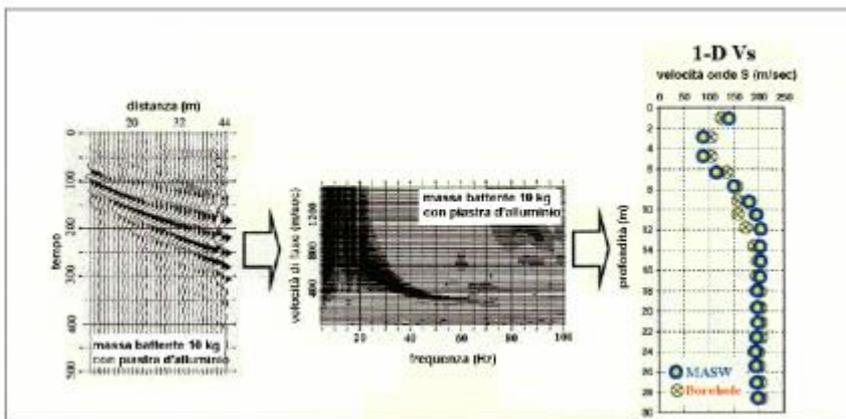
<b>Indagini geofisiche di tipo indiretto realizzate in superficie</b>	
<b>Sismica Passiva</b>	<b>N. Prospezioni</b>
Stazione Singola (HVSR)	111
Antenna Sismica 2d (ESAC)	15
<b>Sismica Attiva</b>	<b>N. Prospezioni</b>
Linea Sismica (MASW)	5
<b>Indagini Geofisiche di tipo diretto realizzate in foro</b>	
<b>Sismica Attiva</b>	<b>N. Prospezioni</b>
Down-Hole	3
Cono Sismico	17



*Figura 5.3– Nel pannello di sinistra, misura su Antenna Sismica ESAC . Nel pannello di destra, indagine a stazione singola HVSR.*



Figura 5.4– Nel pannello di sinistra, indagine Down-Hole. Nel pannello di destra, indagine con Cono Sismico.



La procedura MASW può sintetizzarsi in tre stadi distinti:

- 1- acquisizione dei dati di campo;
- 2- estrazione della curva di dispersione;
- 3- inversione della curva di dispersione per ottenere il profilo verticale delle Vs (profilo 1-D) che descrive la variazione di Vs con la profondità.

### Sismica attiva e passiva di superficie

Le prospezioni passive su antenna sismica sono state realizzate sia con acquisitore Brain-Spy a 16 canali e 24 bit equivalenti prodotto da Micromed s.p.a., sia con acquisitore DoReMi 24 canali 24 bit equivalenti prodotto dalla SARA-electronic instruments. Le registrazioni del campo di Vibrazioni Ambientali sono state eseguite per un tempo minimo di 16 minuti per mezzo di 16 sensori ad oscillazione verticale con frequenza propria a 4.5 Hz. I sensori sono stati disposti su geometrie bidimensionali con interdistante irregolari. Il dato rilevato è stato successivamente elaborato con tecnica ESAC per la computazione della curva di dispersione legata alle onde di Rayleigh (Oho et al, 2002).

Le indagini attive tipo MASW (Rix et al., 2002) sono state realizzate unicamente con acquisitore DoReMi 24 canali 24 bit equivalenti prodotto dalla SARA-electronic instruments. Questo tipo di registrazione è stata eseguita mediante 24 sensori verticali (4.5 Hz) disposti con interdistanze regolari lungo una geometria lineare. I sensori sono stati sollecitati attraverso una serie di colpi inferti al terreno attraverso una mazza battente di 8kg di peso. La curva di dispersione legata alle onde di Rayleigh è stata successivamente computata mediante il software EasyMasw prodotto dalla GEOSTRU (<http://www.geostru.com/>).

In figura 5.5 vengono riportate, a titolo di esempio, le curve dispersione riferite alle postazioni A188 e M191 rispettivamente computate con tecnica ESAC e MASW (per l'ubicazione far riferimento alla Carta delle Indagini in allegato).

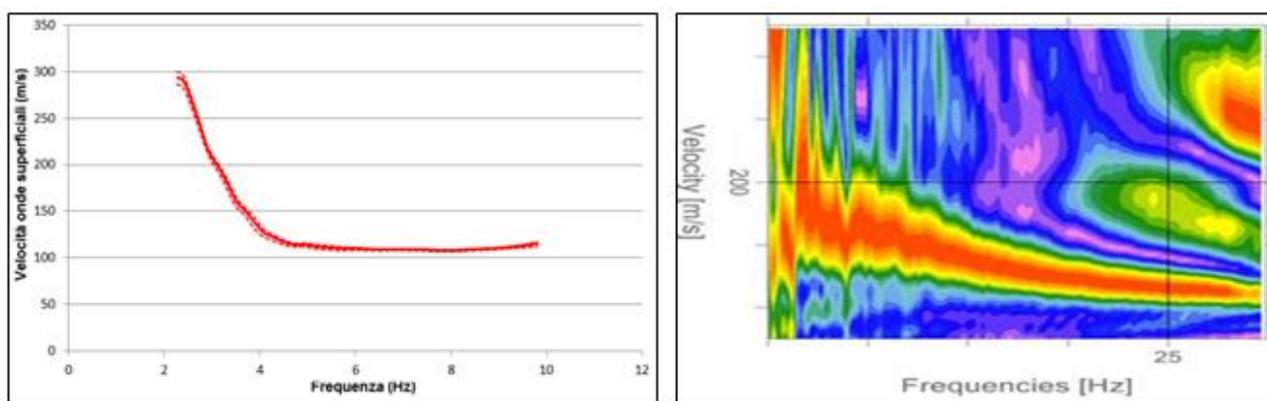


Figura 5.5– Pannello di sinistra: curva di dispersione elaborata con tecnica ESAC riferita alla postazione A188.  
Pannello di destra: curva di dispersione elaborata con tecnica ESAC riferita alla postazione M191.

Accanto alle metodologie su antenna sono, inoltre, state eseguite 111 misurazioni di tipo passivo su stazione singola HVSR (Bard, 1999). Per quest'ultime registrazioni è stato impiegato un velocimetro tridirezionale modello Tromino prodotto dalla Micromed s.p.a. (<http://www.tromino.eu/>). Come per le antenne sismiche, le acquisizioni a stazione singola sono state eseguite per un tempo minimo di 16 minuti.

La computazione delle curve dei rapporti spettrali (che permettono di risalire alla Frequenza di Risonanza del terreno) sono state elaborate con software Grilla (in dotazione al Tromino). Le procedure di elaborazione adottate per le misure a stazione singola sono espone in Picozzi et al., 2005.

### **Sismica in foro**

Le prove sismiche in foro di tipo down-hole sono state realizzate in 3 sondaggi geognostici della profondità di 50 m ciascuno appositamente attrezzati con tubo in PVC cementato all'esterno.

Le indagini hanno avuto le seguenti modalità di esecuzione:

attraverso, opportuni sistemi meccanici (sorgenti energizzanti) posti sulla superficie del terreno sono state generate in serie, sia onde di compressione (P) sia onde di taglio polarizzate orizzontalmente (SH). Tali sollecitazioni sono state registrate attraverso un sensore tridimensionale con frequenza propria di 10 Hz ancorato a profondità crescenti all'interno del foro di perforazione (il passo utilizzato è di una registrazione ogni metro). In base ai tempi di arrivo del treno d'onde al ricevitore, nota la distanza tra sorgente e bocca-foro, sono state valutate le distribuzioni delle velocità sismiche (P ed SH) in corrispondenza della verticale di misura.

In dettaglio, per le indagini svolte, è stato utilizzato un acquirente AMBROGEO, modello ECHO 12/24 a 16 bit e 24 canali. Di seguito vengono specificati sistemi sorgente utilizzati:

- Sorgente onde P : mazza del peso di 10 Kg usata per colpire una piastra metallica poggiata sul terreno.
- Sorgente onde SH : mazza del peso di 10 Kg usata per colpire lateralmente una traversina in legno accoppiata al terreno.

Le prove sismiche con cono sismico sono state realizzate a seguito di 17 prove penetrometriche SPT della profondità di 30 m ciascuna. In questo caso i ricevitori (geofoni) sono stati alloggiati all'interno di una punta conica che è stata calata all'interno del foro, mediante la batteria d'aste utilizzata per la prova penetrometrica (questo tipo di indagine non prevede nessun allestimento del sondaggio). Le modalità di esecuzione, l'attrezzatura e i sistemi sorgente utilizzati sono i medesimi delle prove Down-Hole. Anche in questo caso il passo di misura è stato di una registrazione in P e SH per ogni metro di profondità.

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

Come evidenziato nell'inquadramento geologico (Capitolo 4) le profondità del substrato geologico attese per l'area di studio sono dell'ordine delle centinaia di metri. Per caratterizzare in termini di valori di velocità delle onde di taglio (profili Vs) spessori di tali dimensioni, sono state sfruttate tutte le indagini geofisiche realizzate come segue.

Le curve di dispersione, ricavate da indagini su Antenna Sismica (ESAC), e le curve dei rapporti spettrali computate da Indagini a Stazione Singola (HVSr), sono state utilizzate congiuntamente nelle simulazioni numeriche di "inversione dati" per una prima stima dei profili di velocità delle onde di taglio (Vs).

In particolare, sono state realizzate una serie di simulazioni attraverso un software (realizzato da G. Gargani e E. Lunedei dell'Università degli Studi di Siena) basato su di un algoritmo di tipo "genetico" con lo scopo di effettuare una prima valutazione delle incertezze sui modelli Vs. Le tecniche d'inversione, infatti, non permettono di risalire ad un unico modello di velocità (non esiste l'univocità della soluzione) ma, ciascuna elaborazione, porterà alla identificazione di un possibile profilo di velocità parzialmente differente dal precedente ma ugualmente compatibile con i dati di campagna.

Ripetendo, dunque, le procedure sarà possibile determinare, per ciascun sito in studio, un insieme di modelli equivalenti che definisce l'effettivo potenziale informativo delle indagini effettuate, ovvero determina l'incertezza associata ai valori di velocità (Vs) alle diverse profondità.

Ovviamente, questa valutazione di incertezza è tanto più accurata tanto maggiore è lo spazio di soluzioni esplorato dalla procedura di inversione. Alla luce di quanto appena espresso è stato scelto di realizzare dieci elaborazioni di inversione congiunta per ciascuna antenna sismica in maniera tale da determinare l'effettiva variabilità delle possibili soluzioni in tale casistica.

Tra i 10 risultati ottenuti è stato scelto, per ciascun sito, un' unico profilo Vs in base alle seguenti caratteristiche:

- Buona compatibilità tra dato sperimentale e teorico
- Profondità del sub-strato sismico prossimo ai valori attesi per il sito di studio.

I modelli Vs, determinati con le modalità appena descritte, sono stati ulteriormente "ottimizzati" aggiungendo un ulteriore vincolo alle procedure di inversione: i limiti di ricerca assegnati all'algoritmo sono stati "forzati" sui risultati delle indagini sismiche in foro (Down-Hole e Coni Sismici).

Attraverso una nuova serie di inversioni, sono state, dunque, parzialmente ricalcolate le velocità e gli spessori in base ai vincoli assegnati.

In figura 5.6, a titolo di esempio, viene riportato il profilo Vs computato per l'Antenna Sismica A188 di Alfonsine (per l'ubicazione precisa far riferimento alla Carta delle Indagini in allegato alla relazione).

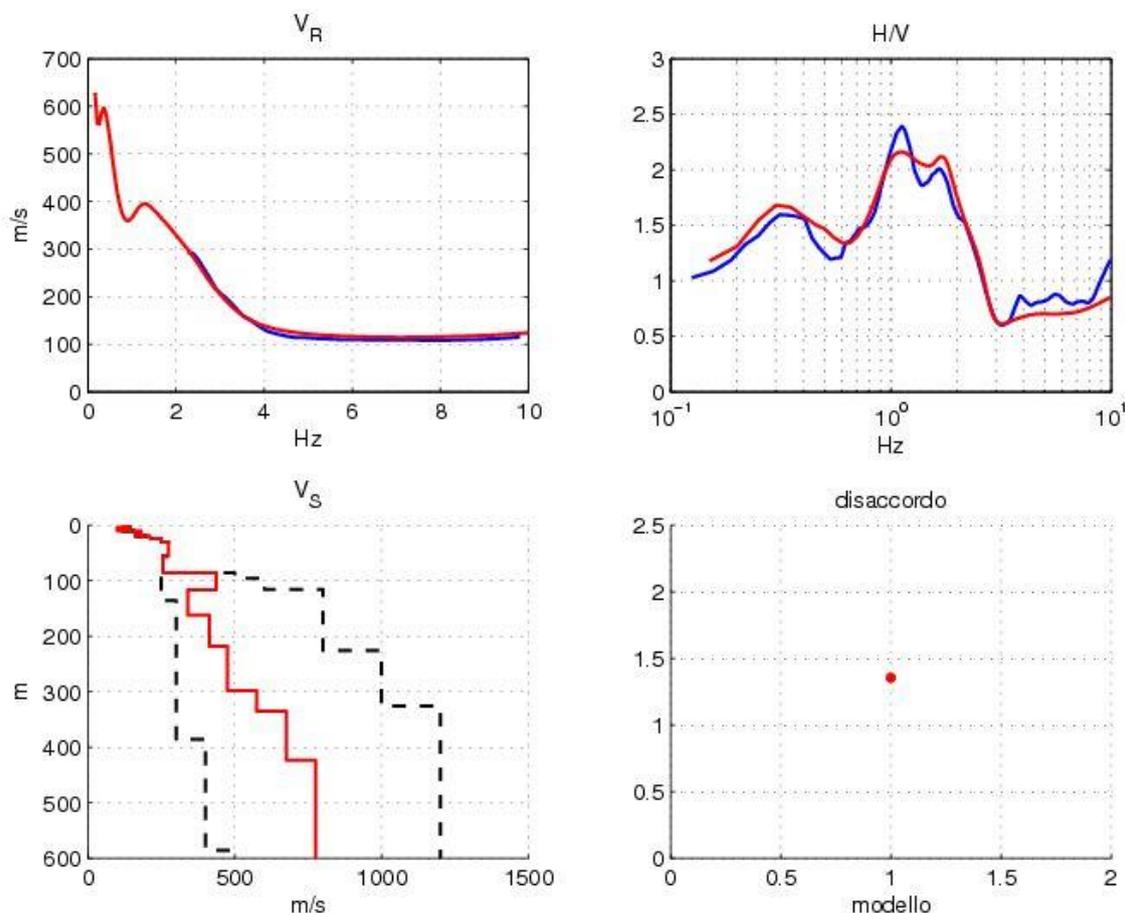


Figura 5.6- Inversione congiunta per la stima del profilo  $V_s$  realizzata con algoritmo genetico, postazione A188-Alfonsine. Nei pannelli superiori è possibile visualizzare la correlazione tra dati sperimentali (curve in blu) e teorici (curve in rosso). Nel pannello in basso a sinistra è riportato il profilo  $V_s$  calcolato; le linee tratteggiate in nero rappresentano i limiti di ricerca assegnati al software d'inversione. Il pannello in basso a destra indica il valore di "disaccordo" tra dati sperimentali e teorici.

Nei pannelli superiori è possibile visualizzare la correlazione tra la dispersione e l'HVSR sperimentali (in blu) e le curve teoriche (in rosso); il valore di "disaccordo" tra i dati sperimentali e teorici è stato quantificato mediante test del Chi-quadro  $X^2$  (pannello in basso a destra).

In basso a sinistra è riportato, in rosso, il profilo  $V_s$  calcolato; le linee tratteggiate in nero rappresentano i limiti di ricerca assegnati al software d'inversione.

In figura 5.7 è mostrato un confronto tra i risultati dell'inversione congiunta e il down-hole realizzato ad Alfonsine per i primi 50 m. L'ottima correlazione tra i 2 profili  $V_s$  è legata al fatto che l'inversione congiunta è stata forzata sui risultati del Down-Hole; si noti come i limiti di ricerca riportati nel pannello in basso a sinistra di figura 5.6 siano "serrati" per le prime decine di metri,

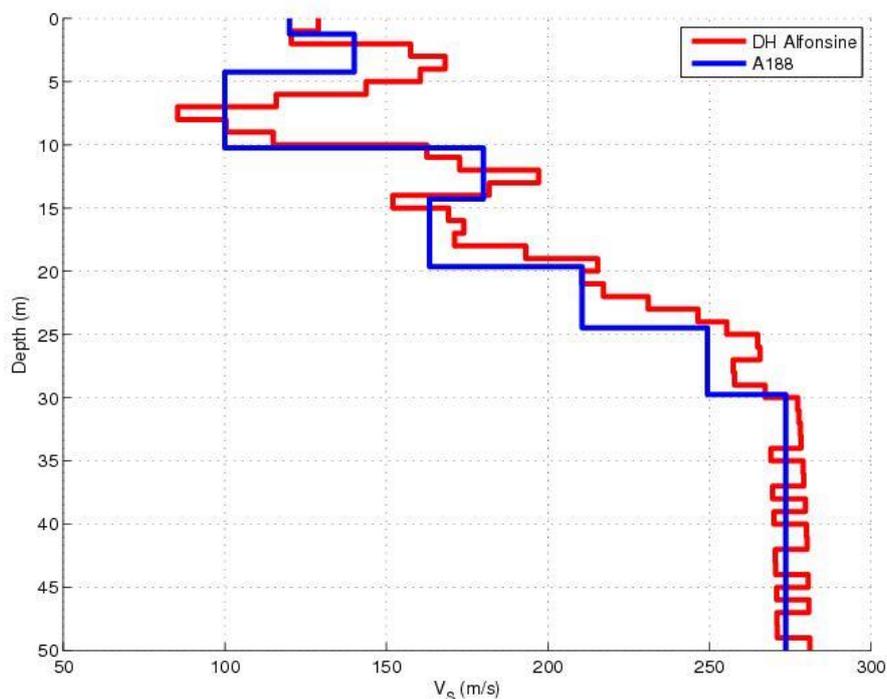


Figura 5.7- Confronto per i primi 50 m di profondità tra i risultati del profilo Vs da inversione congiunta e Down-Hole Alfonsine realizzato all'incirca nella medesima zona.

I risultati ottenuti per i restanti siti in studio sono visualizzabili nei report associati alla Carta delle Indagini (Data-Base- Microzonazione Sismica).

## 5.2. Indagini integrative di tipo geotecnico

Le indagini geognostiche in sito sono state condotte dalla ditta Sogeo S.r.l. (autorizzata con Concessione del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti ai sensi dell'art. 59 del D.P.R. 380/01). Si tratta di prove penetrometriche con piezocono spinte sino a profondità di 20-30 m e sondaggi a carotaggio continuo (comprensivi di prove SPT, vane test, pocket penetrometer e report fotografico).

In corrispondenza dei sondaggi, a quote variabili e tramite campionatore "shelby", sono stati prelevati diversi campioni di terreno (sia indisturbati che disturbati), successivamente analizzati dal laboratorio geotecnico ISMGEO S.r.l autorizzato con Concessione del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (Concessione Ministeriale Decreto n. 55126 del 12/07/06 per prove di laboratorio per terre e rocce e per prove in sito, classi A, B e C).

La campagna geognostica realizzata "ex-novo" e le numerose informazioni pregresse hanno permesso di definire un chiaro quadro litostratigrafico e geomeccanico dell'area 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.).

### 5.2.1 *Prospezioni in sito*

Di seguito viene riportato un resoconto delle prove geognostiche e geotecniche realizzate per la Microzonazione Sismica dei Comuni della Bassa Romagna. Per ogni tipo prova sono riportate le modalità esecutive e le finalità per cui sono state realizzate.

#### **Prove penetrometriche statiche – CPTu**

Le prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono hanno fornito una valutazione estensiva delle caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni dell'area in studio.

Esse sono state eseguite con l'ausilio di penetrometro statico tipo "PAGANI" spingendole fino a profondità massime di 20.0/30.0 m dal piano campagna rilevando, in maniera continua (ogni cm), i valori di resistenza di punta "Rp" e resistenza di attrito laterale locale "Rl". Il sistema acquisisce inoltre il valore della U (Pressione Idrostatica nei Pori), l'angolo di inclinazione della batteria di aste ed il tempo di dissipazione (tempo intercorrente misurato tra la misura della sovrappressione ottenuta in fase di spinta e la pressione misurata in fase di alleggerimento di spinta).

Le caratteristiche meccaniche della punta elettrica utilizzata dallo strumento sono le seguenti:

Angolo di apertura cono: 60°

Diametro: 36 mm

Sezione di spinta: 10 cm<sup>2</sup>

Superficie laterale: 150 cm<sup>2</sup>

Peso: 2,1 kg

Lunghezza: 413 mm

Oltre ad una caratterizzazione litologica della successione stratigrafica le penetrometrie statiche in terreni sabbiosi permettono di stimare i valori di angolo di attrito interno "Fi" e di densità relativa "Dr"; inoltre in terreni coesivi esse possono fornire, attraverso le esperienze pratiche di vari autori quali Begemann – Robertson - Mayne ed altri, i dati di resistenza del terreno in termini di tensioni totali (Su) e di sovraconsolidazione nonché di deformabilità (moduli di Young ed edometrici).

Tramite il parametro Ic, coerentemente alla classificazione SBT secondo il metodo di Robertson & Wride 1998, all'occorrenza possono essere stimati i valori di Fine Content (FC), ovvero di contenuto in fine (% passante < 0.074 mm) all'interno dei terreni incoerenti:

$$FC (\%) = 1.75(I_c)^{3.25} - 3.7$$

Dalle risultanze dei campioni prelevati in sito, tale formulazione empirica appare affidabile per una valutazione speditiva del Fine Content dei depositi incoerenti.

Applicando la classificazione SBT ai risultati delle prove CPT-CPTe-CPTu è, inoltre, possibile definire una prima stima della permeabilità dei terreni. In tabella 5.2 sono riportati i differenti ambiti di comportamento del terreno stimabili a partire dai parametri  $I_c$ .

Tabella 5.2 – Correlazioni empiriche SBT per prove penetrometriche

SBT Zone	SBT	Range of $k$ (m/s)	SBT $I_c$
1	Sensitive fine-grained	$3 \times 10^{-10}$ to $3 \times 10^{-8}$	NA
2	Organic soils - clay	$1 \times 10^{-10}$ to $1 \times 10^{-8}$	$I_c > 3.60$
3	Clay	$1 \times 10^{-10}$ to $1 \times 10^{-9}$	$2.95 < I_c < 3.60$
4	Silt mixture	$3 \times 10^{-9}$ to $1 \times 10^{-7}$	$2.60 < I_c < 2.95$
5	Sand mixture	$1 \times 10^{-7}$ to $1 \times 10^{-5}$	$2.05 < I_c < 2.60$
6	Sand	$1 \times 10^{-5}$ to $1 \times 10^{-3}$	$1.31 < I_c < 2.05$
7	Dense sand to gravelly sand	$1 \times 10^{-3}$ to 1	$I_c < 1.31$
8	*Very dense/ stiff soil	$1 \times 10^{-8}$ to $1 \times 10^{-3}$	NA
9	*Very stiff fine-grained soil	$1 \times 10^{-9}$ to $1 \times 10^{-7}$	NA

\*Overconsolidated and/or cemented

### **Sondaggi meccanici a rotazione**

Nell'area di studio sono stati eseguiti n. 4 sondaggi meccanici a carotaggio continuo, di cui n. 3 spinti sino a 50 mt da p.c. (Lugo, Fusignano e Alfonsine), ed n. 1 di profondità 22.5 m in località Massa (per l'ubicazione fare riferimento alla Carta delle Indagini in allegato, i log stratigrafici sono visualizzabili nel Data-Base- Microzonazione Sismica).

La sonda a rotazione utilizzata ha permesso la perforazione con carotieri semplici, del diametro 101 mm, seguiti per l'intero sviluppo da tubi di rivestimento provvisorio, del diametro di 127 mm, per impedire franamenti delle pareti dei fori di sondaggio.

Nelle porzioni carotate a granulometria fine, ove possibile, si sono eseguite, previa decorticazione superficiale, rilevazioni con "pocket penetrometer" e "torvane" che hanno fornito valori in prima approssimazione della resistenza del terreno in termini di tensioni totali ( $q$ , = resistenza alla compressione semplice e  $C$ , = coesione non drenata).

All'interno dei fori di carotaggio, in corrispondenza degli orizzonti sabbiosi significativi e sottostanti ai punti di campionamento, sono stati effettuati test del tipo S.P.T. (Standard penetration Test) con campionatore aperto tipo Raymond, permettendo di stimare (con le dovute correzioni per profondità, falda, campionatore, aste, ecc.) direttamente le caratteristiche geotecniche e densità relativa di tali orizzonti campionati nonché un'adeguata correlabilità con la resistenza a penetrazione delle prove CPTu.

In tabella 5.3 sono riportati i valori dei test SPT (N. colpi) realizzati nei fori di sondaggio a diverse profondità in corrispondenza dei terreni a prevalente comportamento incoerente.

Tabella 5.3 – Test Spt in fori di sondaggio

**Normativa di riferimento: ISSMFE 1976; AGI 1977**

COD	PROF	LIT	N_COLPI	LOCALITA'
DH_042-SPT1	20.5-20.95	S	3_5_7	LUGO
DH_042-SPT2	23.6-24.05	LA	2_6_7	
DH_042-SPT3	26.5-26.95	S	3_3_5	
DH_084-SPT1	5.1-5.55	SL	3_2_4	FUSIGNANO
DH_084-SPT2	9.1-9.55	SL	3_3_5	
DH_084-SPT3	12.6-13.05	S	6_6_9	
DH_084-SPT4	27.5-27.95	SL	11_8_10	
DH_084-SPT5	27.95-28.4	SL	9_12_14	
DH_103-SPT1	2.5-2.95	ALT	3_3_5	ALFONSINE
DH_103-SPT2	12.6-13.05	S	5_5_6	
DH_103-SPT3	16.9-17.35	S	4_5_6	
DH_103-SPT4	17.35-17.8	S	2_5_7	
DH_103-SPT5	19.5-19.95	S	5_5_6	
DH_103-SPT6	20.0-20.45	S	3_4_6	
DH_103-SPT7	23.2-23.65	SL	5_6_5	
SOND_208_SPT1	11.0-11.45	LA	2_2_3	MASSA
SOND_208_SPT2	22.0-22.45	SL	5_9_8	

Dai campioni prelevati sono state effettuate analisi di laboratorio geotecnico e ciclico quali: riconoscimento, classificazione, granulometria, contenuto in acqua, densità relativa, limiti di Atterberg, prove edometriche, prove di colonna risonante e triassiali cicliche a liquefazione.

### 5.2.2 Analisi di Laboratorio

In corrispondenza dei sondaggi, a quote variabili e tramite campionatore shelby, sono stati prelevati diversi campioni di terreno per le successive analisi di laboratorio.

In tabella 5.4 è riportato un elenco dei campioni prelevati e successivamente analizzati dal laboratorio geotecnico ISMGEO S.r.l.

*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio dei Comuni della Bassa Romagna (RA)*  
Relazione Tecnico Illustrativa

Tabella 5.4 – Elenco campioni per prove di laboratorio.

COMUNE	Sondaggio	Campione	Prof. da	Prof. a
LUGO	DH042	CI1	5.3	5.9
LUGO	DH042	CI2	11.4	12
LUGO	DH042	CI3	18	18.6
LUGO	DH042	CI4	23	23.6
LUGO	DH042	CI5	38.3	38.9
FUSIGNANO	DH084	CI1	4.5	5.1
FUSIGNANO	DH084	CI2	8.5	9.1
FUSIGNANO	DH084	CI3	12	12.6
FUSIGNANO	DH084	CI4	18.6	19.2
FUSIGNANO	DH084	CI5	43.2	43.8
ALFONSINE	DH103	CI1	6	6.6
ALFONSINE	DH103	CI2	12	12.6
ALFONSINE	DH103	CI3	16.3	16.9
ALFONSINE	DH103	CI4	19	19.5
ALFONSINE	DH103	CI5	42.3	42.5
MASSA	DH208	CI1	9.5	10.1
MASSA	DH208	CI2	20.2	20.8
MASSA	DH208	CI3	21.4	22

In presenza di litologie prevalentemente granulari con presenza di falda, non è stato possibile ottenere in sito un campionamento ottimale: solo i campioni DH103-CI2 e CI4 (rispettivamente di prof. 19-19.5 e 12-12.6 da p.c.), per materiali granulari, sono risultati indisturbati.

Differentemente tutti i campioni prelevati in corrispondenza di terreni a comportamento coesivo risultano di tipo indisturbato o, comunque, a bassissimo grado di disturbo.

La fase di analisi ha comunque previsto una ricostituzione dei provini che, precedentemente ai test, sono stati saturati secondo il grado di addensamento originario e le pressioni di confinamento di riferimento.

Di seguito vengono espone le analisi di laboratorio realizzate per la ricostruzione geomeccanica e della storia tensionale dei terreni della Bassa Romagna. I risultati delle differenti prove eseguite hanno permesso di effettuare importanti valutazioni e verifiche per le successive simulazioni di RSL (Risposta Sismica Locale) e per la definizione dei potenziali di liquefazione, come previsto dalle analisi di III livello della Microzonazione Sismica.

I risultati legati alle differenti prove effettuate sono visualizzabili in allegato n. 2 della relazione.

### Analisi granulometriche

L'analisi granulometrica dei campioni è stata effettuata mediante vagliatura per i campioni a dominante frazione grossolana sabbiosa e mediante decantazione (aerometria) per quelli a dominante fine limo-argillosa passante al vaglio n. 200.

Il risultati sono riportati nell' allegato 2 dove unitamente al grafico della curva granulometrica (in ordinate % cumulativa e in ascisse diametro equivalente), vengono fornite le classificazioni A.G.I. 1977 ( normativa di riferimento è ASTM D422/07).

Inoltre nei certificati che espongono i risultati , oltre alle percentuali di passante relative alle varie classi granulometriche, vengono definiti i “fine content”, intesi come la frazione con diametro < 0.075mm (passante 200), nonché i valori di D60 e D50, necessari ad una caratterizzazione delle sabbie in termini di struttura e permeabilità. Infatti ai fini della liquefazione risulta significativo il Coefficiente di Uniformità (D60/D10) che definisce la distribuzione granulometrica e il grado di uniformità dei materiali (figura 5.8)

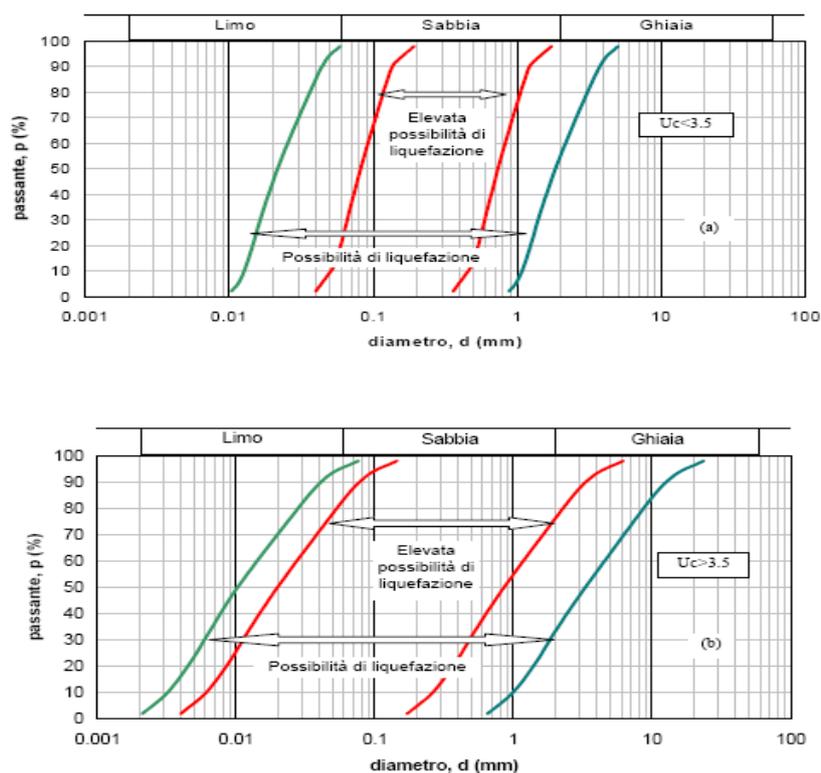


Figura 5.8 - Fasce granulometriche per la valutazione preliminare della suscettibilità alla liquefazione di un terreno per i terreni a granulometria uniforme (a) ed estesa (b) (da AGI, 2005).

### **Limiti di Atterberg**

I limiti di Atterberg (o limiti di consistenza:  $W_L$ ,  $W_p$ ,  $W_s$  = limiti liquido, plastico e di ritiro) permettono di completare la classificazione dei terreni fini e/o coerenti (vedi allegato 2). Il contenuto di acqua nel campione al passaggio tra i vari stati fisici (stato liquido e stato plastico) si differenzia in base alla natura litologica e ne descrive il comportamento in base alla sua consistenza.

Tramite il "Diagramma di plasticità di Casagrande" può essere descritto sommariamente il comportamento del materiale in base anche al suo indice di plasticità " $I_p$ " e limite di liquidità.

Valori medi-elevati di  $W_L$  (generalmente  $>60\%$ ) indicano terre fini (argille/limi) con significativa capacità di assorbimento d'acqua e di rigonfiare e, talora, a spiccato carattere plastico o di compressibilità.

In alternativa, per una prima caratterizzazione geomeccanica si può utilizzare "l'Indice di Attività colloidale della frazione argillosa" ( $A = I_p / \% < 0.02 \text{ mm}$ ) proposto da Skempton con diagrammi (Seed H.B., Woodward R.J. e Lundgren R, 1962; "Prediction of Swelling Potential for Compacted Clays") costruiti sulla relazione tra l'"Attività colloidale" stessa e la percentuale di finissimo ( $\phi < 0.02 \text{ mm}$ ).

Ai fini di una migliore definizione del comportamento delle sabbie in condizioni cicliche è stato analizzato l' $I_p$  e  $W_L$  della sola parte fine del campione in quanto, a parità di contenuto (fine content), risulta in grado di influenzarne sensibilmente la resistenza ciclica.

### **Prove edometriche**

Su 5 campioni di terreno coesivo indisturbato, prelevati a varie profondità (da circa -5 a -39 m da p.c.) nei fori di sondaggio, è stata effettuata una prova edometrica di compressibilità a carico controllato e ad espansione laterale impedita in conformità alle indicazioni della normativa ASTM D2435/96.

Tale prova permette di studiare, simulando il modello reologico del terreno di Terzaghi (pistone-molle), le caratteristiche di compressibilità delle terre in condizioni di drenaggio libero (pietre porose). Per verificare il comportamento del terreno ai cambiamenti di sollecitazione nel tempo si rende perciò indispensabile una ricostruzione simulata in laboratorio, attraverso la prova edometrica, dello "stress path" (storia tensionale). In particolare il campione è stato sottoposto a cicli di carico e scarico controllati secondo una progressione geometrica, in modo che il flusso dell'acqua drenata e le deformazioni avvengano solo in direzione verticale.

I parametri che si ricavano sono il modulo edometrico " $E_d$ " ( $E_d = 1/m_v$  ove  $m_v$  = coeff. di compressibilità volumetrica) che consente di quantificare i cedimenti per consolidazione ad un dato carico applicato, il Coefficiente di Permeabilità " $K$ " che definisce le qualità drenanti, il coefficiente di consolidazione primaria " $C_v$ ", che è una caratteristica tipica del terreno e che consente di definire i tempi di consolidamento nonché il "carico di consolidazione" (pressione alla quale in natura è consolidato un terreno), il quale permette di definire l'eventuale grado di sovraconsolidazione cui il terreno è stato sottoposto (tramite metodo grafico di Casagrande).

La procedura e i dati forniti dalla prova si possono riassumere come segue:

- Il campione fustellato viene sottoposto ad un primo ciclo di carico con incremento a gradini onde contrastare l'eventuale rigonfiamento dovuto alla decompressione e per permettere di ristabilire le condizioni di carico litostatico al quale è sottoposto attualmente in natura.
- Attraverso l'analisi dei rami carico/scarico in funzione delle tensioni geostatiche esistenti alla profondità di prelievo è quindi possibile verificare la storia tensionale subita dal materiale ovvero il relativo grado di consolidazione/sovr consolidazione.
- I terreni analizzati risultano presentare sostanzialmente un comportamento del tipo "normalmente consolidato", cioè consolidato in base alla pressione litostatica alla quale è attualmente sottoposto in natura, talora debolmente sottoconsolidato.
- I valori del Coefficiente di consolidazione, "Cv", forniscono indicazioni circa i tempi di consolidamento.
- Il Coefficiente di permeabilità "K" misura la permeabilità esclusivamente verticale e, a differenza delle prove in sito, le prove in laboratorio tendono a fornire valori sottostimati.

Inoltre in terreni coesivi, qualora si conosca solo il modulo edometrico ed a scopo correlativo, si può determinare un valore approssimato di  $E_0$  (modulo di compressione del terreno) secondo la seguente relazione (G. Falchi Delitala – Geologia Tecnica):

$$E_0 = E_d(1 + \mu_0)(1 - 2\mu_0) / (1 - \mu_0)$$

oppure per piccole deformazioni (Carlo Cestelli Guidi, 1987):

$$E_d = E' / [(1 - 2\nu'^2) / (1 - \nu')]$$

in cui

$E'$  = modulo di deformazione drenato

$\nu'$  = coefficiente di poisson in condizioni drenate (mediamente = 0,2-0,3 e generalmente desumibile per via indiretta in funzione dell'indice di plasticità del materiale).

La prova permette di ricavare, inoltre, per ciascuna curva di compressibilità, i valori degli indici di compressibilità "Cc" e di ricomprensione "Cr", di utilità per il calcolo dei cedimenti di un deposito naturale nonché per alcune verifiche semplificate in campo dinamico. Chiaramente tale esame consente altresì di definire indirettamente il basso grado di sovr consolidazione delle sabbie, essendo intercluse tra orizzonti argillosi generalmente normalconsolidati.

### **Prova di colonna risonante**

Su n. 7 campioni di terreno coesivo indisturbato prelevati a varie profondità (da circa -5 a -44 mt da p.c.) nei fori di sondaggio sono state eseguite prove dinamiche di colonna risonante per determinare le curve di decadimento  $G/G_0$  e di smorzamento (damping %) ai fini delle analisi di Risposta Sismica Locale. Tali prove consentono di valutare nel dettaglio le caratteristiche di degradazione dei moduli elastici in relazione al grado di deformazione raggiungibile in condizioni dinamiche/cicliche anche a scopi ingegneristici e/o geotecnici.

Le prove di colonna risonante infatti consentono di determinare il modulo di taglio  $G$  e lo smorzamento dei terreni al variare delle deformazione di taglio imposta, da valori molto piccoli (intorno a 10-5%) fino a circa 10-2%. Vengono largamente impiegate in tutti i casi in cui i terreni sono sottoposti a sollecitazioni dinamiche, per lo studio dei problemi di deformazione dei terreni e di propagazione delle onde.

Il laboratorio ISMGEO dispone di diversi tipi di oscillatori utilizzabili in tali prove; alcuni operano su provini consolidati isotropicamente, altri anche su campioni sottoposti ad uno stato anisotropo di consolidazione.

Il sistema elettromagnetico è alimentato da un generatore di onde sinusoidali a frequenza variabile. Il segnale elettrico utilizzato per produrre la torsione e quello dell'accelerometro, che misura il moto della testa, sono visualizzati sugli assi X-Y di un oscilloscopio e danno luogo ad una configurazione ellittica quando il campione è in risonanza. I valori della frequenza di risonanza e dell'accelerazione indotta sono utilizzati per il calcolo del modulo di taglio e delle deformazioni. La curva di decadimento, prodotta interrompendo in risonanza l'eccitazione torsionale, permette di valutare lo smorzamento del materiale espresso come percentuale dello smorzamento critico

### **Modalità di ricostituzione dei campioni**

Per la realizzazione di prove triassiali cicliche su campioni di sabbia prelevati a varie profondità, dato il parziale/totale rimaneggiamento del materiale in fase di campionamento (ma granulometricamente integri e rappresentativi), si è reso necessario ricostituire il materiale allo stessa densità relativa riscontrata in sito (sulla base delle prove cptu eseguite preliminarmente in adiacenza al foro di sondaggio). Venendo distrutto lo scheletro/struttura del deposito, la modalità di ricostituzione riveste un ruolo importante per quanto attiene il comportamento del materiale sottoposto a sforzo ciclico o monotono poiché può condizionare significativamente il risultato atteso e gli esiti della prova (figura 5.9).

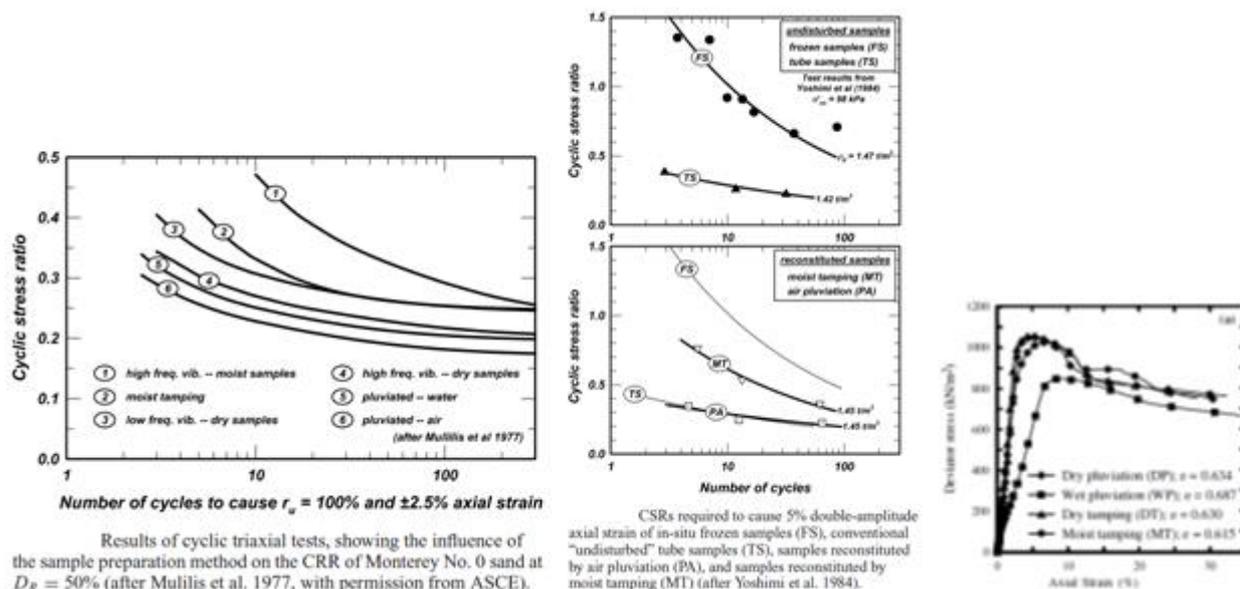


Figura 5.9 - Risultati di test triassiali ciclici su campioni indisturbati e ricostituiti in laboratorio con differenti modalità (da Idriss e Boulanger, 2008 - Juneja A., Raghunandan, M.E.2010).

In tal senso il metodo utilizzato deve risultare adeguato alle caratteristiche e distribuzione granulometrica del materiale nonché coerente quanto più possibile alla sua genesi deposizionale, portandolo ad un grado di densità relativa e carico litostatico prossimo a quello naturale stimato in sito.

Chiaramente qualsiasi metodo di ricostituzione non garantirà il raggiungimento delle originarie condizioni di mutuo incastro, microstruttura, storia tensionale, e pseudocementazione presenti allo stato naturale ed indisturbato, spesso in grado di condizionare significativamente ed in modo positivo la resistenza ciclica del materiale; pertanto il grado di resistenza ottenuto andrà considerato come prossimo alle condizioni di lower bound piuttosto che quelle rappresentative dello stato naturale dei terreni analizzati.

Nel caso in esame sono stati ricostruiti n. 15 provini su 22 analizzati in cella TRX e, ove possibile, è stata definita la rispettiva  $D_r\%$  di riferimento oltreché dalle prove in sito adiacenti anche da un controllo di laboratorio e misura della DR da provini indisturbati ottenuti dallo stesso campione.

Considerando la distribuzione granulometrica e la natura deposizionale dei materiali, i provini sono stati ricostituiti tramite la tecnica della “**deposizione pluviale a secco**”, ritenuta quella più congrua ed affine per garantire la miglior ricostruzione dello scheletro solido e verificarne il comportamento in condizioni cicliche.

### Prova triassiale ciclica

Su 20 provini di terreno incoerente prelevati a varie profondità (da circa -8.5 a -20 m da p.c.) nei fori di sondaggio sono state eseguite prove triassiali cicliche per definirne il potenziale di liquefazione a diversi livelli di sforzo ciclico e secondo una soglia critica di riferimento pari al 5% in doppia ampiezza. La prova è

stata effettuata su campioni consolidati isotropicamente alla pressione litostatica di riferimento pari a 100kpa, in modo da poter valutare gli esiti con i dati generalmente disponibili da bibliografia nonché secondo gli standard di normalizzazione nell'ambito dei metodi semplificati per le verifiche a liquefazione. Dei 20 provini analizzati 4 sono rappresentativi di campioni indisturbati, mentre i rimanenti sono stati ricostituiti con la tecnica della pluviazione in aria, ritenuta quella maggiormente affine ai caratteri deposizionali e litologici propri dei terreni in studio. Anche i campioni indisturbati, una volta effettuata la prova, sono stati ricostituiti per verificare le differenze di comportamento osservabili ed un miglior raffronto con gli altri provini analizzati; ciò ha permesso inoltre di valutare meglio l'effetto della struttura del terreno naturale in relazione alla resistenza ciclica dello stesso.

Tali prove infatti consentono la caratterizzazione del comportamento dei terreni sotto carichi ciclici riproducenti le sollecitazioni indotte da sismi, moto ondoso, vibrazioni di macchine rotanti, ecc. Trovano impiego per lo studio dei fenomeni di rottura (tra i quali assumono particolare rilevanza quelli di liquefazione delle sabbie) e per valutare l'influenza del livello di deformazione sui moduli dinamici e sullo smorzamento.

La prova viene eseguita per mezzo di una speciale cella triassiale, posta sotto una struttura di contrasto in modo che un sistema di carico possa applicare sulla testa del provino una forza sinusoidale, di frequenza generalmente compresa tra le frazioni di Hz e qualche Hz. I parametri misurati sono il carico applicato, la pressione in cella, la deformazione verticale e la pressione interstiziale.

## **6. MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO I**

### ***6.1 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 le coperture sedimentarie.

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 3.0 allegati alle linee guida "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica".

Nel caso specifico della Bassa Romagna, è necessario ricordare (come già descritto al paragrafo 4.4) che la totalità dei depositi di superficie affioranti nell'area di studio sono riferibili ad un'unica unità geo-litologica rappresentata dal Sub-sistema di Ravenna (AES<sub>8</sub>). Quanto appena esposto, ovviamente, non consente un'accurata codifica in pianta delle unità litotecniche: se si utilizzassero unicamente i depositi in affioramento

*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio dei Comuni della Bassa Romagna (RA)*  
Relazione Tecnico Illustrativa

per la classificazione geologico-tecnica dei terreni, l'intero territorio sarebbe rappresentabile, per quasi la sua totalità, con un'unica unità.

Pertanto, per ottenere un Carta Geologico-Tecnica che rappresentasse adeguatamente le condizioni del territorio in esame, in accordo con i tecnici della Regione Emilia Romagna e dei differenti Comuni, è stato scelto di procedere come segue:

- Dai risultati dei numerosi dati di perforazione sono state estrapolate le stratigrafie corrispondenti ai primi 10 m di profondità;
- E' stata valutata, in ciascun log stratigrafico estrapolato, la litologia prevalente 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.

La mappa realizzata con la metodologia descritta, seppur non fa riferimento ai materiali direttamente affioranti, risulta estremamente informativa nella definizione dei rapporti eteropici dei materiali. In tabella 6.1 è fornita una descrizione delle codifiche lito-tecniche assegnate ai terreni dell'area di studio, mentre in figura 6.1 è riportato il quadro di unione della Carta Geologico Tecnica dei Comuni della Bassa Romagna.

*Tabella 6.1 – Codifiche per la carta geologico-tecnica riferite ai terreni della Bassa Romagna*

<b>Codifica Lito-tecnica</b>	<b>Sigla Lito-tecnica</b>	<b>Ambiente Deposizionale</b>	<b>Sigla Deposizionale</b>
Terreni contenenti resti di attività antropica	RI	Non specificato	zz
Sabbie limose, miscela di sabbia e limo in facies di argini attuali	SM	Fluvio-lacustre di argine, barra o canali	es
Sabbie pulite con granulometria poco assortita in facies di paleodossi e paleocanali	SP	Fluvio-lacustre di argine, barra o canali	es
Sabbie argillose, miscela di sabbia e argilla di cordone litoraneo	SC	Costiero di Cordone litoraneo	cl
Sabbie limose, miscela di sabbia e limo di piana inondabile	SM	Fluvio-lacustre di piana inondabile	pi
Limi argillosi di media-bassa plasticità, argille sabbiose, con locale presenza di materiale organico (torbe)	CL	Fluvio-lacustre di piana inondabile	pi

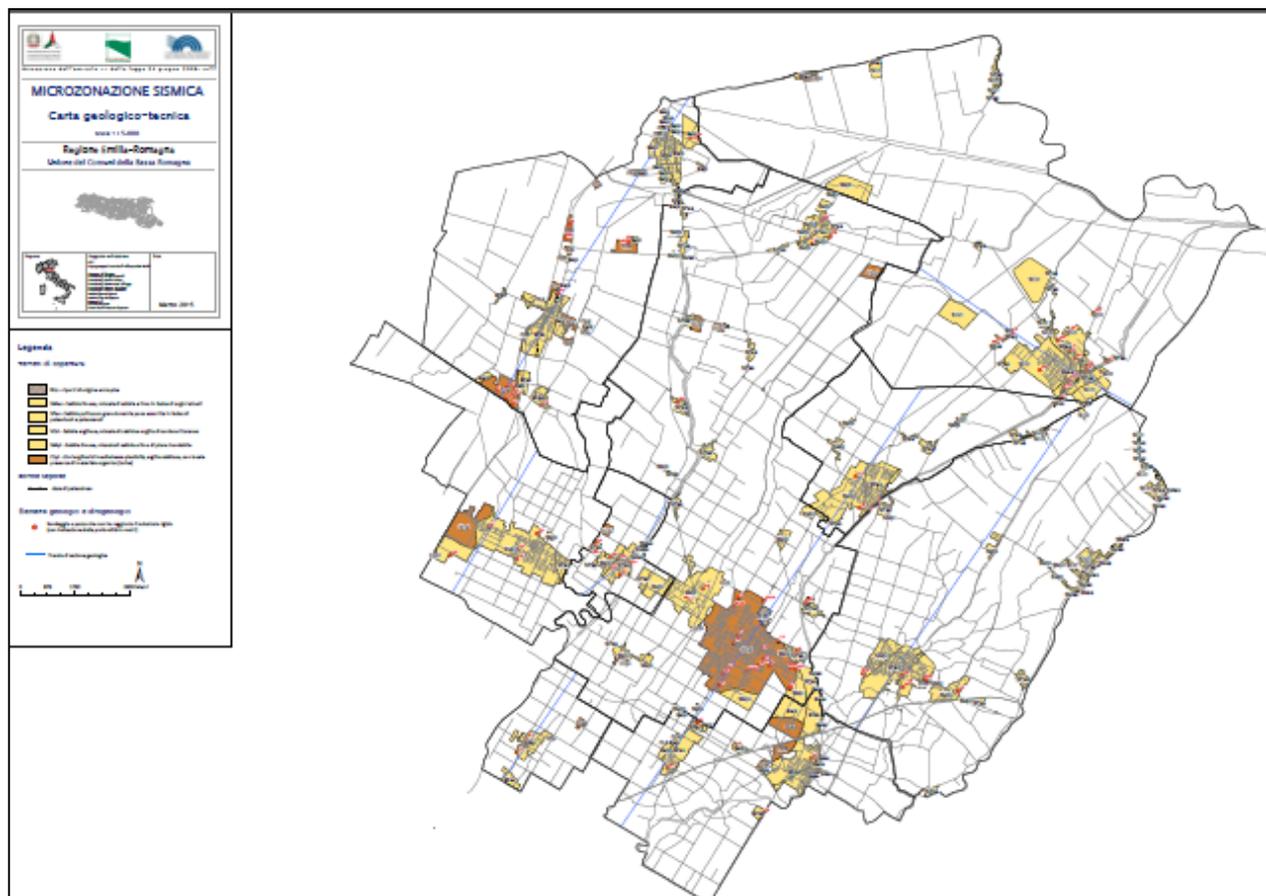


Figura 6.1 – Carta Geologico-Tecnica dei Comuni della Bassa Romagna; quadro di unione.

Oltre alla carta “Geologico-Tecnica”, per comprendere i rapporti geometrici e giaciture tra i materiali di copertura (suddivisi in cicli deposizionali) e il substrato geologico, sono riportate in allegato n. 1 alla relazione una serie di sezioni realizzate dalla Regione Emilia Romagna e che attraversano l’area in studio ortogonalmente tra loro, lungo le direttrici principali di interesse. Esse, sviluppate lungo una rete di sondaggi profondi, permettono di definire gli andamenti e lineamenti geologici principali nonché di definire le dinamiche evolutive dell’area.

## 6.2 Carta delle Frequenze Naturali del Terreno

Sulla base dei risultati delle 111 registrazioni a stazione singola HVSR sono state costruite 4 differenti mappe delle Frequenze Naturali dei terreni per ciascuno dei Comuni della Bassa Romagna.

Nonostante, comunemente, negli studi di Microzonazione Sismica venga prodotta un’unica carta delle Frequenze Naturali, è stato scelto in questo caso di rilasciare 4 differenti elaborati per non perdere importanti informazioni legate ai massimi risonanti secondari.

Al fine di chiarire quanto appena espresso viene di seguito riportato un esempio sui criteri di elaborazione adottati. In figura 6.3 è riportata, a titolo di esempio, la misura HVSR T90 di Fusignano.

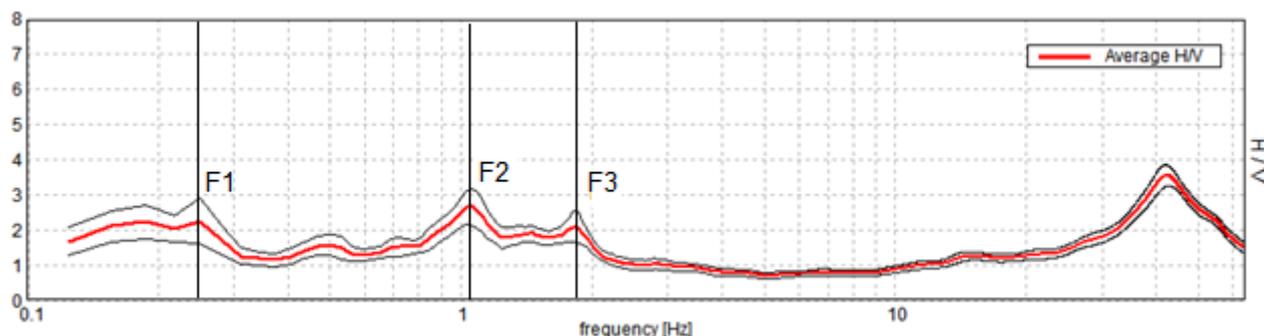


Figura 6.3-Curva dei rapporti spettrali relativa alla registrazione HVSR T90 di Fusignano.

Com'è possibile osservare la misura T90, come per la maggior parte dei rilievi realizzati, è caratterizzata da più massimi in Frequenza. Il primo indicato come F1 presenta una frequenza di circa 0.25 con ampiezza di circa 2.1; il secondo, indicato con F2 presenta una frequenza di 1.1 Hz con ampiezza di circa 2.6; il terzo, indicato con F3 presenta una frequenza di 1.9 Hz con ampiezza di circa 2.

I massimi F2 ed F3 ricadono nell'intervallo di Frequenze ingegneristico di risonanza degli edifici (compreso all'incirca tra 0.5 e 20 Hz) e, dunque, risultano potenzialmente pericolosi per fenomenologie di amplificazione locale. Il picco a bassa frequenza F1 indica un "contrasto d'impedenza sismico" in profondità e risulta informativo ai fini della ricostruzione del sub-strato sismico dell'area.

I codici F1, F2 ed F3 assegnati ai 3 massimi non sono casuali, ma dipendono dalle seguenti classi di frequenza:

- $F1 < 0.5 \text{ Hz}$
- $0.5 \text{ Hz} \leq F2 \leq 1.2 \text{ Hz}$
- $F3 > 1.2 \text{ Hz}$ .

L'interpretazione che è stata adottata per la messa appunto delle mappe di frequenza, prevede, inoltre, che la frequenza predominante dell'area indicata con codice F0 rappresenti il massimo, che tra tutti quelli riscontrati, presenta ampiezza maggiore. Dunque, nell'esempio di figura 6.3 avremo che F0 coincide con la frequenza F2.

In base a quanto esposto sono state realizzate 4 mappe per ciascun Comune in studio, in figura 6.4 è riportata, a titolo di esempio, la tavola di Fusignano.



Figura 6.4- Mappa delle Frequenze Naturali dei Terreni di Fusignano.

Il colore di ogni punto si riferisce al contenuto in Frequenza della misura a stazione singola HVSR in termini di F1,F2,F3 e Frequenza Predminante F0 mentre la dimensione è riferita ad ulteriori classi realizzate per individuare i valori di ampiezza A (figura 6.5).

<b>F&lt;0.5Hz</b>	<b>0.5≤F≤1.2</b>	<b>F&gt;1.2</b>
• A≤2	• A≤2	• A≤2
• 2<A≤3	• 2<A≤3	• 2<A≤3
• A>3	• A>3	• A>3

Figura 6.5-Codifiche per la visualizzazione in mappa delle Frequenze e della Ampiezze individuate dai rilievi HVSR.

In realtà, è necessario precisare, che esiste anche un quarto massimo a circa 40-50 Hz nella curva dei rapporti spettrali riportata in figura 6.3, che diversamente dai precedenti non è stato caratterizzato. Frequenze superiori a 20Hz, infatti, sono state escluse da ogni interpretazione.

Questa tipologia di massimi rappresenterebbe un contrasto molto superficiale (probabilmente prossimo a 1 metro) che considerando il piano di fondazione degli edifici è stato ritenuto non significativo.

### 6.3 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...).

Per l'area di studio sono state realizzate differenti tavole riferite a ciascun Comune; in figura 6.6 è riportato, a titolo di esempio, uno stralcio dell'elaborato MOPS del Comune di Alfonsine.

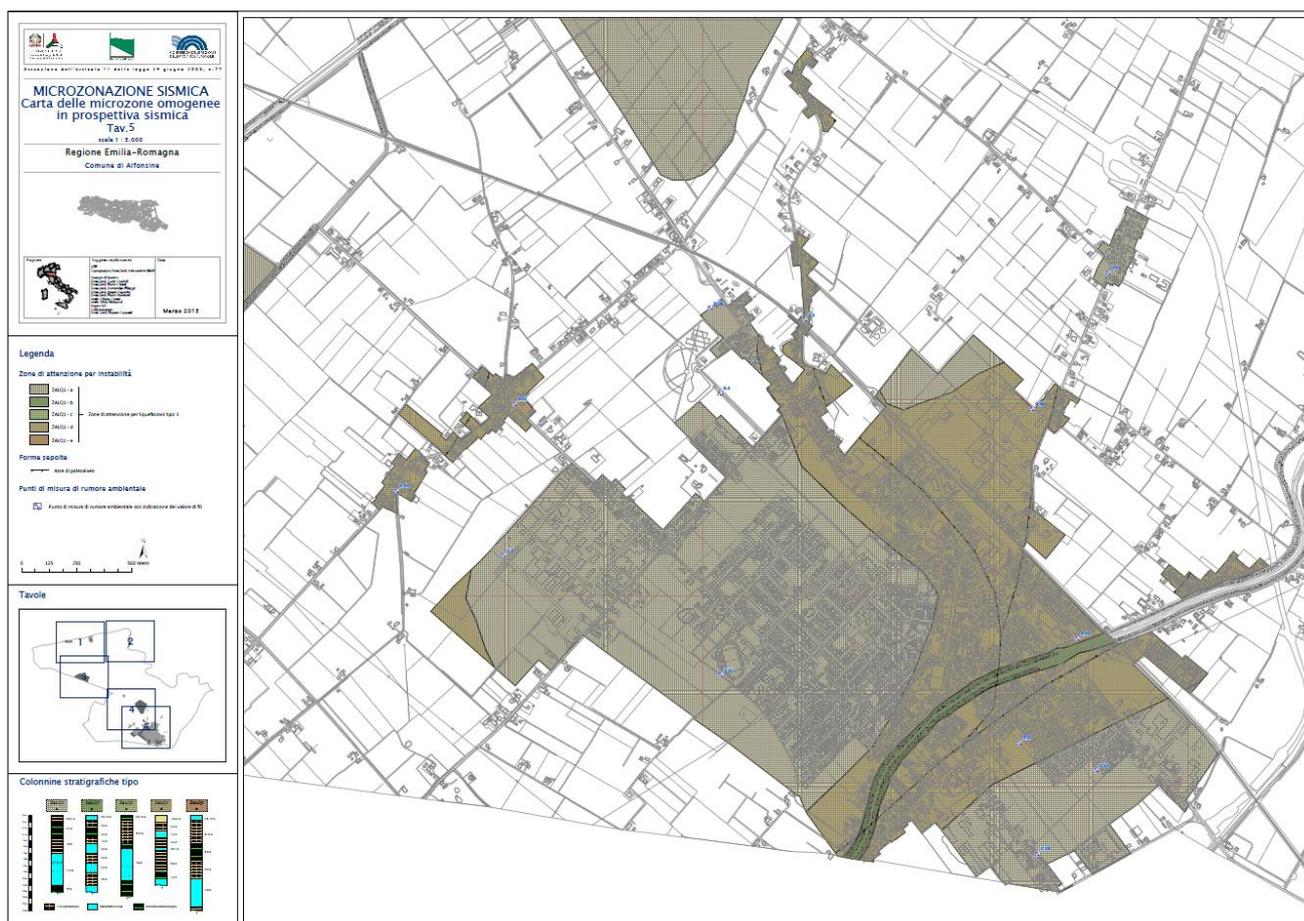


Figura 6.6-Stralcio della Carta delle MOPS riferita al Comune di Alfonsine (RA).

### Zone stabili

All'interno del territorio dei comuni della Bassa Romagna non sono state riscontrate microzone che è possibile definire stabili. Questo è dovuto in particolare al fatto che non è presente in affioramento il bedrock sismico ne quello geologico.

### Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

Nei comuni di Bagnara, Conselice, Cotignola, Lugo, Massa Lombarda e S. Agata sul Santerno sono presenti Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali rappresentate dalle colonnine stratigrafiche 2001.

La litologia prevalente è sicuramente quella rappresentata dai limi argillosi dove a varie altezze a partire dal piano campagna e con spessori variabili da 1-2 m fino a 3-4 m sono presenti livelli di sabbie e sabbie-limose e alternanze di sabbia, limo e argilla. Degno di nota è la particolarità riscontrata nel comune di Conselice dove all'interno della microzona 2001, alla profondità di circa 4 m, è presente un livello di 3-4 m di argille organiche.

### Zone suscettibili di instabilità

Le zone suscettibili di instabilità individuate all'interno delle aree urbanizzate e urbanizzabili dei comuni della Bassa Romagna, fanno riferimento alla possibilità che si possano verificare fenomeni di liquefazione. All'interno degli ICMS vengono definiti due tipi di zone di attenzione  $Z_{ALQ1}$  e  $Z_{ALQ2}$ . Le  $Z_{ALQ1}$  sono le zone nelle quali gli studi di livello 1 hanno verificato che esistono 4 condizioni predisponenti:

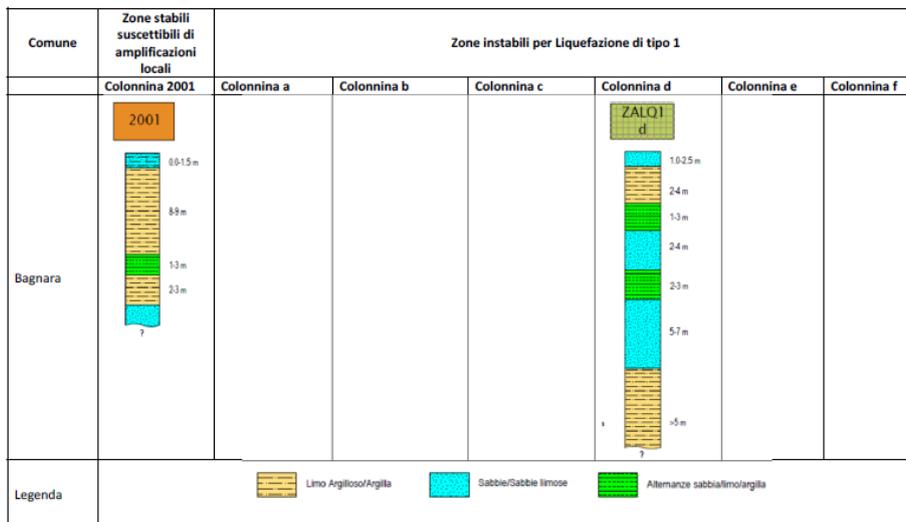
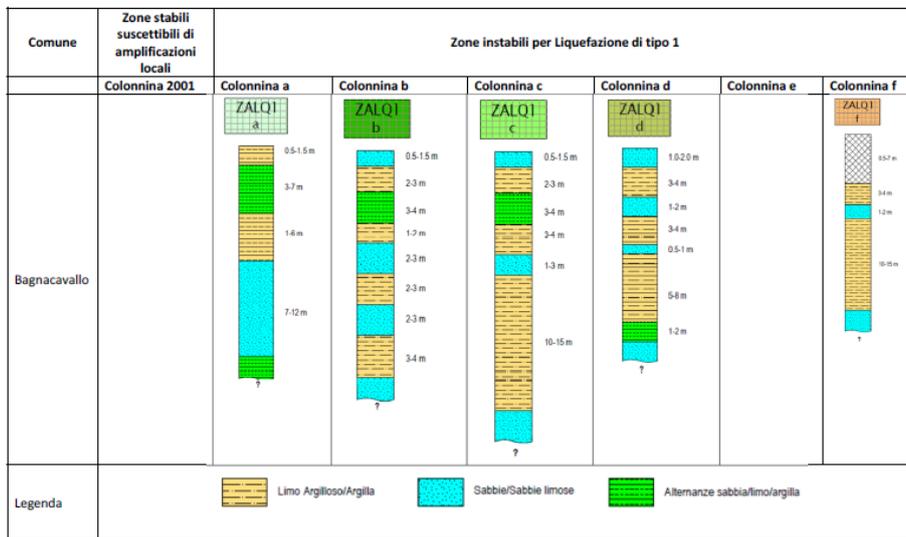
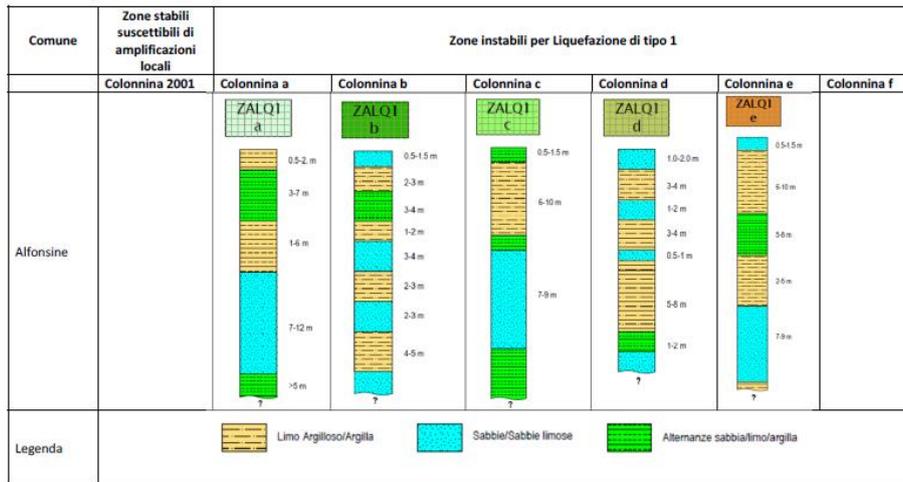
1. terreni sabbiosi;
2. falda a profondità inferiore a 15 m;
3.  $M_w$  attesa al sito  $>5$ ;
4. Accelerazioni massime in superficie ( $pga$ )  $>0.1g$ .

Le  $Z_{ALQ2}$  sono zone in cui sussistono solo le prime 3 condizioni, mentre per la quarta ( $pga > 0.1g$ ) è necessaria una verifica nei livelli di approfondimento superiori.

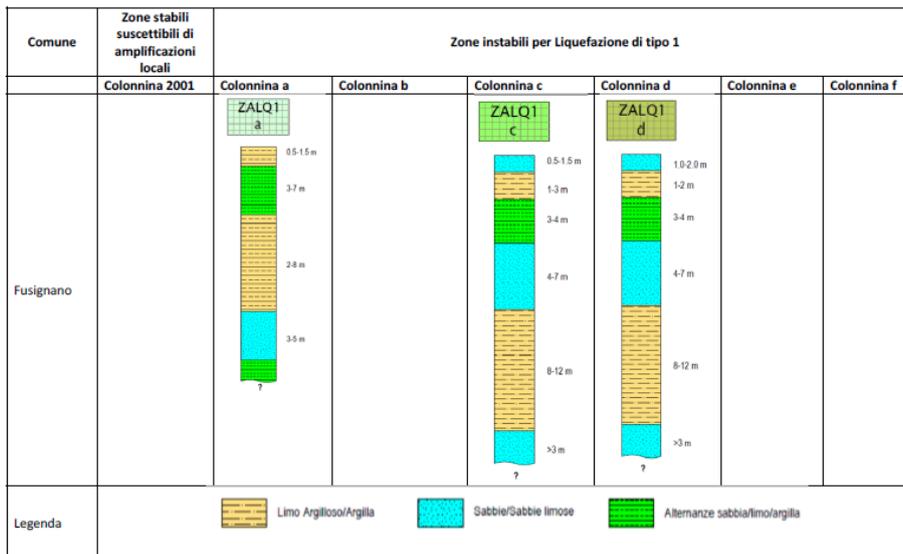
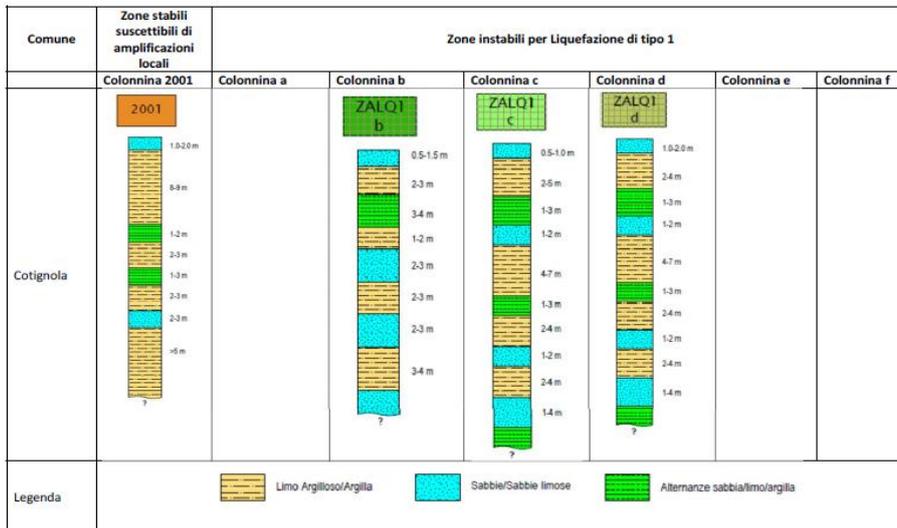
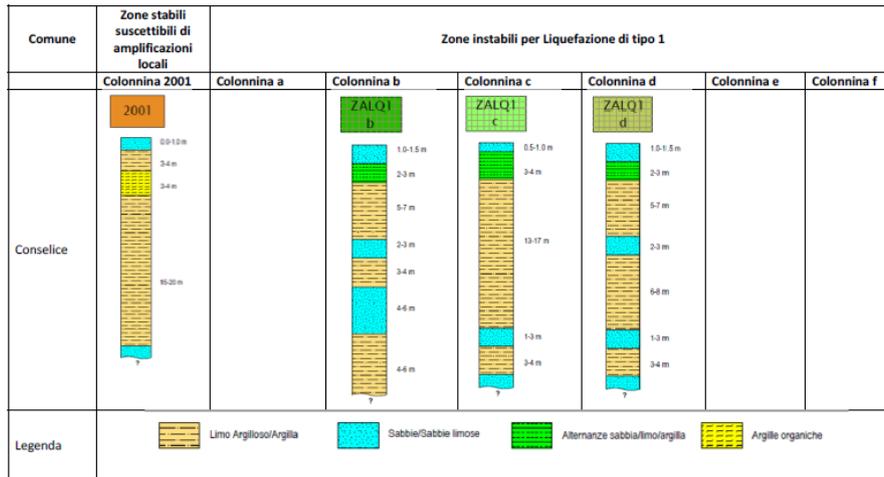
Il territorio in studio, ad esclusione delle aree classificate come stabili suscettibili di amplificazione, ricade sia in base alle condizioni predisponenti appena descritte sia a seguito delle verifiche numeriche di liquefazione esposte nel successivo paragrafo 7.2, all'interno delle zone di attenzione per liquefazioni di tipo 1 ( $Z_{ALQ1}$ ).

Le tabelle che seguono riassumono per ciascuna località in studio, le aree a comportamento sismico omogeneo individuate (ogni colonnina riporta le litologie prevalenti ed è associata ad una microzona in pianta).

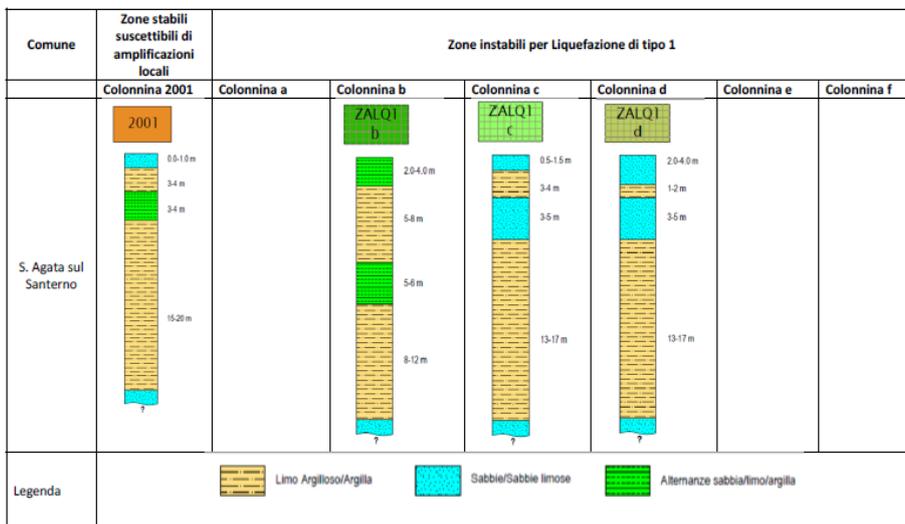
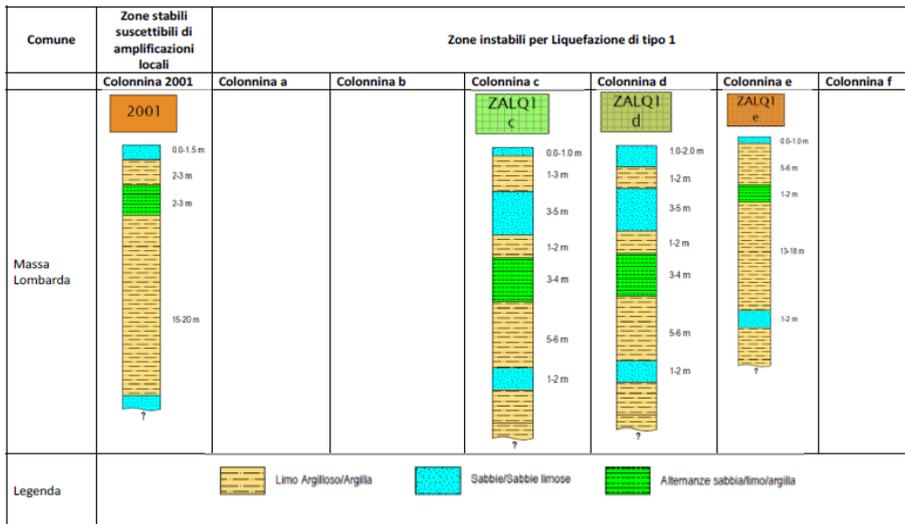
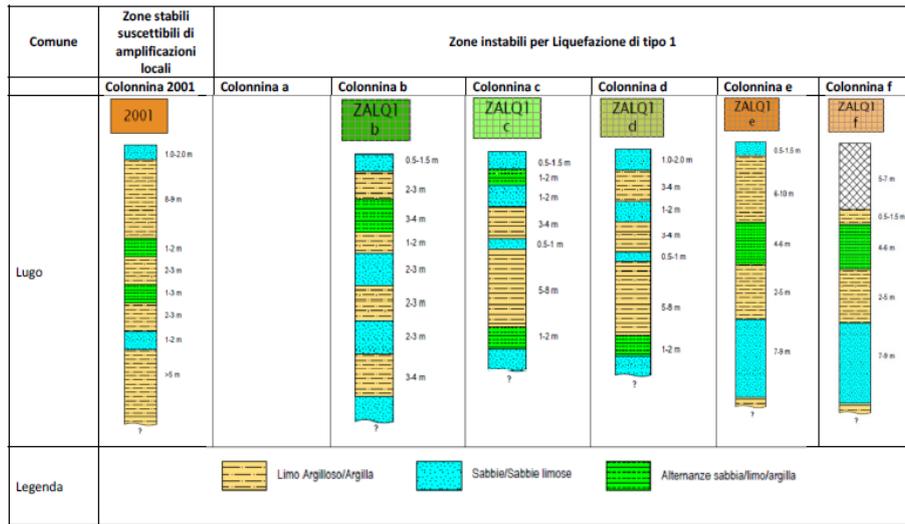
Studi di Microzonazione Sismica per il territorio dei Comuni della Bassa Romagna (RA)  
 Relazione Tecnico Illustrativa



Studi di Microzonazione Sismica per il territorio dei Comuni della Bassa Romagna (RA)  
 Relazione Tecnico Illustrativa



Studi di Microzonazione Sismica per il territorio dei Comuni della Bassa Romagna (RA)  
 Relazione Tecnico Illustrativa



## **7. MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO III (Analisi RLS 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 è stato quindi suddiviso in microzone contraddistinte da condizioni di pericolosità sismica omogenee ed, in base alle quali, sono state condotte le verifiche a liquefazione tramite metodologie semplificate, opportunamente tarate con elaborazione dei dati derivanti dalle prove di laboratorio ciclico per la stima del potenziale di liquefazione.

Dall'esito congiunto di queste metodologie di indagine, sull'areale urbanizzato ed urbanizzabile dell'Unione di Comuni della Bassa Romagna, sono quindi state sviluppate le cartografie di Microzonazione Sismica di Terzo Livello di approfondimento per liquefazione

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

#### *7.1.1 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 rigidità 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 vers. 5.1, sviluppati dalla soc. SeismoSoft, di cui si dispone della relativa licenza d'uso.

### 7.1.2 Moto di input

Come previsto da Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica, le analisi di Risposta Sismica Locale (RLS) sono state condotte considerando, in ciascuna simulazione, 3 differenti moti sismici al bedrock. In dettaglio, sono stati utilizzati i segnali di riferimento indicati dalla Regione Emilia Romagna nel Del. Ass. Lgs. N° 112 / 2007 R.E.R.

Si tratta di **Accelerogrammi Naturali** estratti dalla banca dati accelerometrica “European Strong Motion database”, con caratteristiche energetiche e di scuotimento (durata, contenuto in frequenza, ecc.) diverse tra loro, 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.

I 3 segnali di riferimento all'interno della banca dati accelerometrica vengono identificati attraverso i seguenti codici:

1. **000046xa**
2. **000126xa**
3. **000354xa**

Tali segnali, ciascuno scalato all'accelerazione di ancoraggio prevista al bedrock, risultano spettro-compatibili con lo spettro elastico comunale di riferimento 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 arefg di ogni comune sono riferiti al 10% di probabilità di superamento in 50 anni;

La “forma generale” dei 3 accelerogrammi (successivamente scalata in valor assoluto per ciascun comune) è riportata in figura 7.1.

Il valore di profondità del bedrock sismico, al quale sono stati ancorati i 3 segnali di riferimento, è stato determinato sia sulla base dell'analisi congiunta delle diverse prove geofisiche in sito (misure cptus, hvsr ed in array) sia sulle informazioni derivanti da sondaggi profondi. Da un punto di vista litologico si tratta all'incirca del passaggio alla formazione geologica marina di base (interfaccia basale AEI).

Il comportamento geomeccanico/geofisico di tale interfaccia è stato descritto mediante i seguenti parametri:  $\delta=22 \text{ kN/m}^3$ ,  $V_s=700/850 \text{ m/sec}$  e  $D_0=0.01$  (smorzamento/damping = 1.0 %).

Il livello freatico medio utilizzato per la modellazione numerica risulta variabile in relazione al sito di verifica e, comunque, mediamente compreso circa tra -1 e -2 m dal p.c. locale.

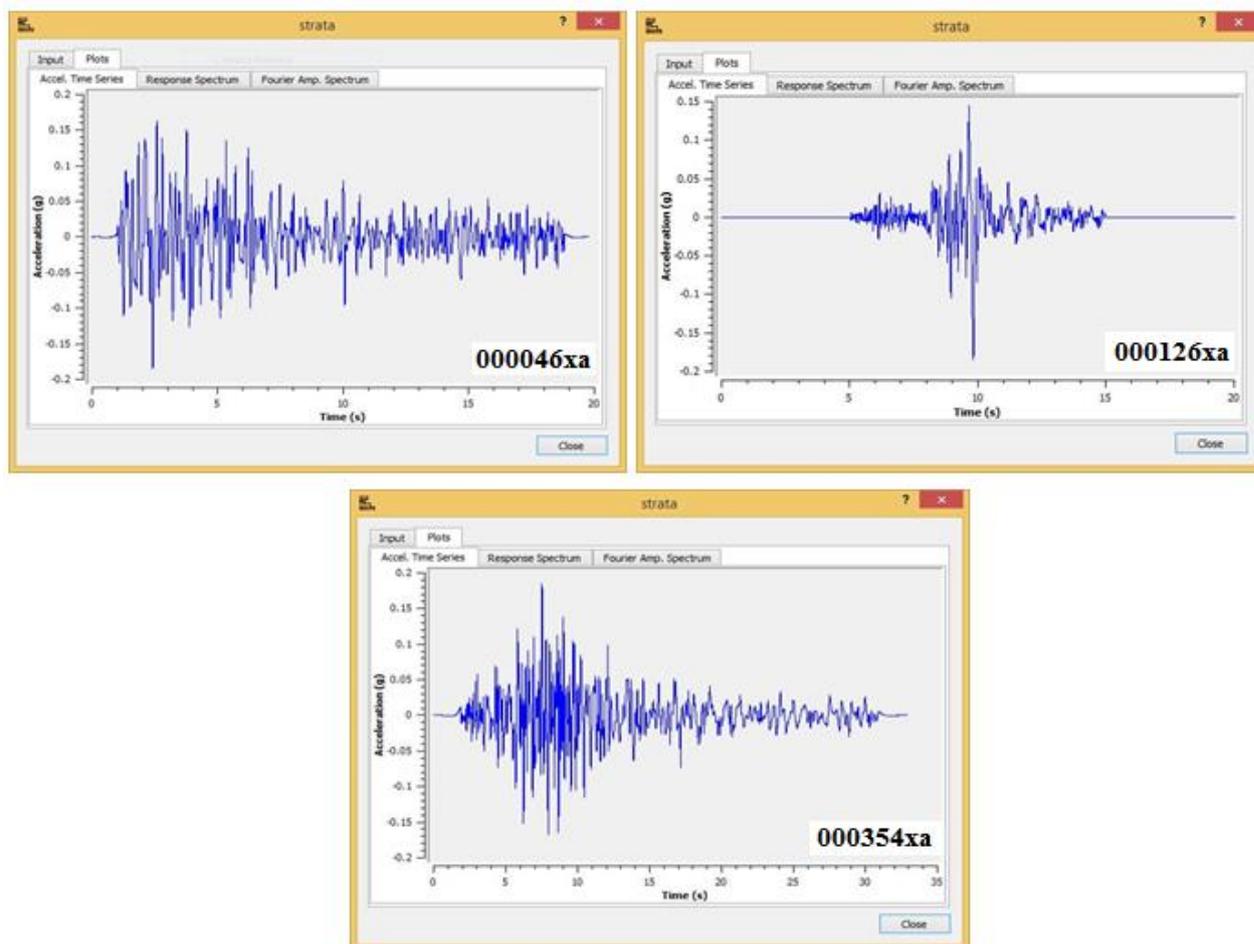


Figura 7.1-Sismogrammi di riferimento utilizzati come "Input" per le analisi RLS.

### 7.1.3 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 effettuate prove di colonna risonante su campioni prelevati a diverse profondità ed in corrispondenza di depositi differenti (figura 7.2).

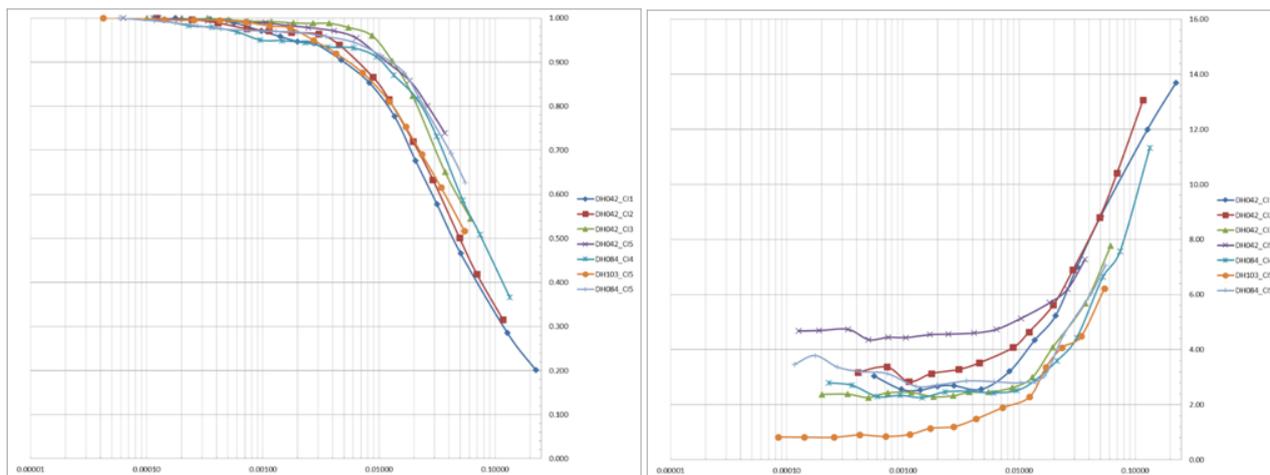


Figura 7.2-Risultati delle prove di colonna risonante per i differenti campioni di terreno

Al fine di ottenere curve rappresentative per il modello di sottosuolo, i dati sono stati filtrati dai comportamenti anomali e accorpati secondo litologie omogenee e per classe di profondità differenti (in relazione al diverso comportamento imputabile all'effetto del carico litostatico e/o grado di sovraconsolidazione), elaborandoli tramite la formulazione di Yokota et Al. 1981 (figura 7.3).

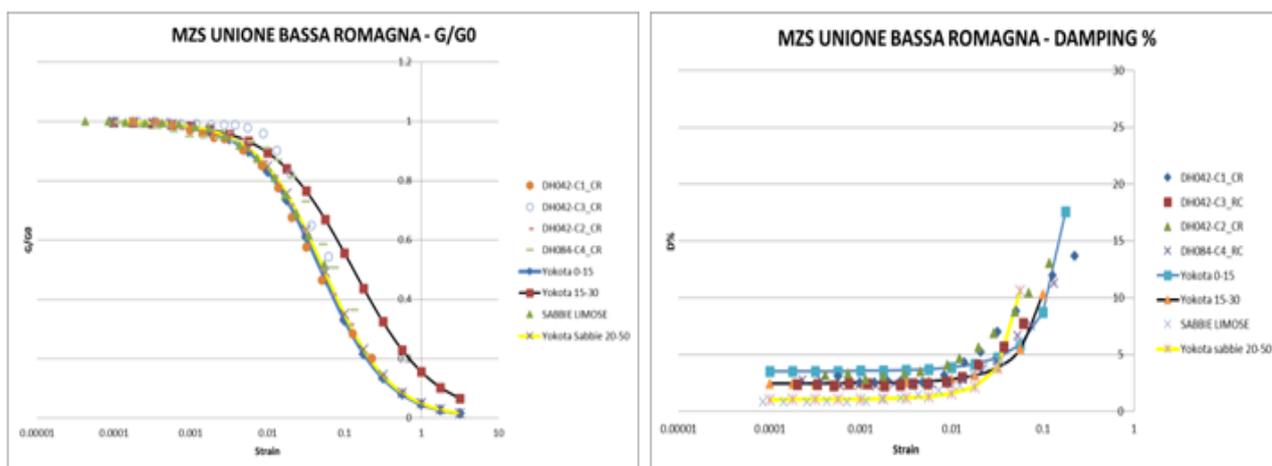


Figura 7.3-Normalizzazione delle curve di decadimento in base alle procedure proposte da Yokota et Al. 1981.

Si sono così ricavate curve rappresentative per Limi-Argillosi negli gli ambiti di profondità 0-15 e 15-30 m (esclusi i depositi argillosi organici e quelli significativamente compressibili e/o sottoconsolidati) e per sabbie e limi sabbiosi da 20-50 m da p.c.

Data la varietà tipologica dei materiali presenti in sito, per terreni litologicamente differenti da quelli analizzati (p.es. formazioni profonde), sono state utilizzate le curve di letteratura di seguito riportate: EPRI 93, Seed et Al. 86, Idriss 90, Darendeli e Stokoe 2001.

I gradienti di velocità  $V_s$  sono stati definiti attraverso le numerose prove geofisiche svolte. In dettaglio, i primi 30-50 m di spessore sono stati caratterizzati utilizzando i risultati delle prove simiche dirette (down-hole, cptus) mentre, per le  $V_s$  in profondità, sono stati utilizzati i risultati dell'inversione congiunta tra array sismico ed HVSR (per maggiori dettagli paragrafo 5.1.2).

Per il Bedrock si è assunto un valore di Damping pari a 1.0 %.

#### *7.1.4 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 vengono visualizzati nelle figure successive:

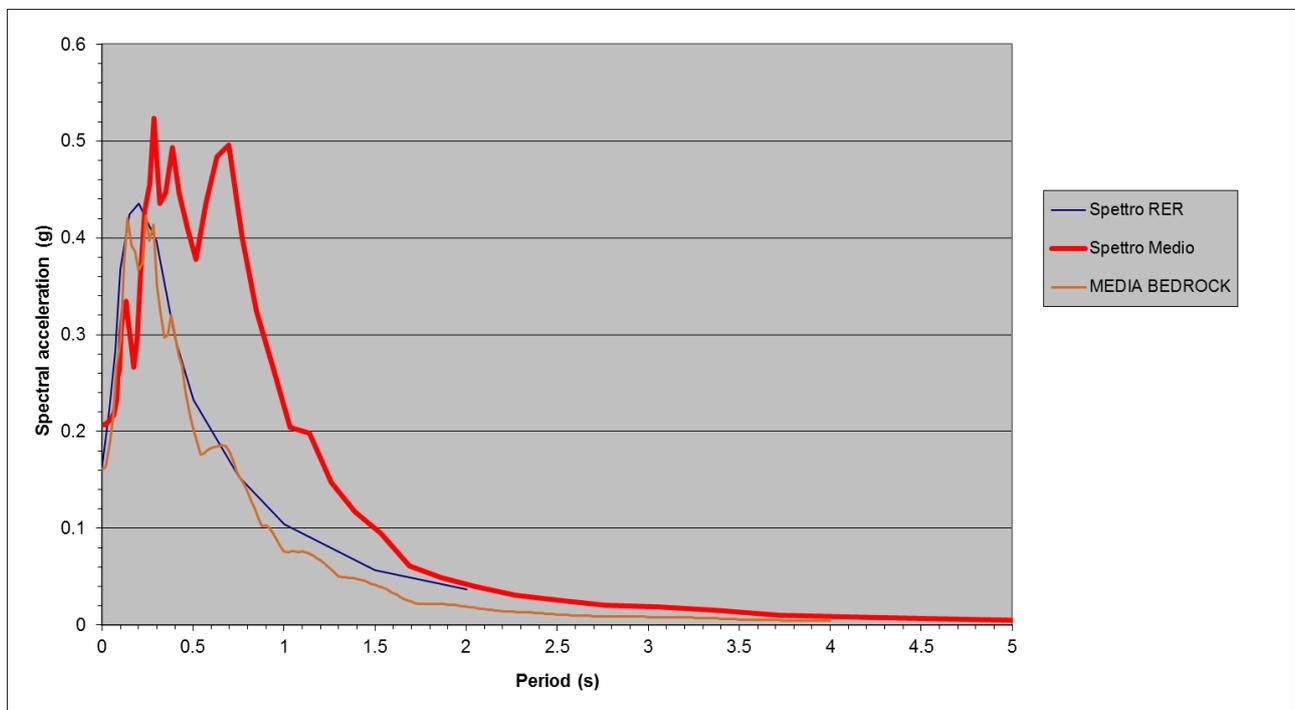
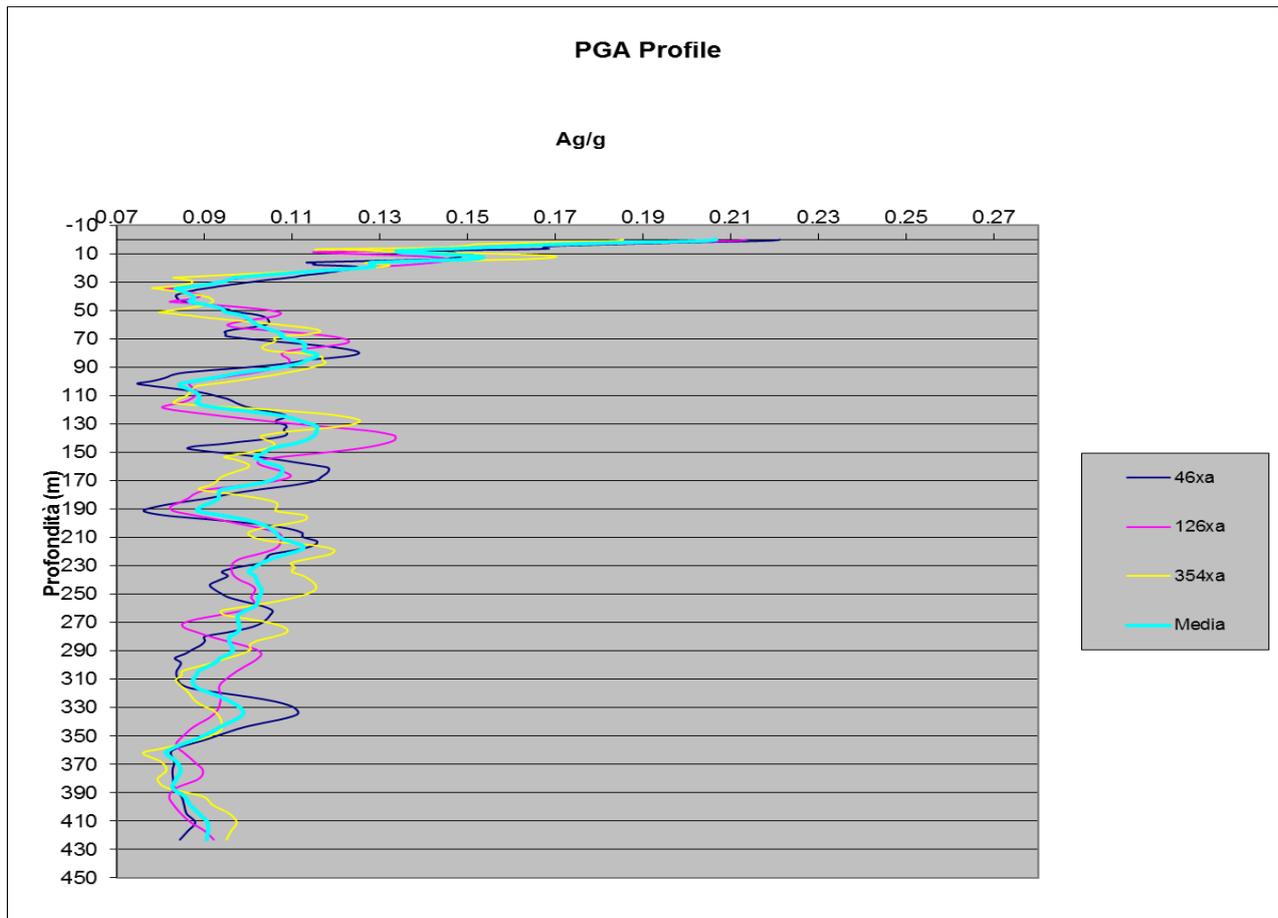
- i profili di accelerazione ( $A_g/g$ ) riferiti a ciascuno dei 3 segnali di Input;
- il profilo dell'accelerazione ( $A_g/g$ ) medio (media aritmetica dei 3 segnali);
- gli spettri elastici di accelerazione con smorzamento al 5% riferiti a ciascuno dei 3 segnali di Input;
- lo spettro elastico di accelerazione medio (media aritmetica dei 3 segnali).

Per ciascuna area di verifica sono state, inoltre, calcolate le relative "agmax" al suolo (media dei 3 segnali) ed i fattori di amplificazione determinati sulla base del rapporto  $ag_{max}/ag_{bedrock}$ , dei rapporti spettrali in pseudoaccelerazione (fra periodi 0.1-0.5 sec e 0.5-1.0 sec) ed in pseudovelocità (Intensità di Housner fra periodi 0.1-0.5 sec e 0.5-1.0 sec), i quali vengono sinteticamente riepilogati in allegato n. 3.

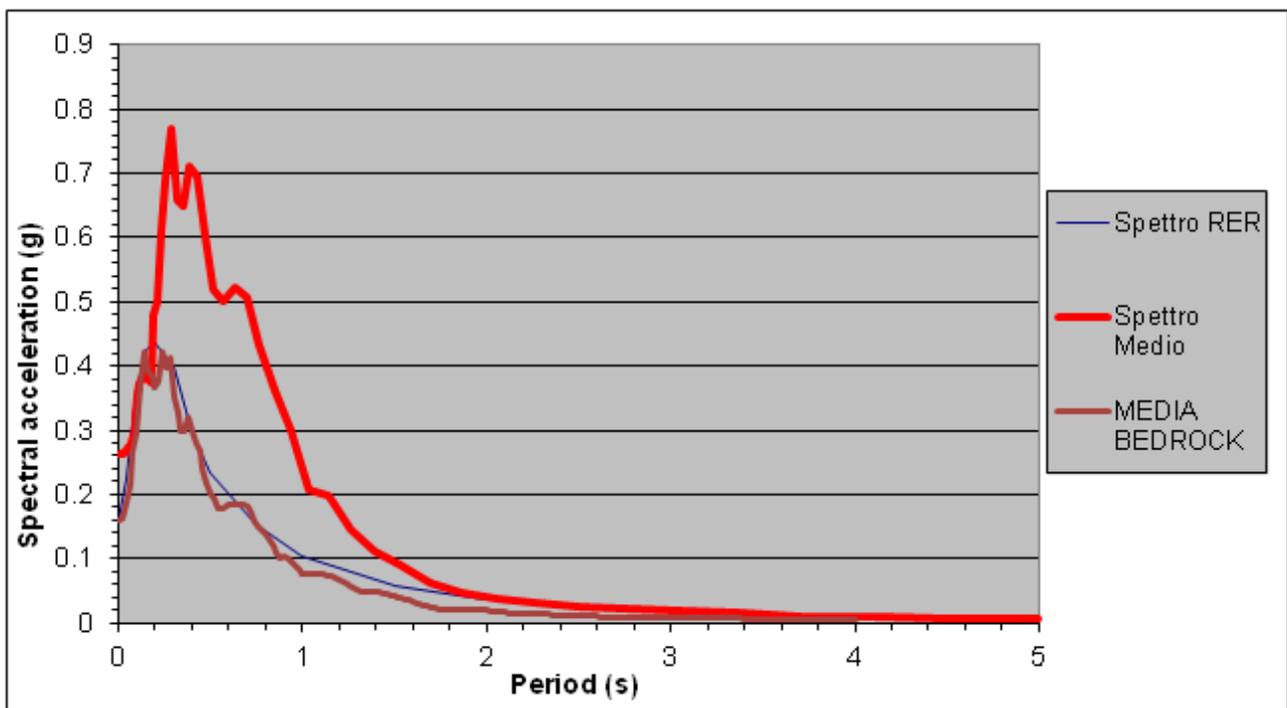
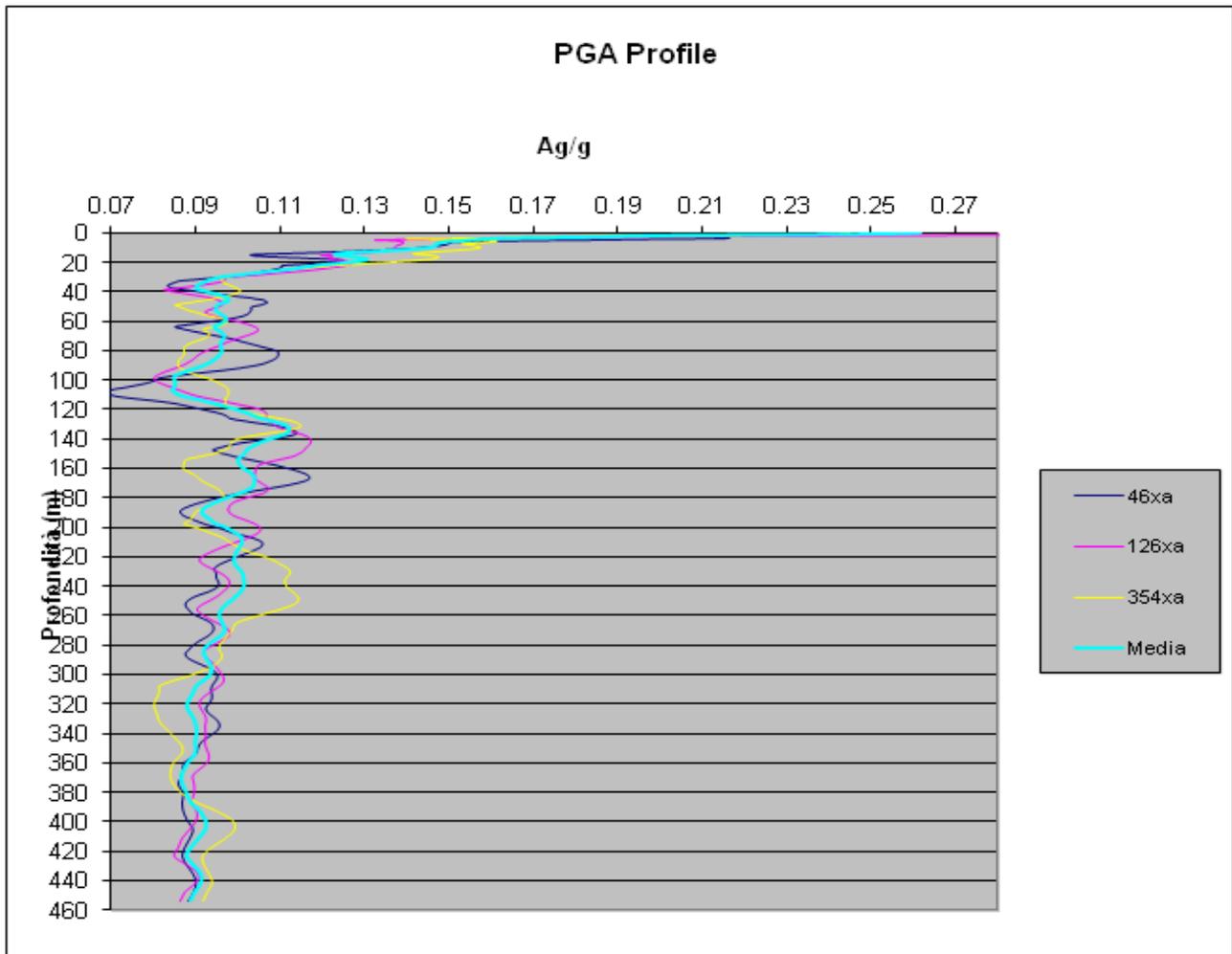
In coda a ciascuna verticale di verifica viene riportato anche il relativo valore di  $V_{s30}$  onde consentire un eventuale confronto con i parametri tabellari proposti negli abachi regionali e/o delle ICMS.

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

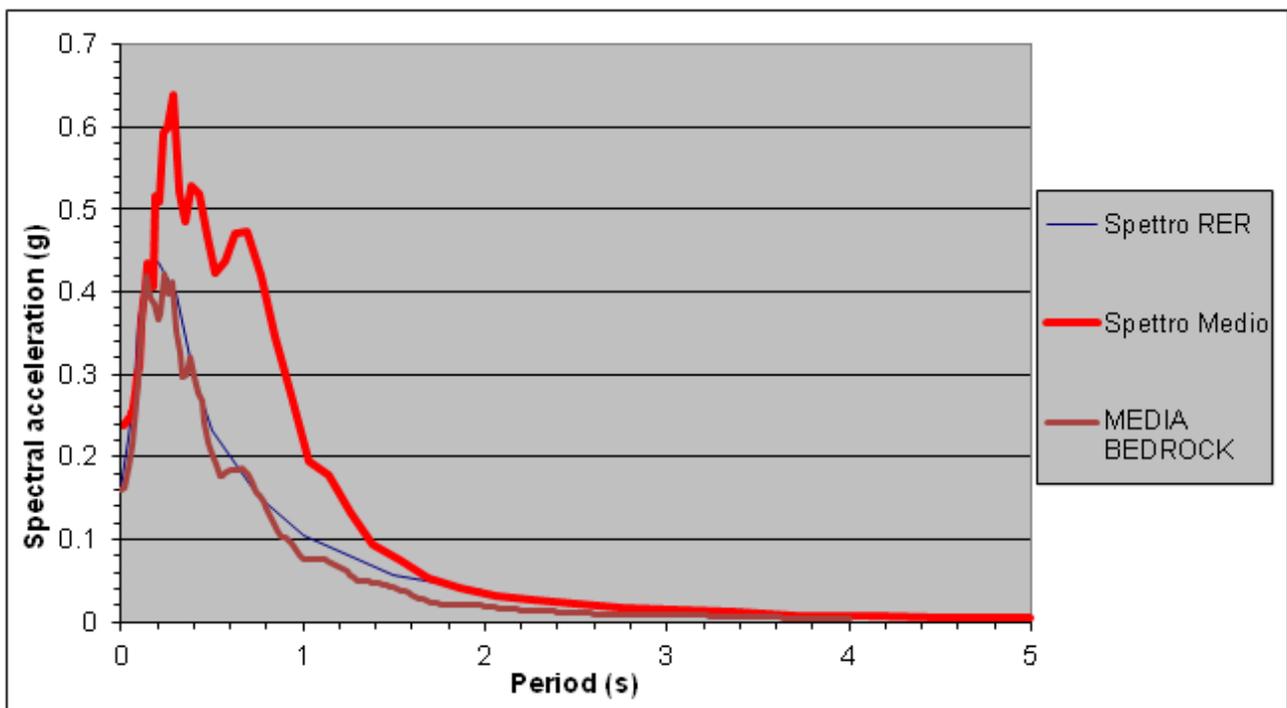
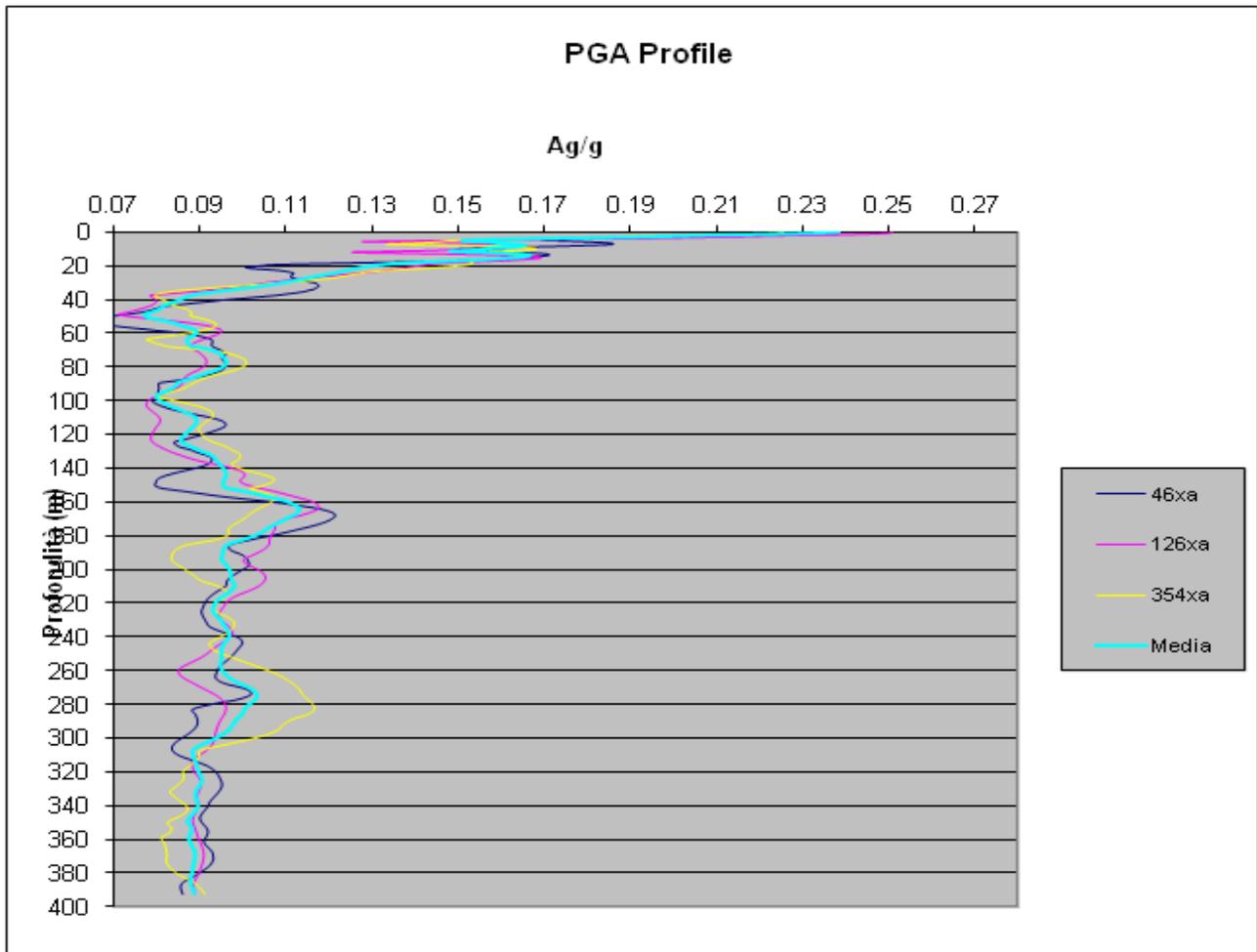
AREA-02\_DH-103\_Alfonsine



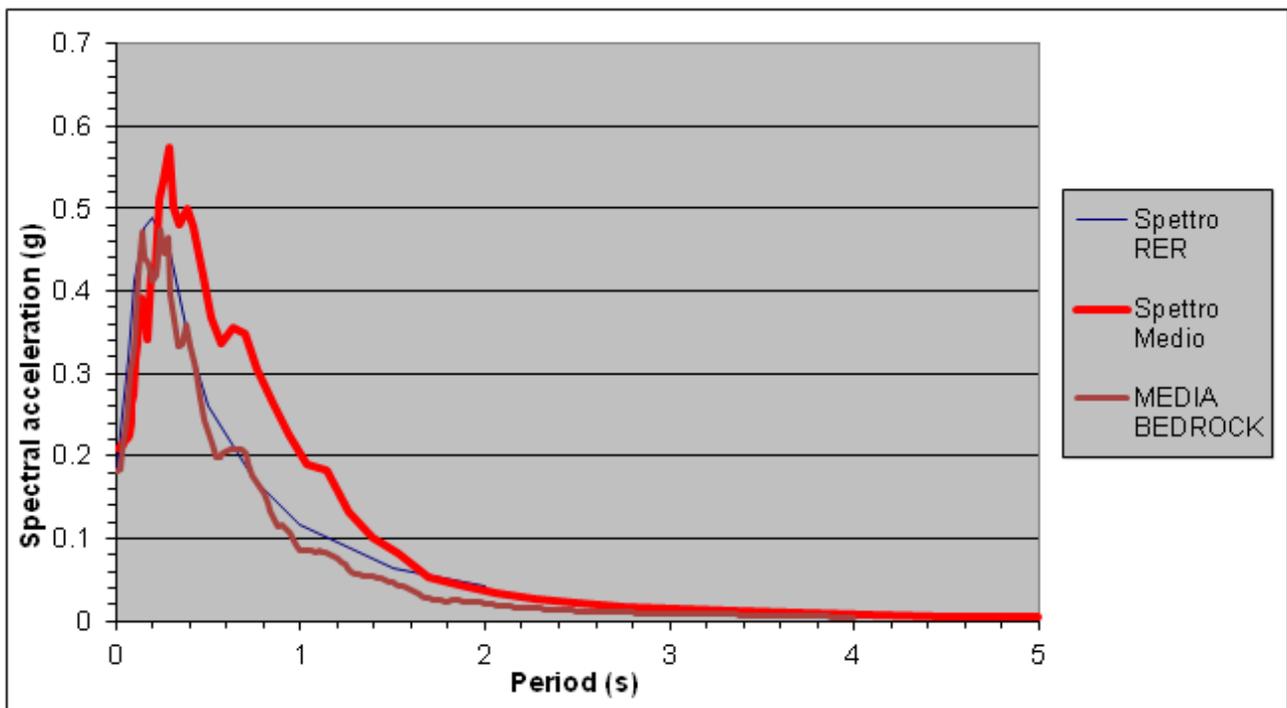
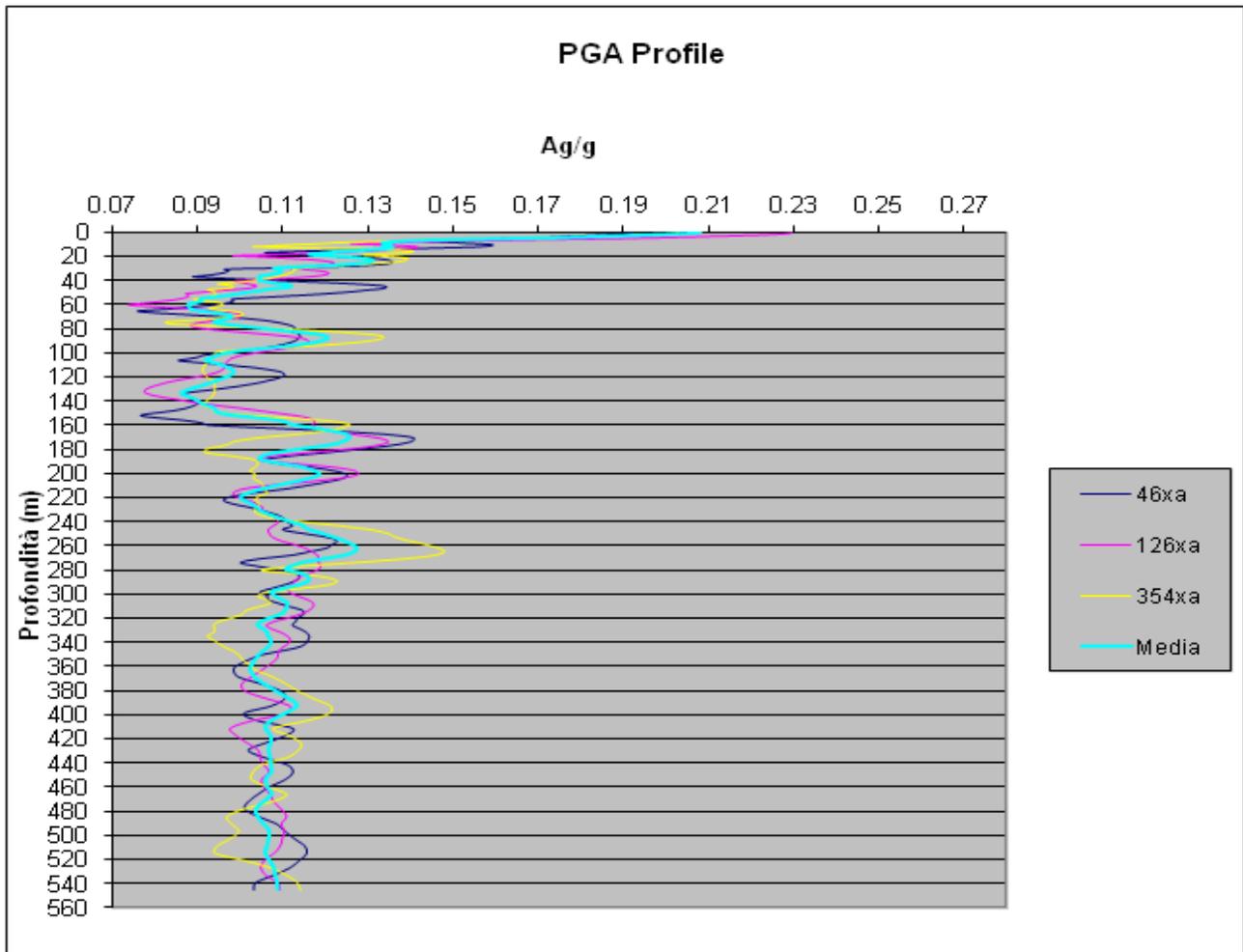
AREA-03\_CPTUS-117\_Alfonsine



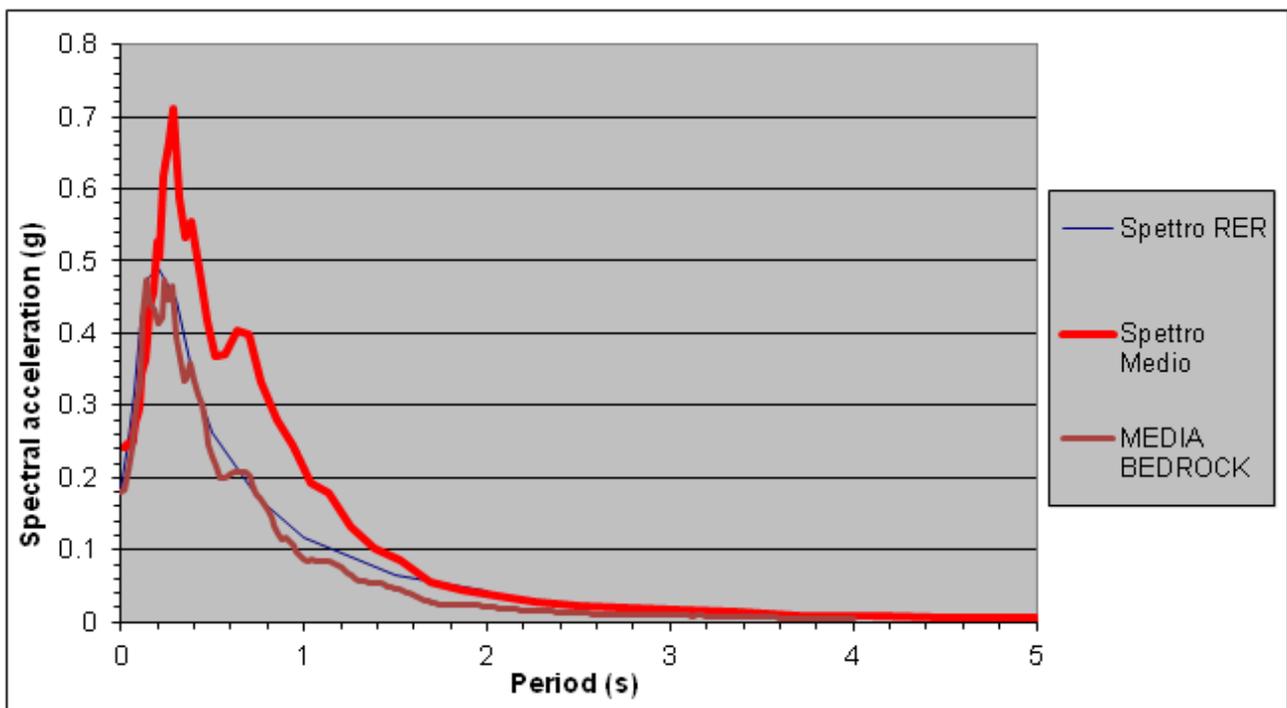
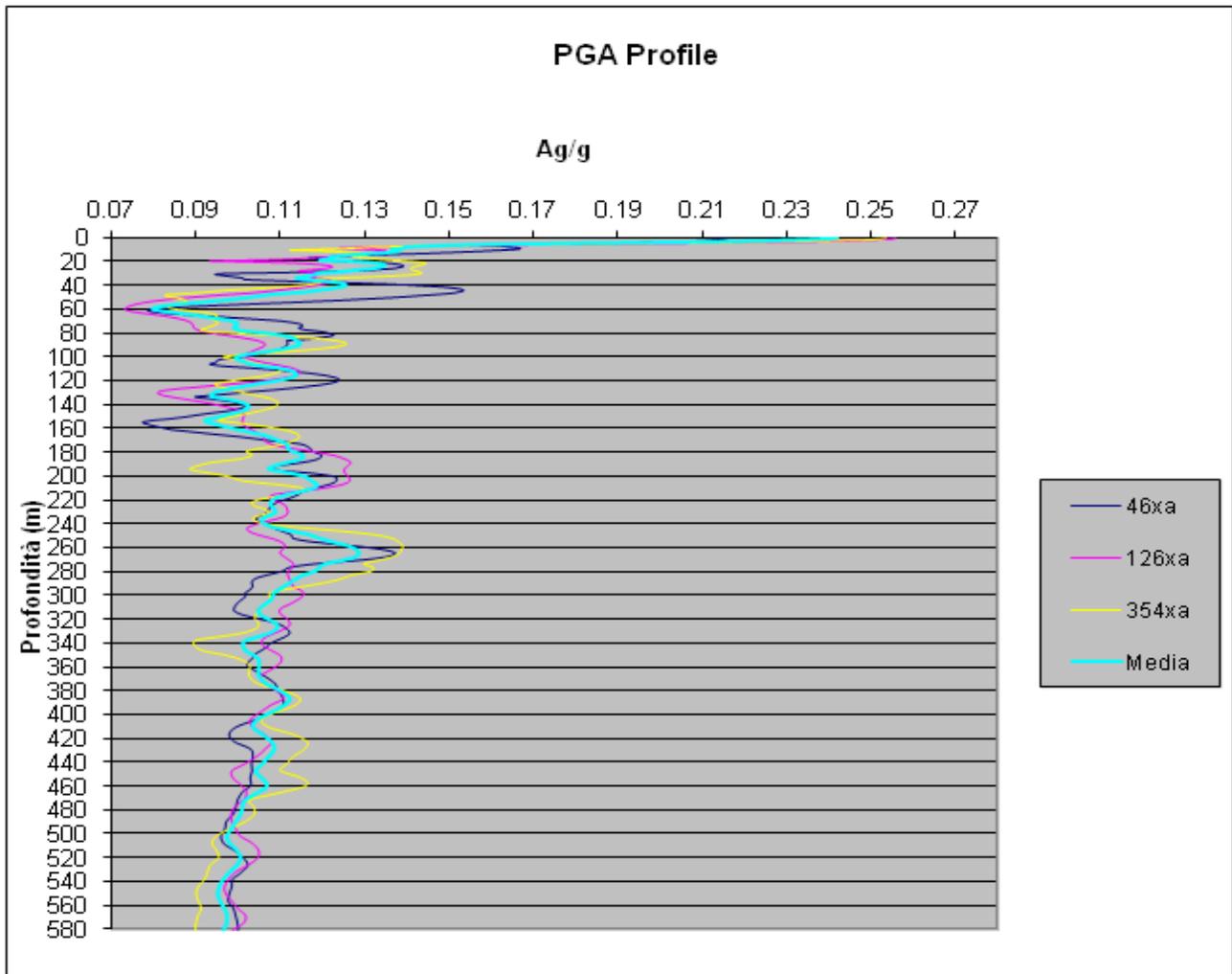
AREA-05\_CPTU-121\_Alfonsine



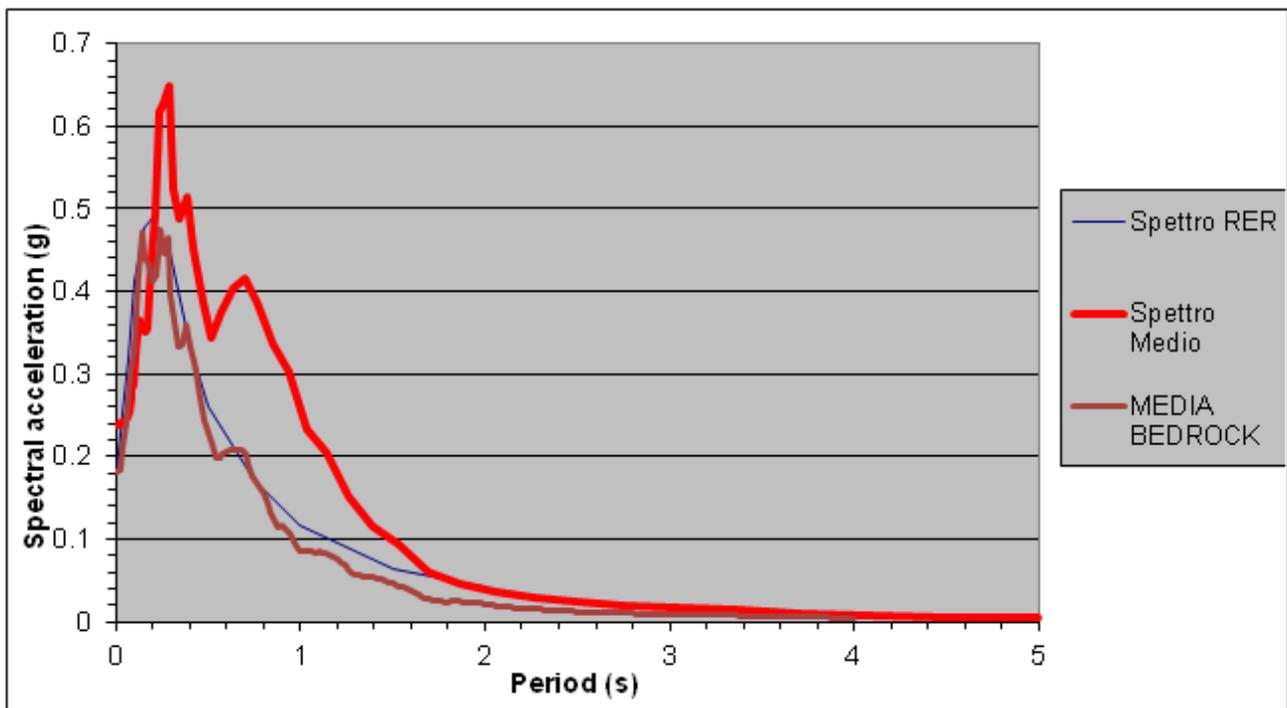
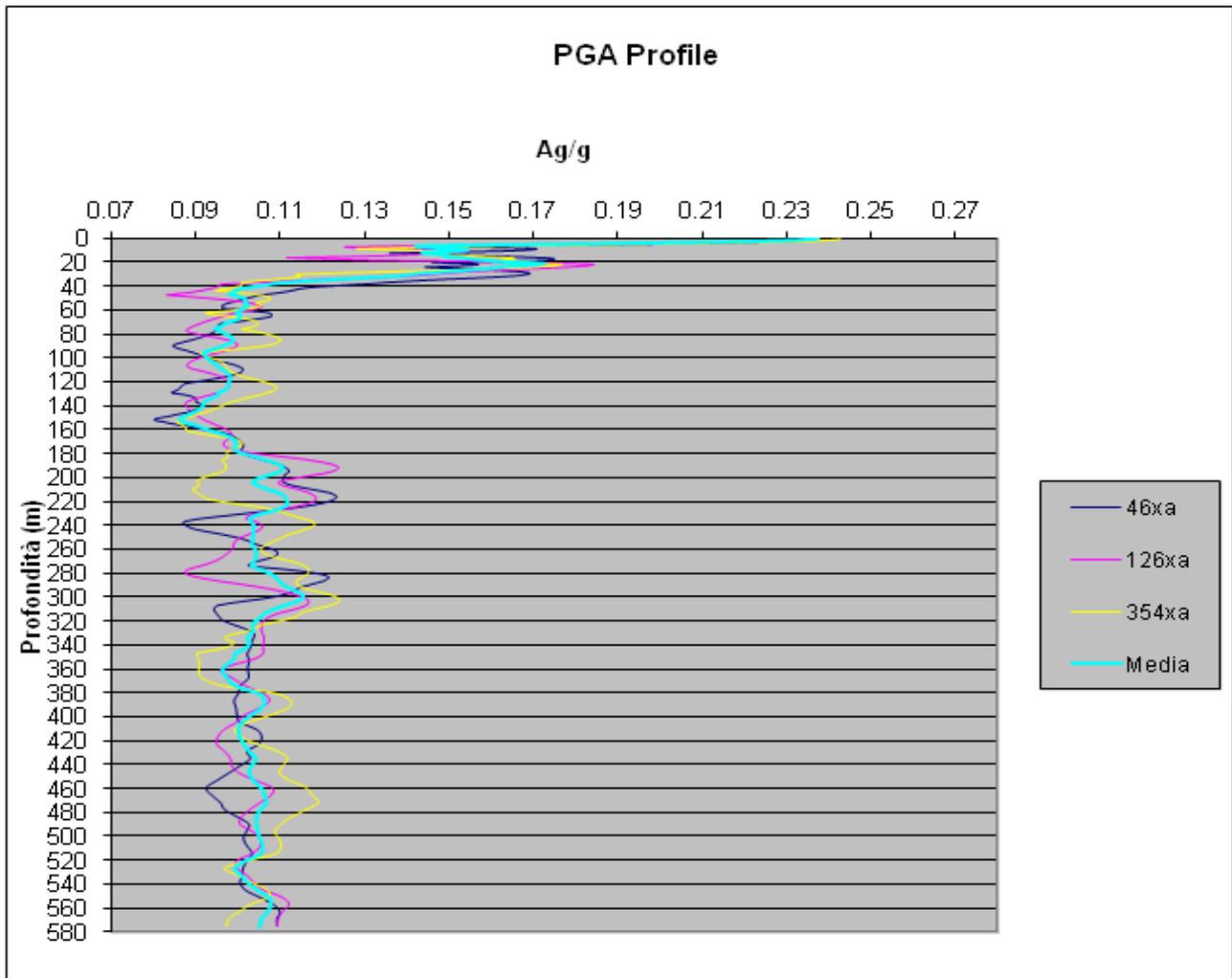
AREA-07\_CPTUS-058\_Bagnacavallo



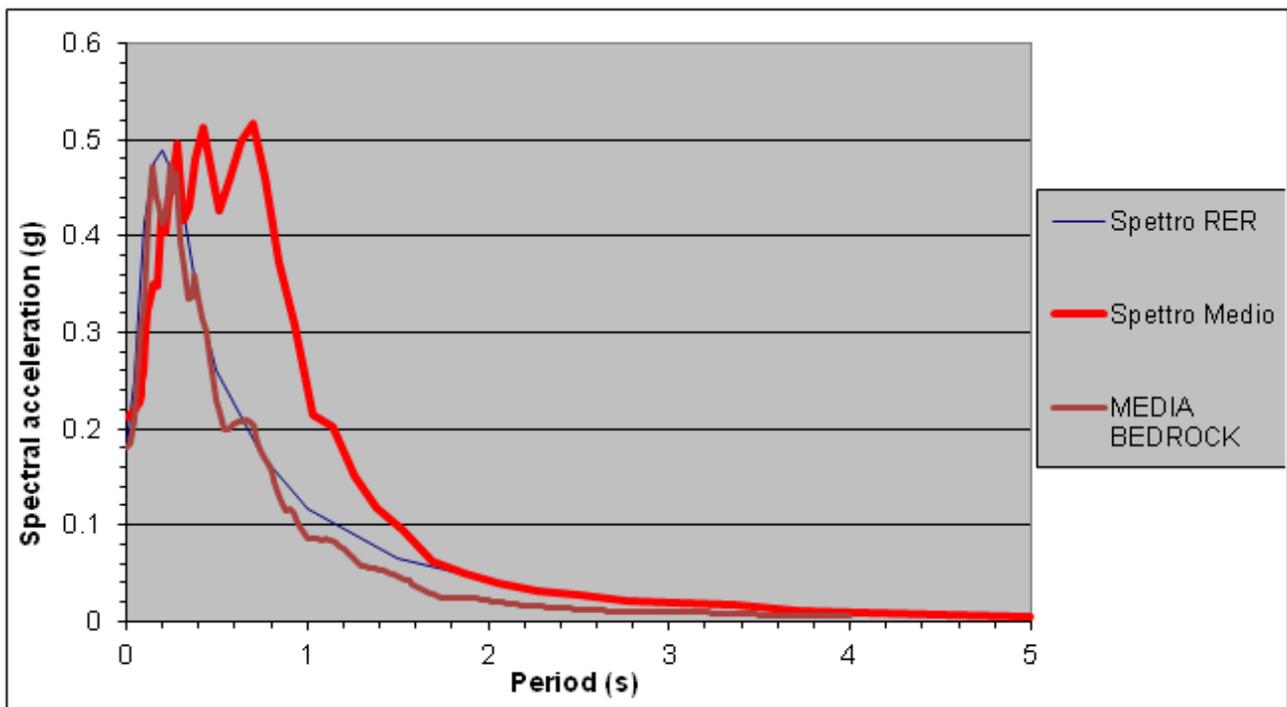
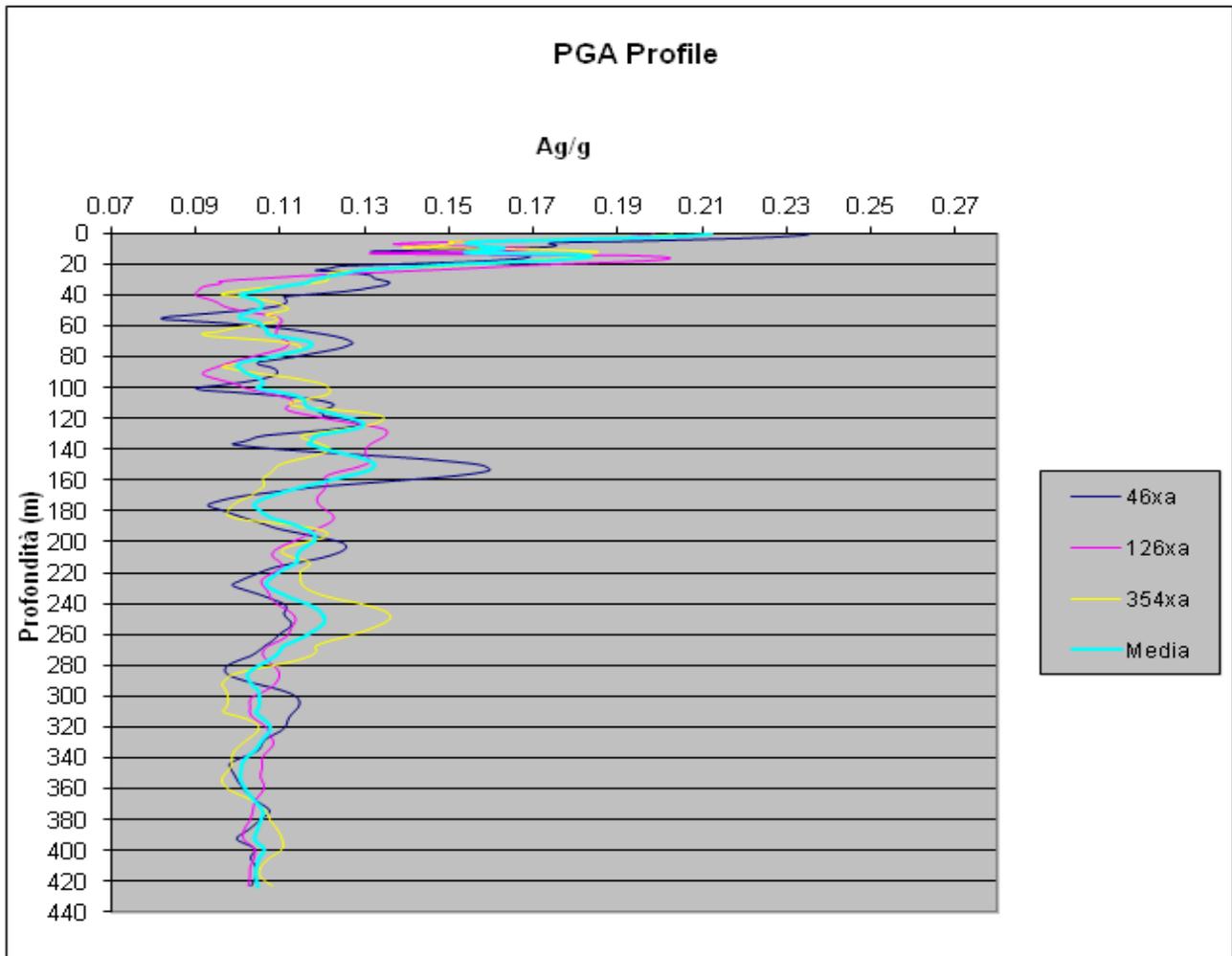
AREA-08\_CPTUS-050\_Bagnacavallo



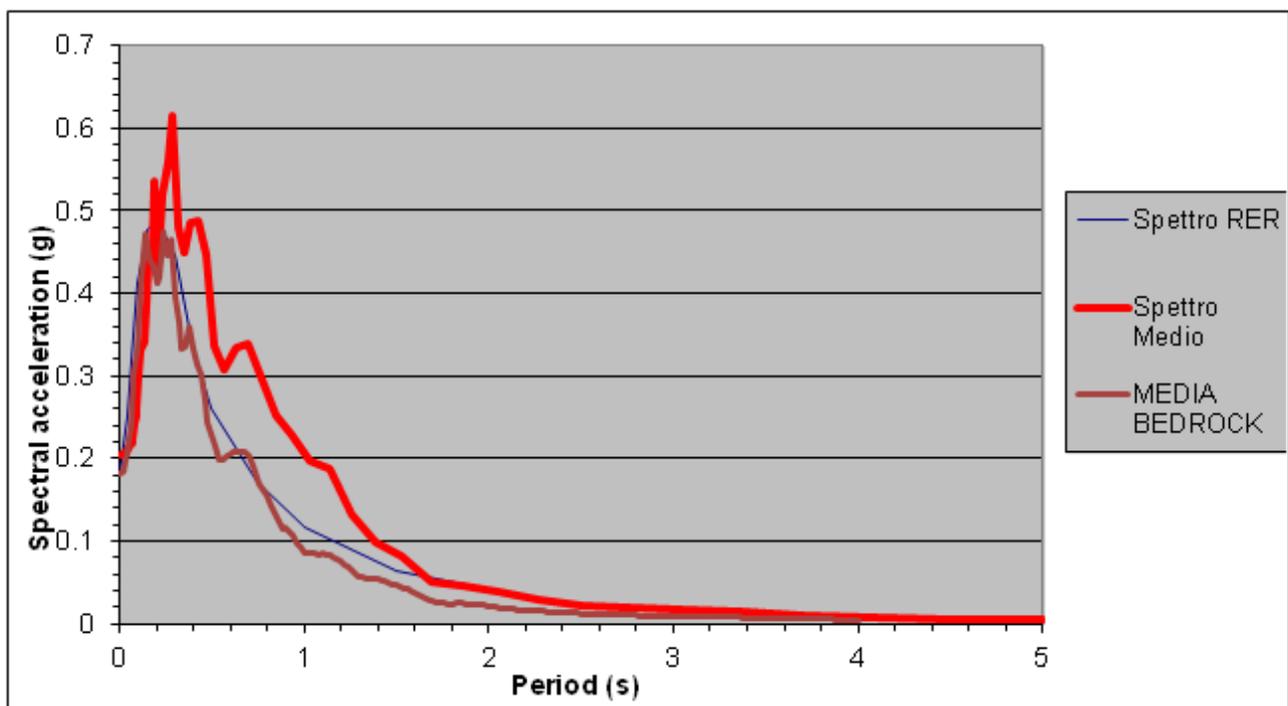
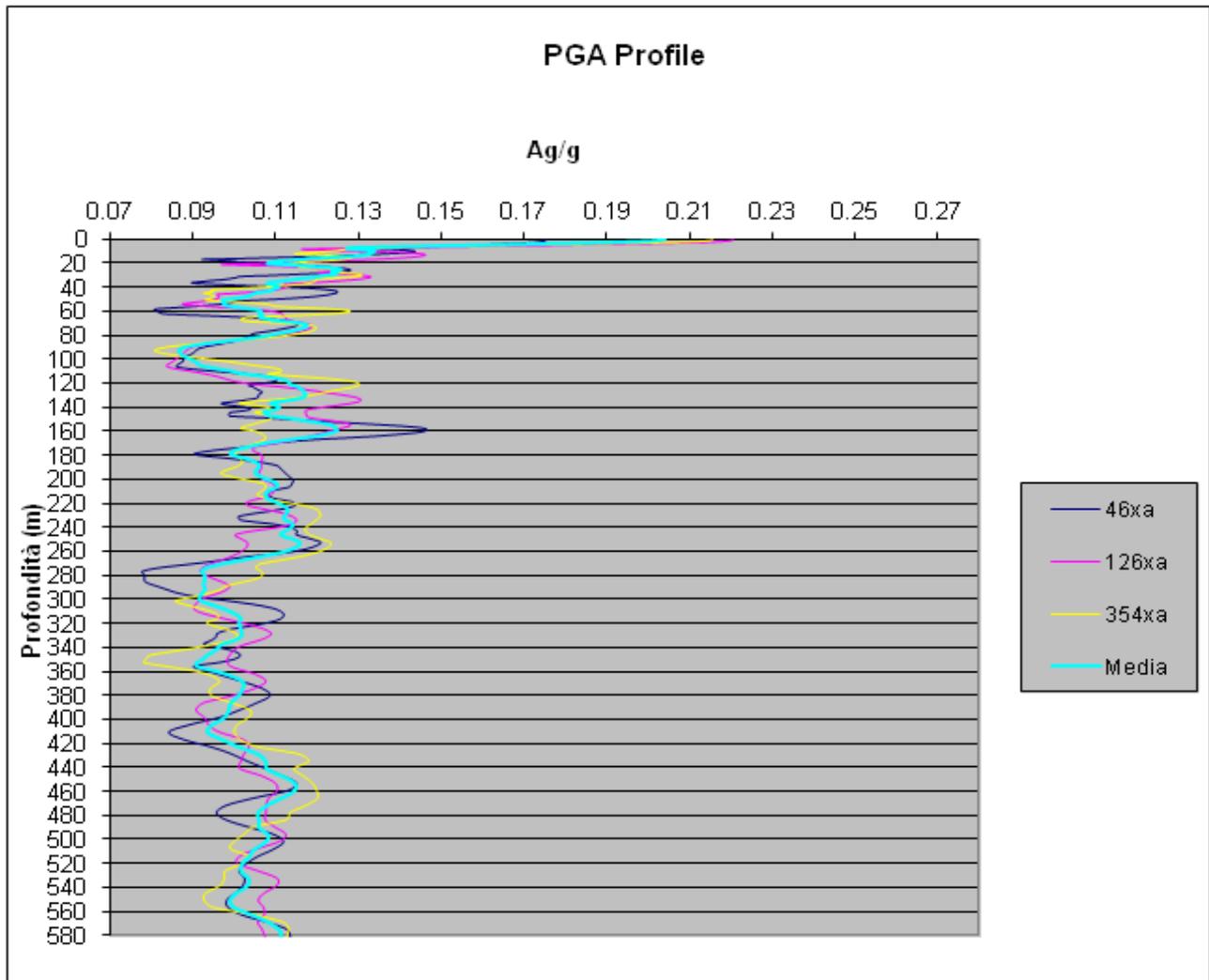
AREA-13\_CPTUS-085\_Bagnacavallo



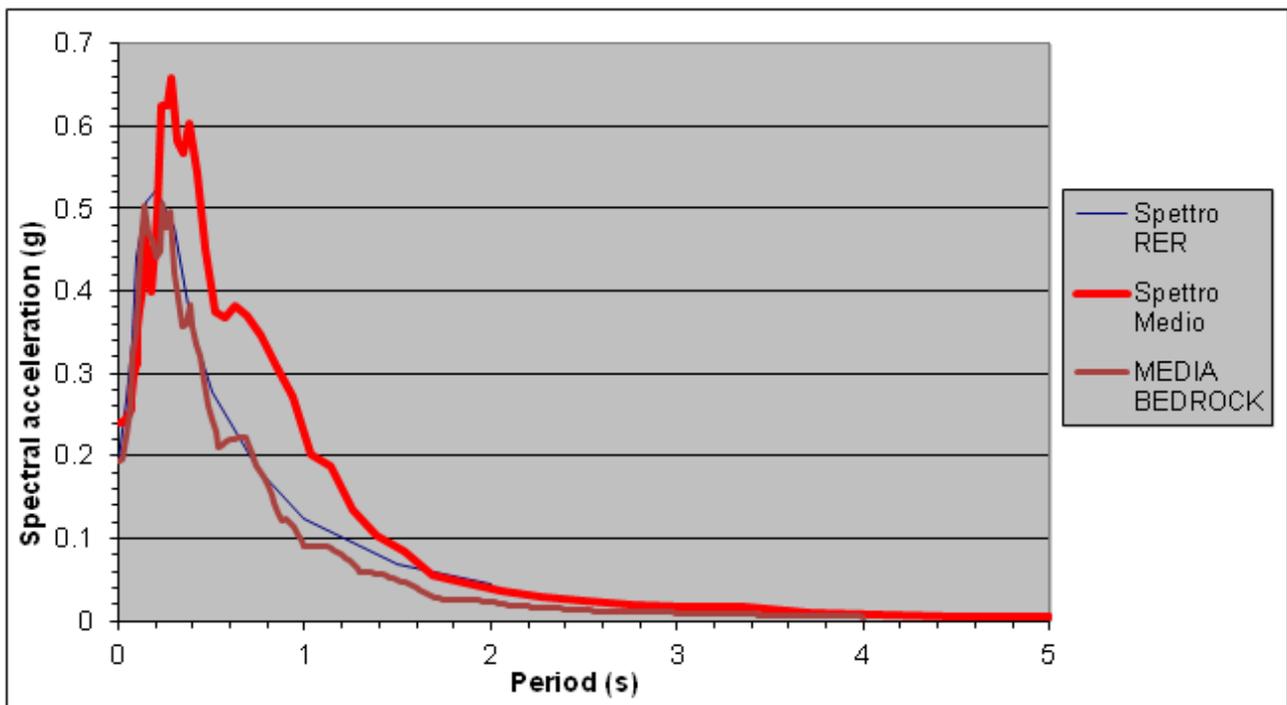
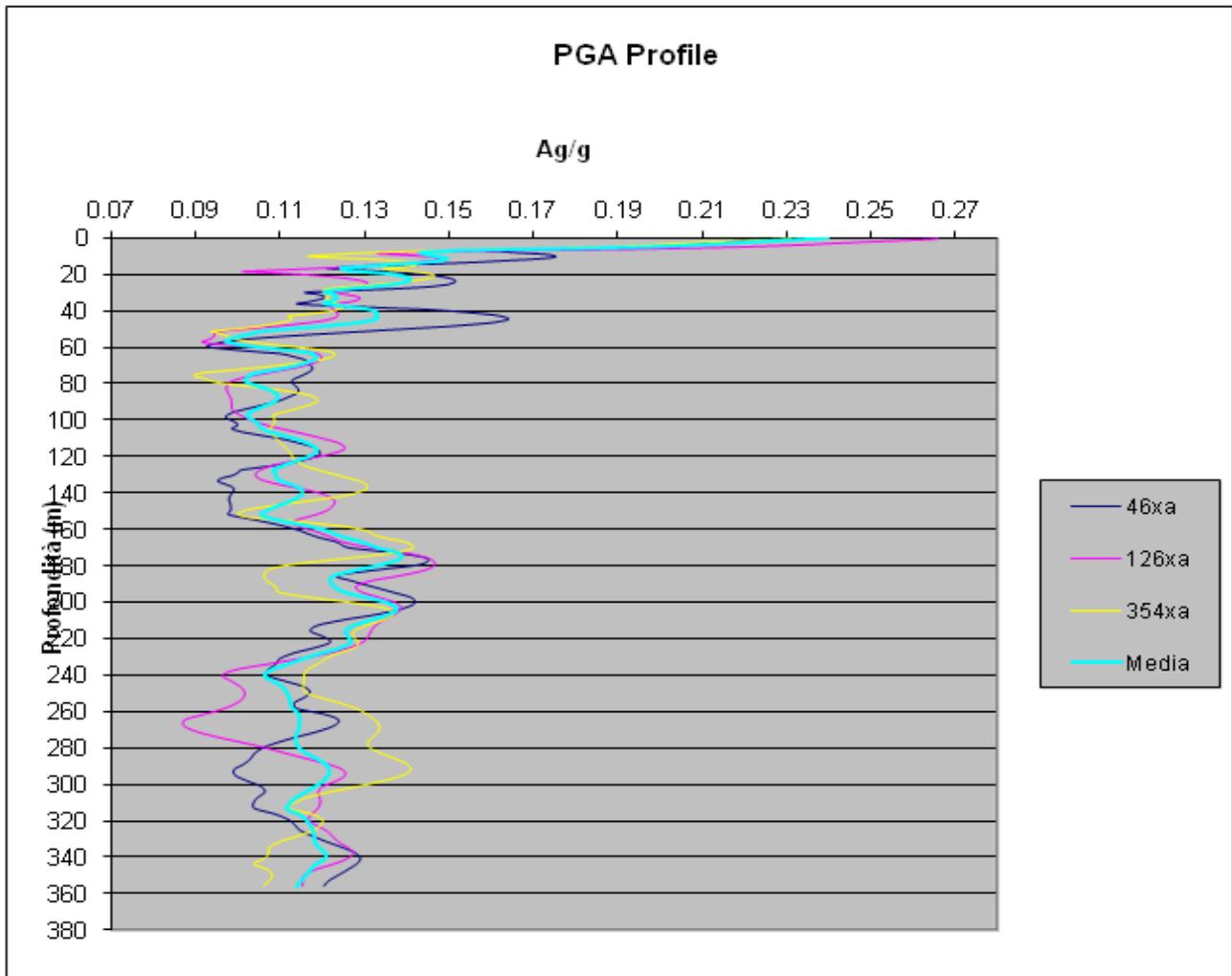
AREA-14\_CPTUS-071\_Bagnacavallo



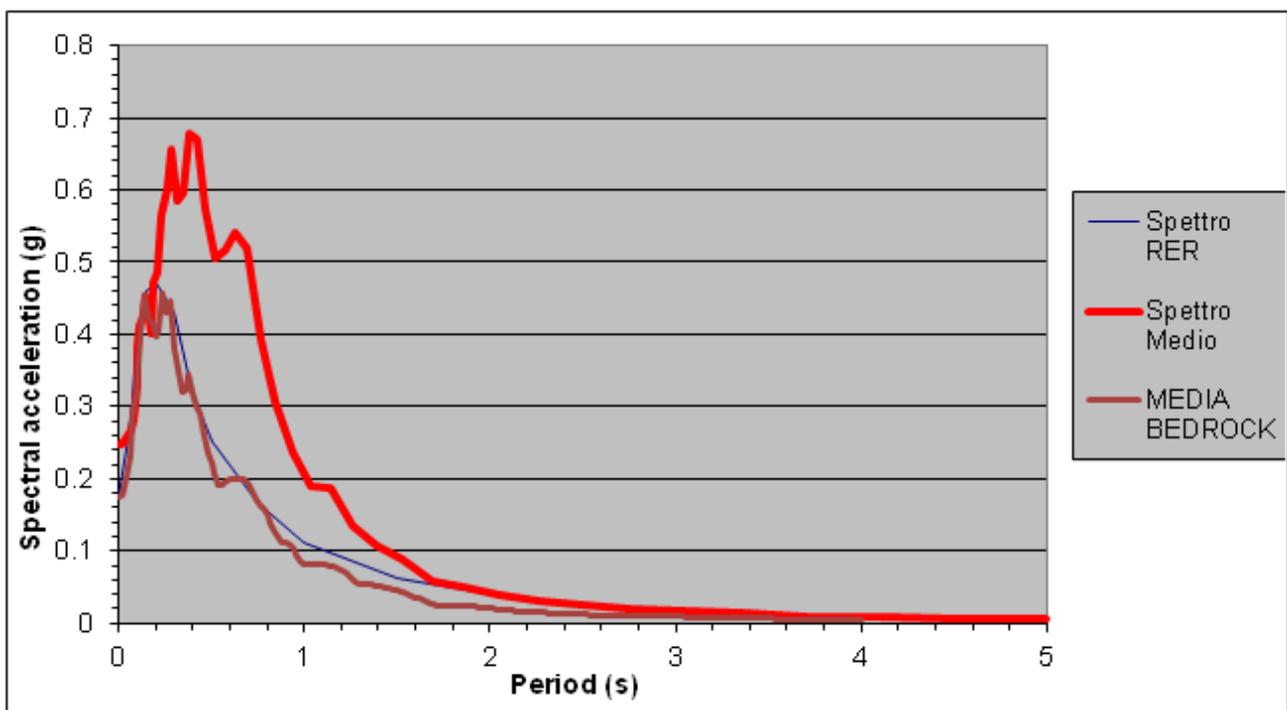
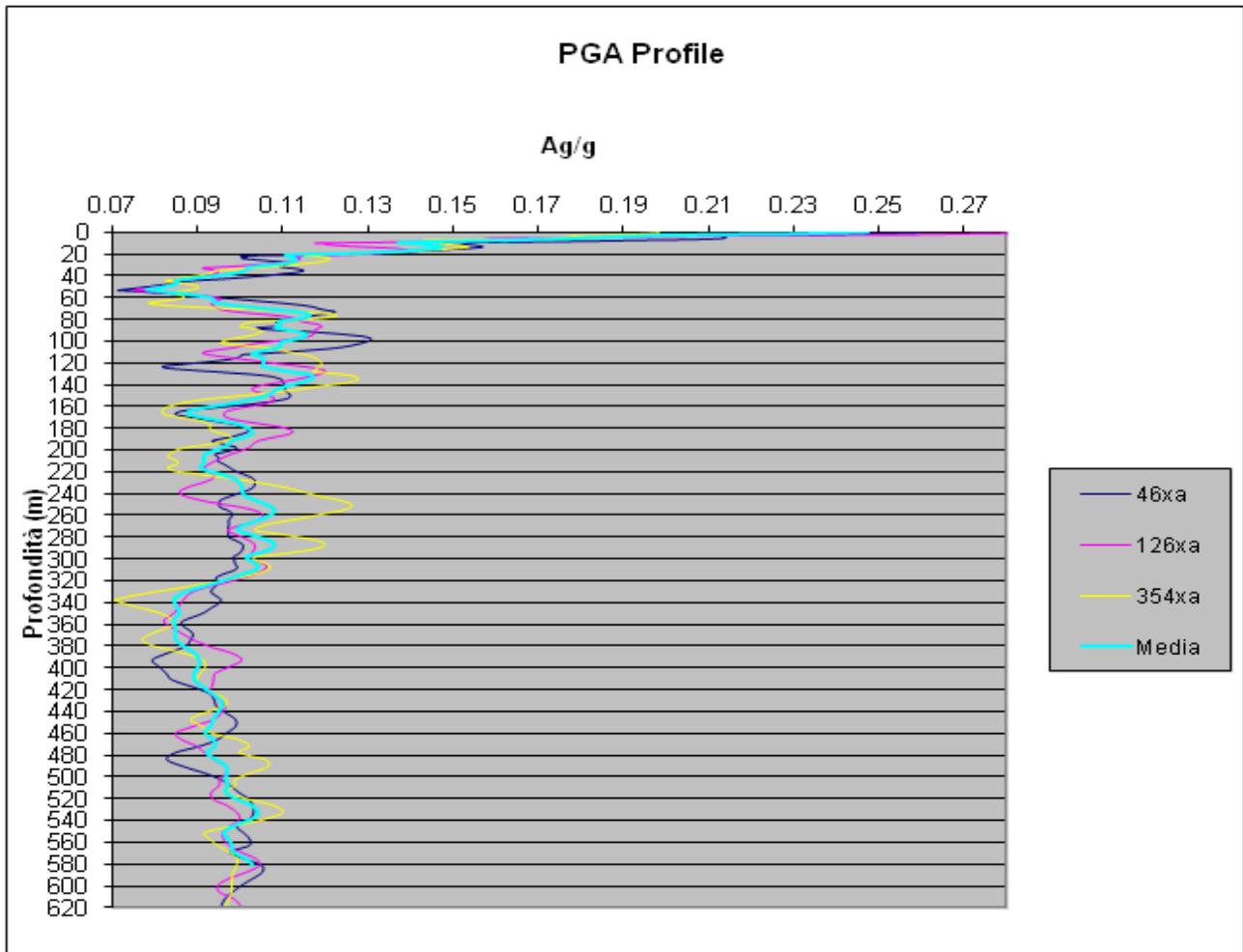
AREA-90\_CPTUS-205\_Bagnacavallo



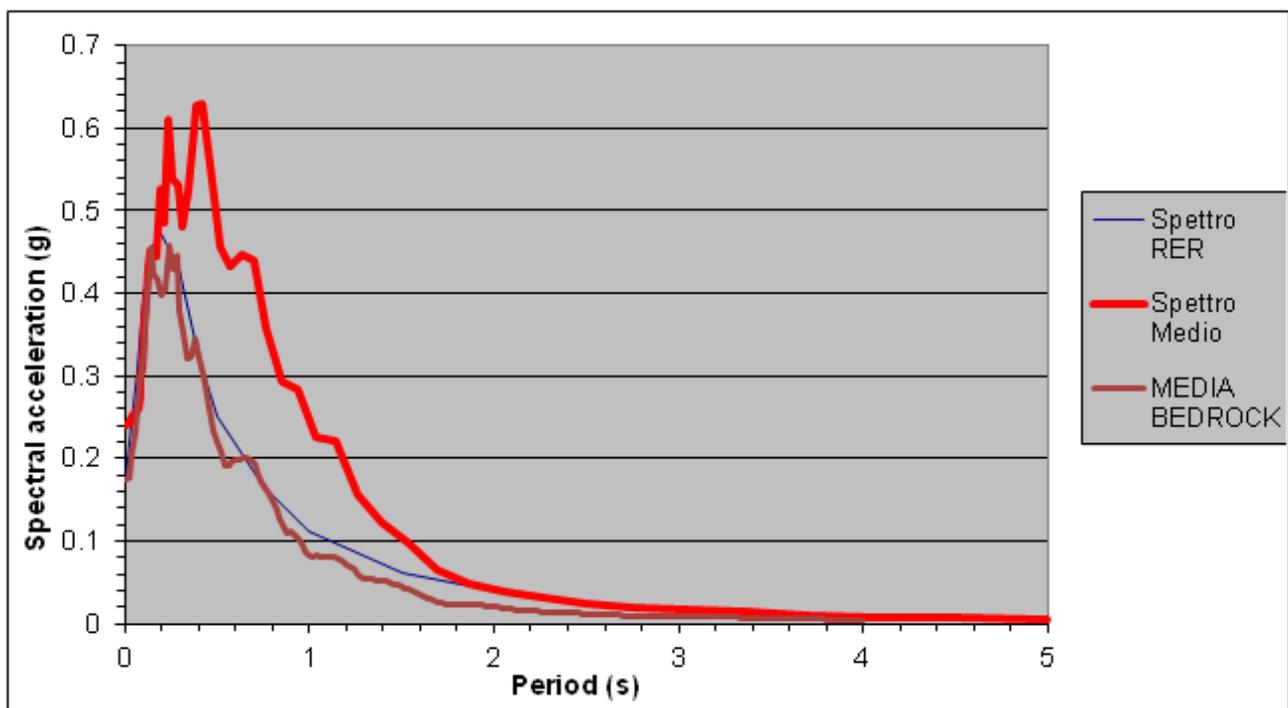
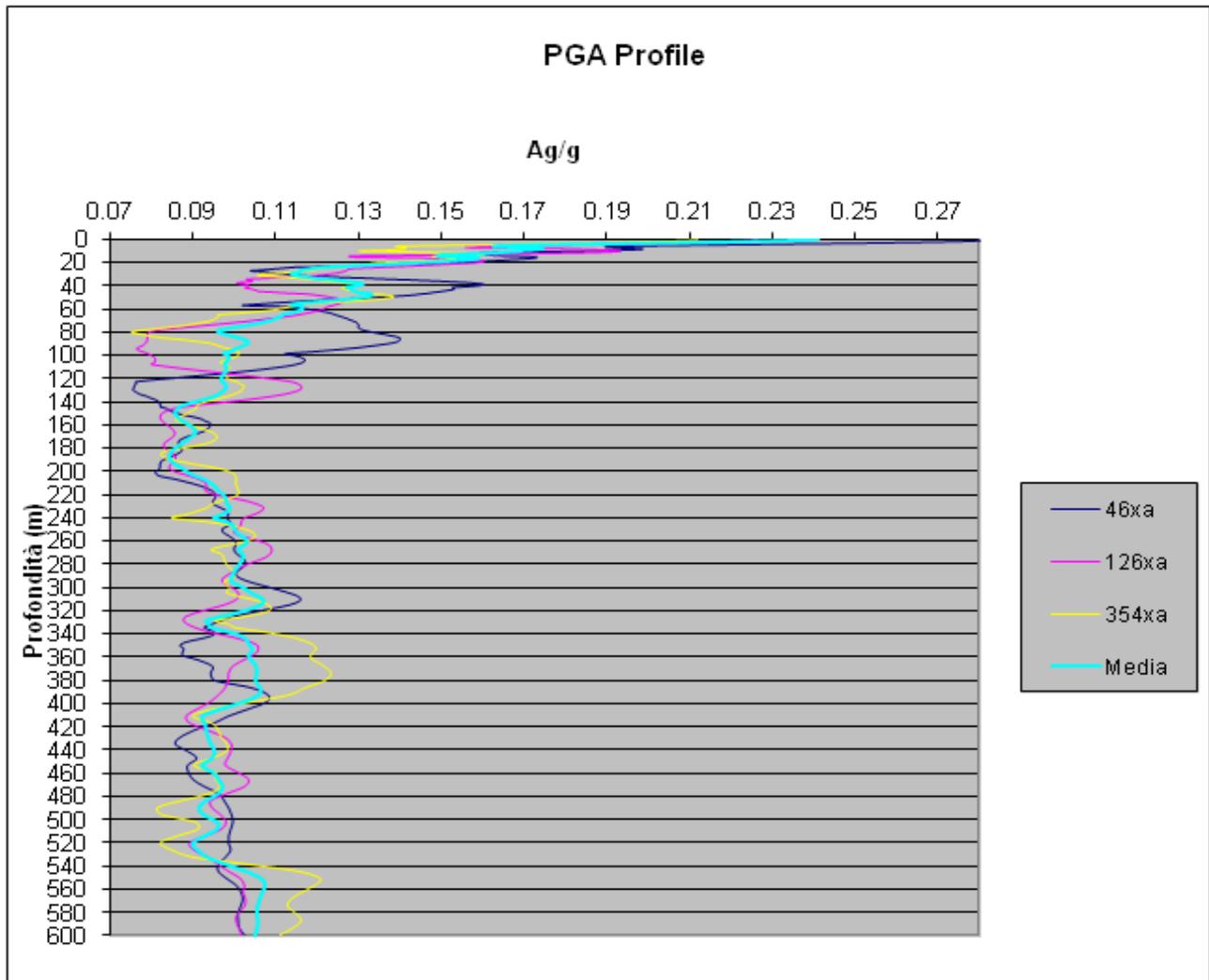
AREA-15\_CPTUS-007\_Bagnara



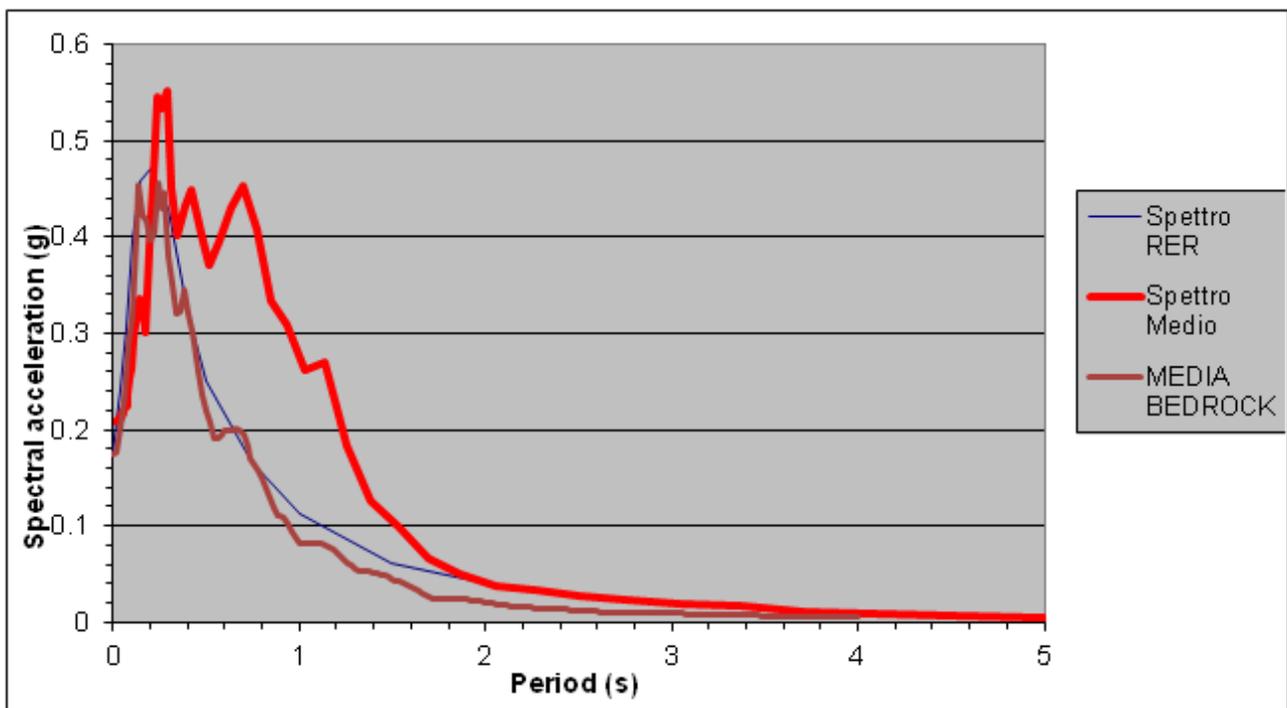
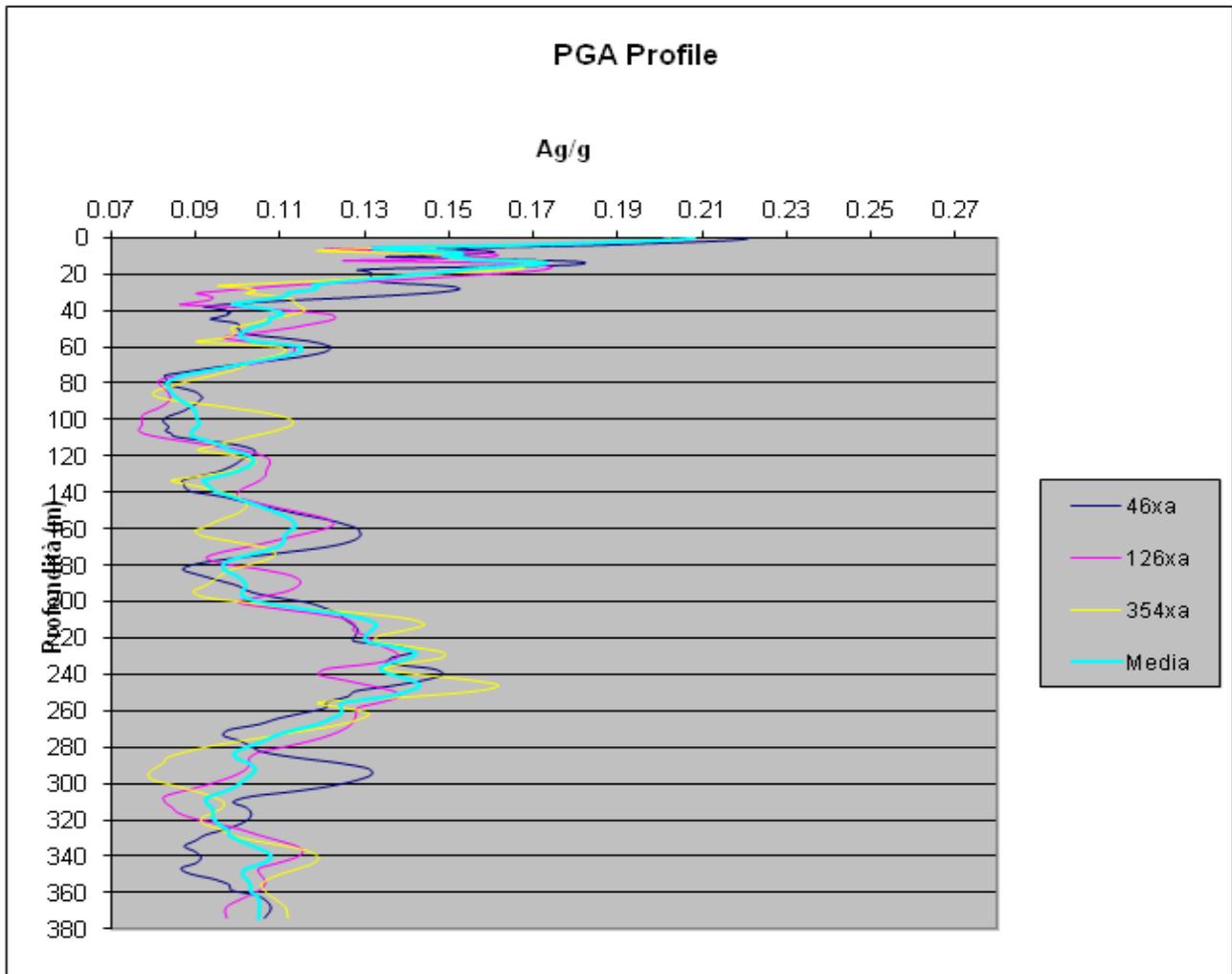
AREA-16\_CPTUS-156\_Conselice



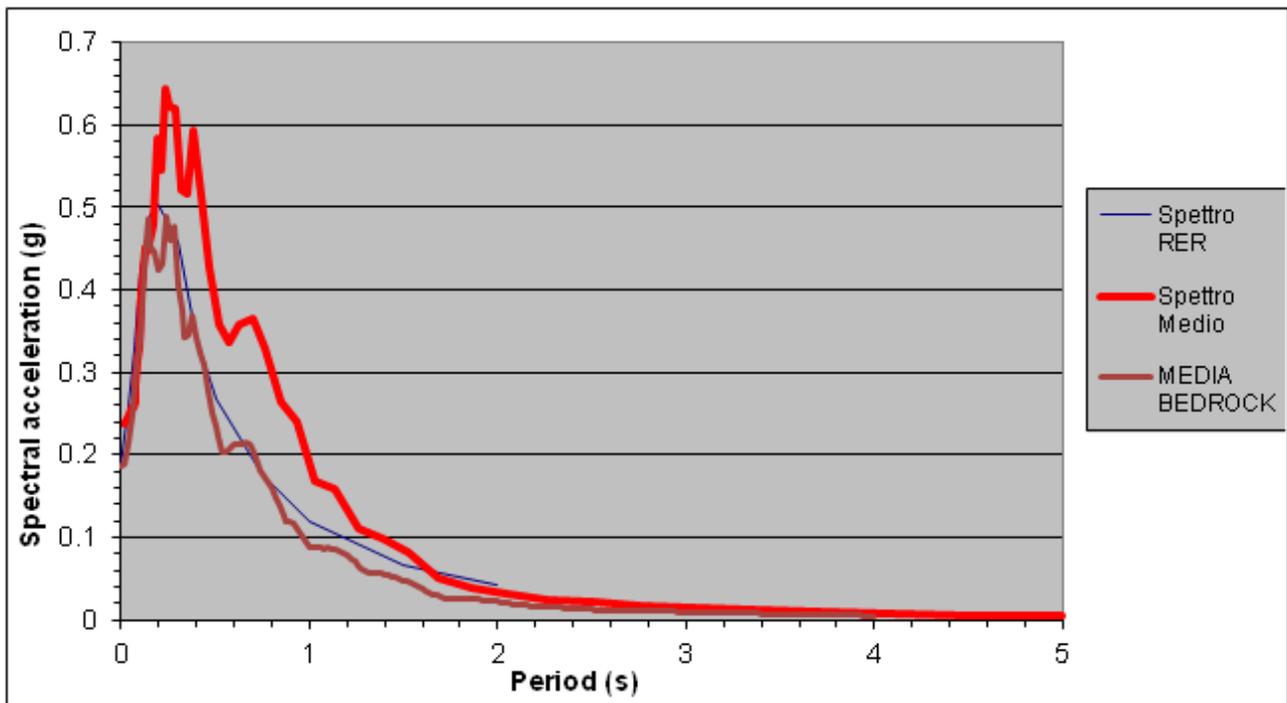
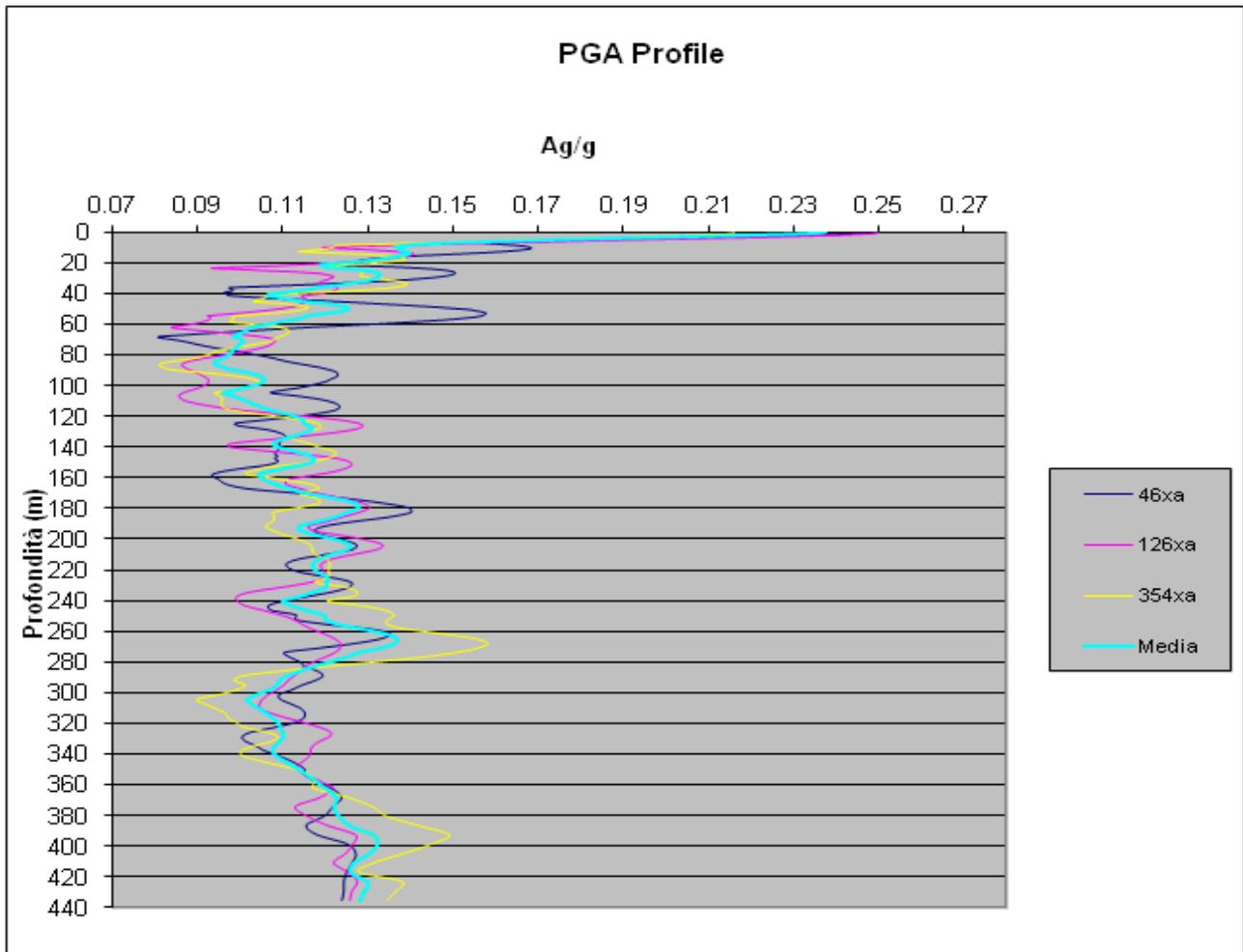
AREA-17\_CPTUS-161\_Conselice



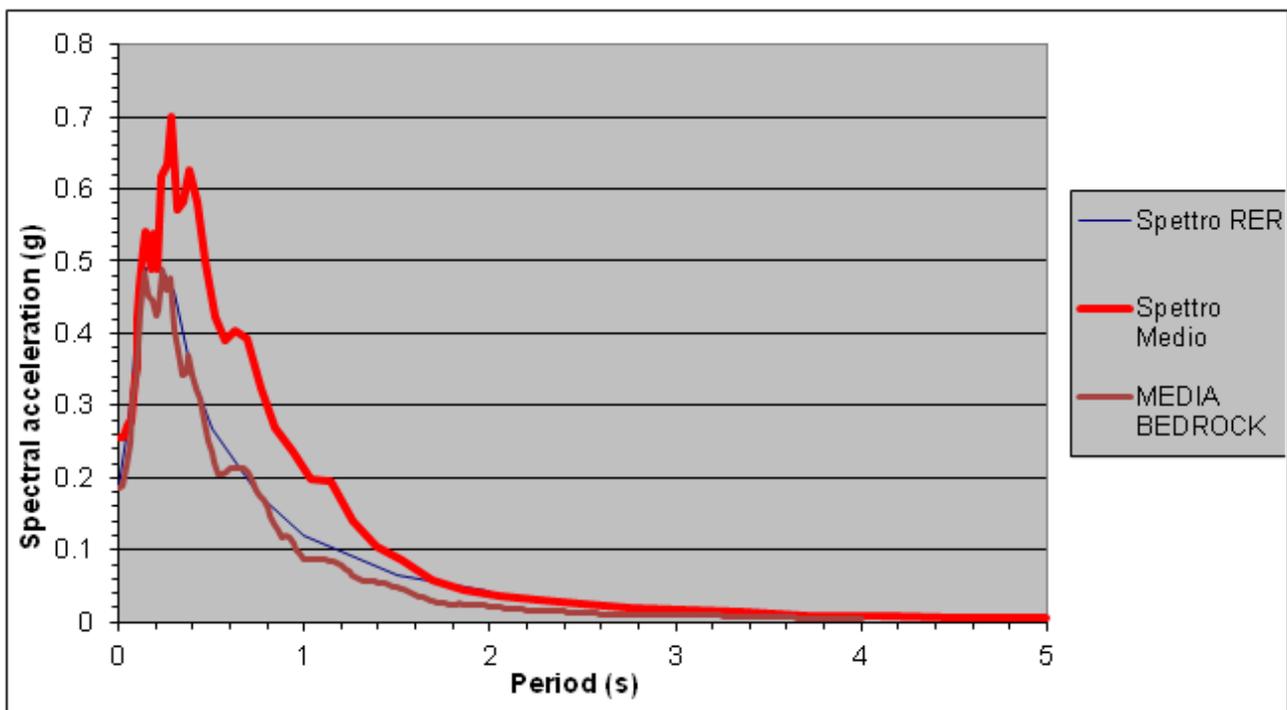
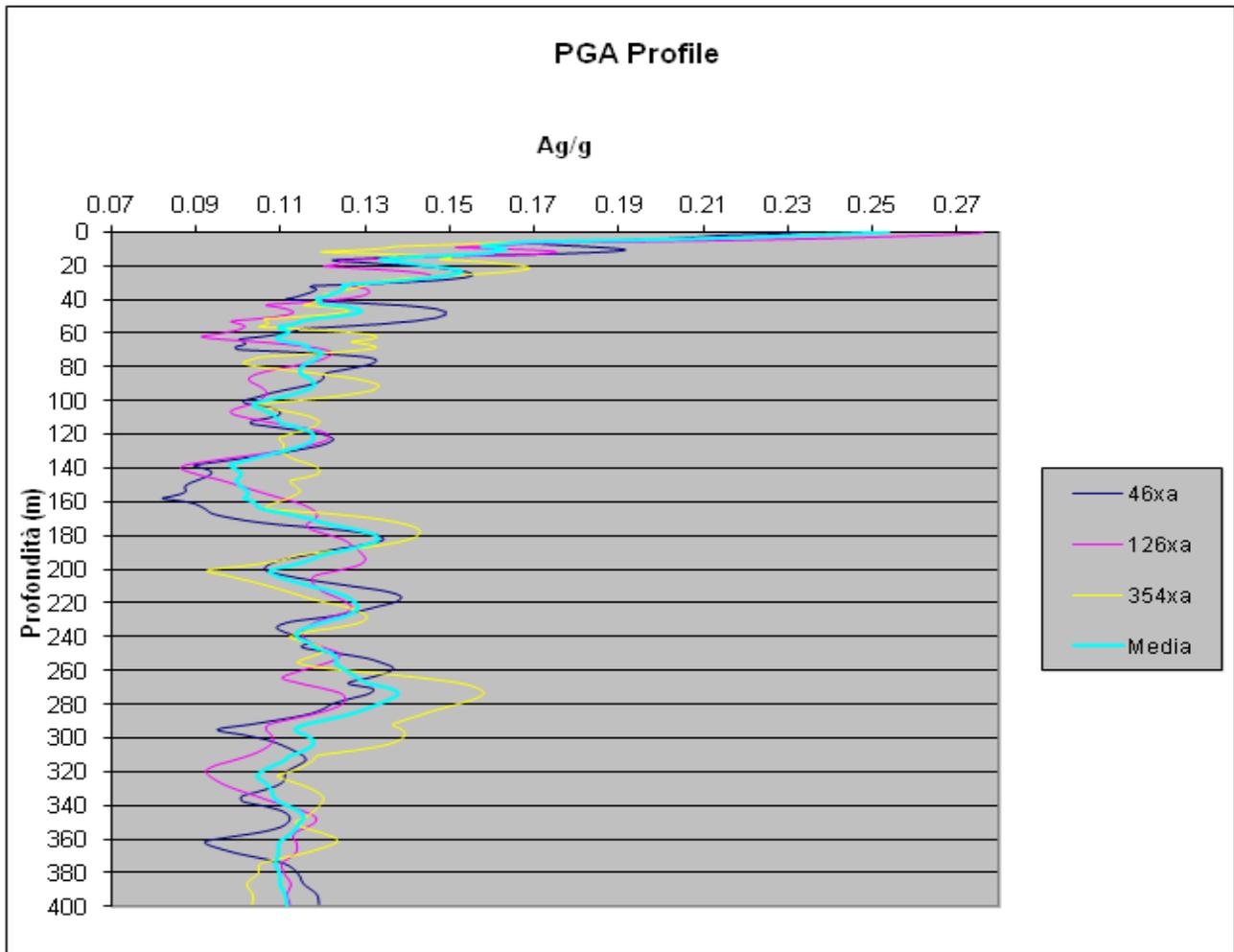
AREA-19\_CPTUS -137\_Conselice



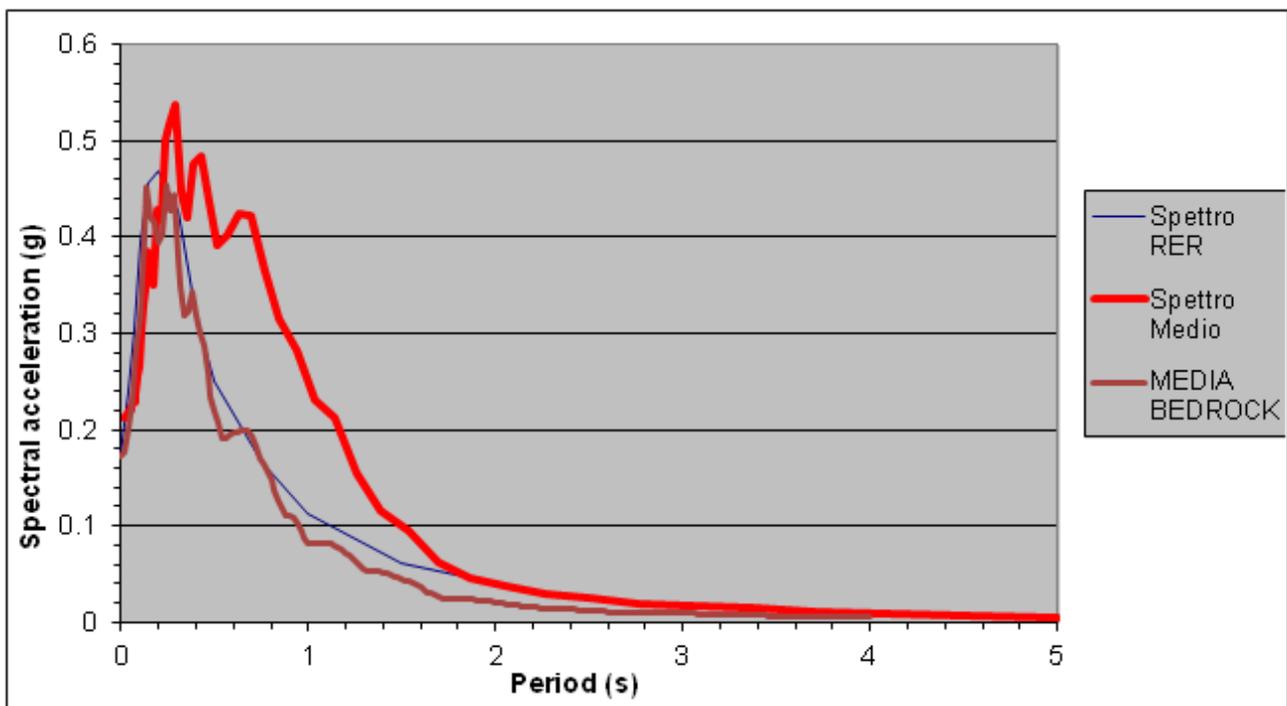
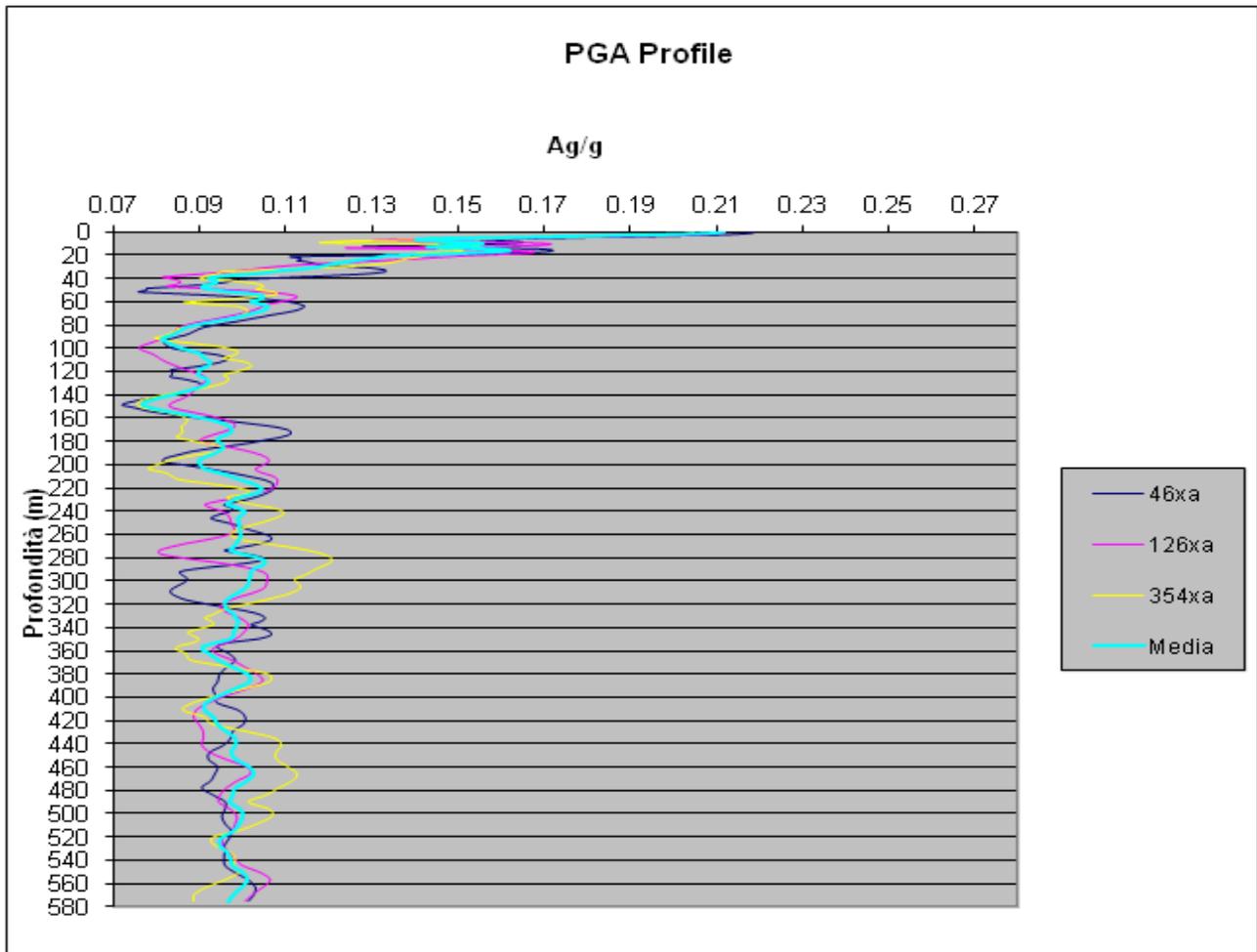
AREA-24\_CPTUS-012\_Cotignola



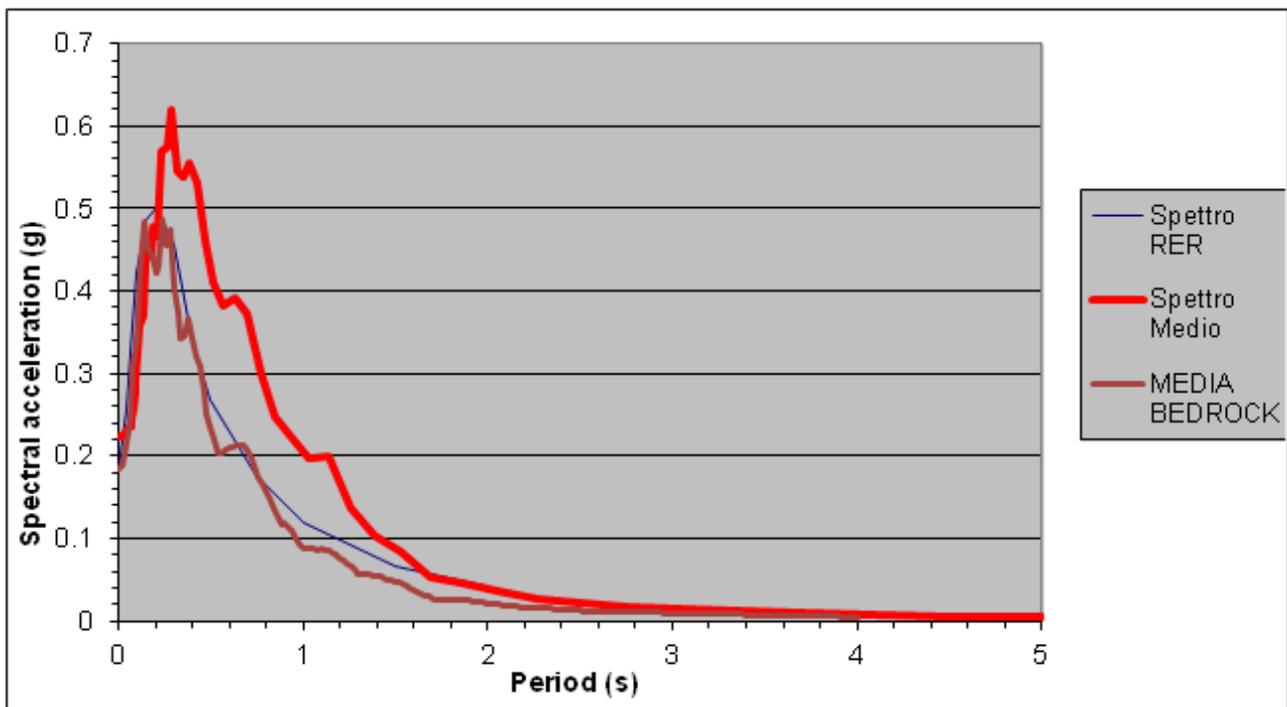
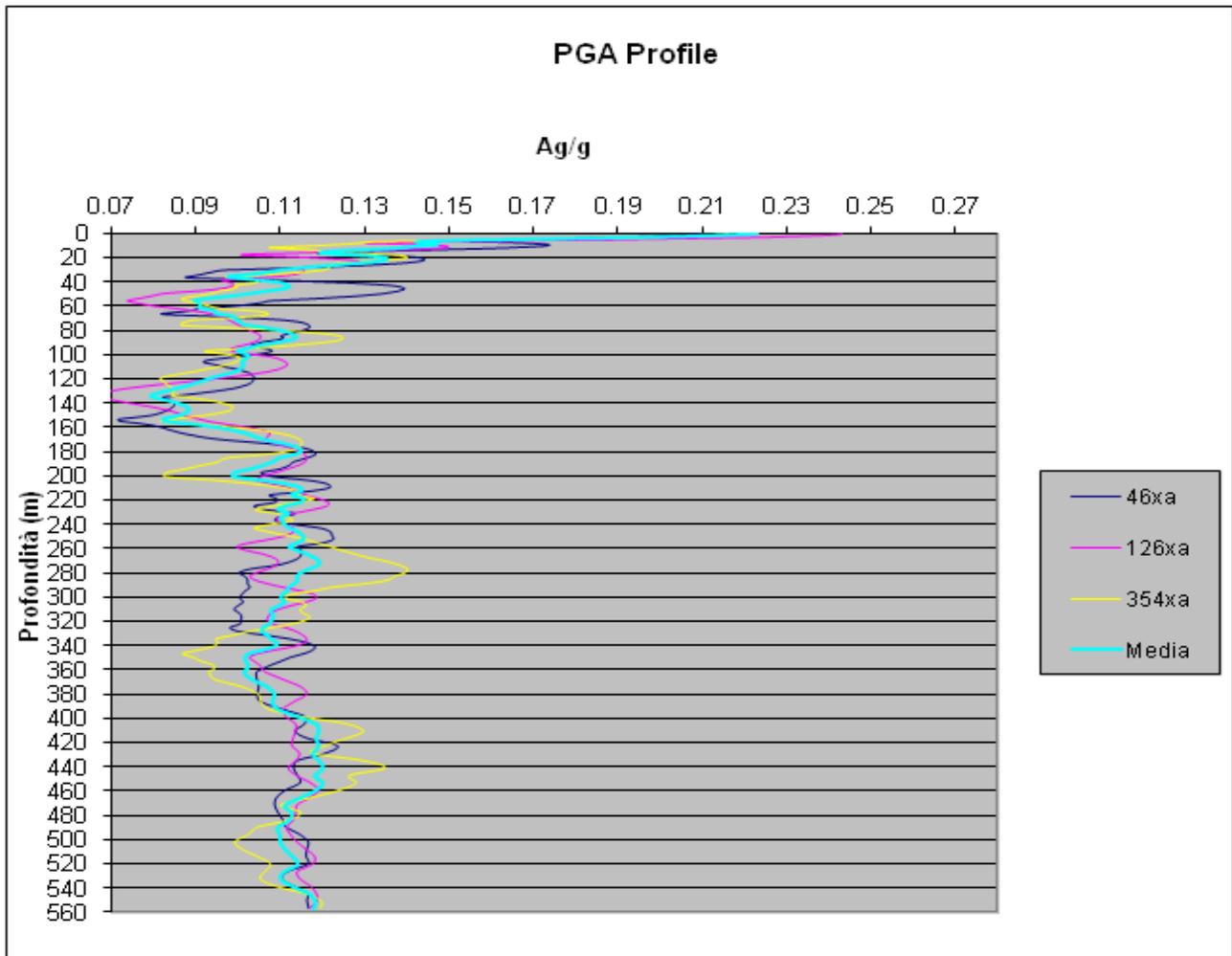
AREA-47\_CPTUS-020\_Cotignola



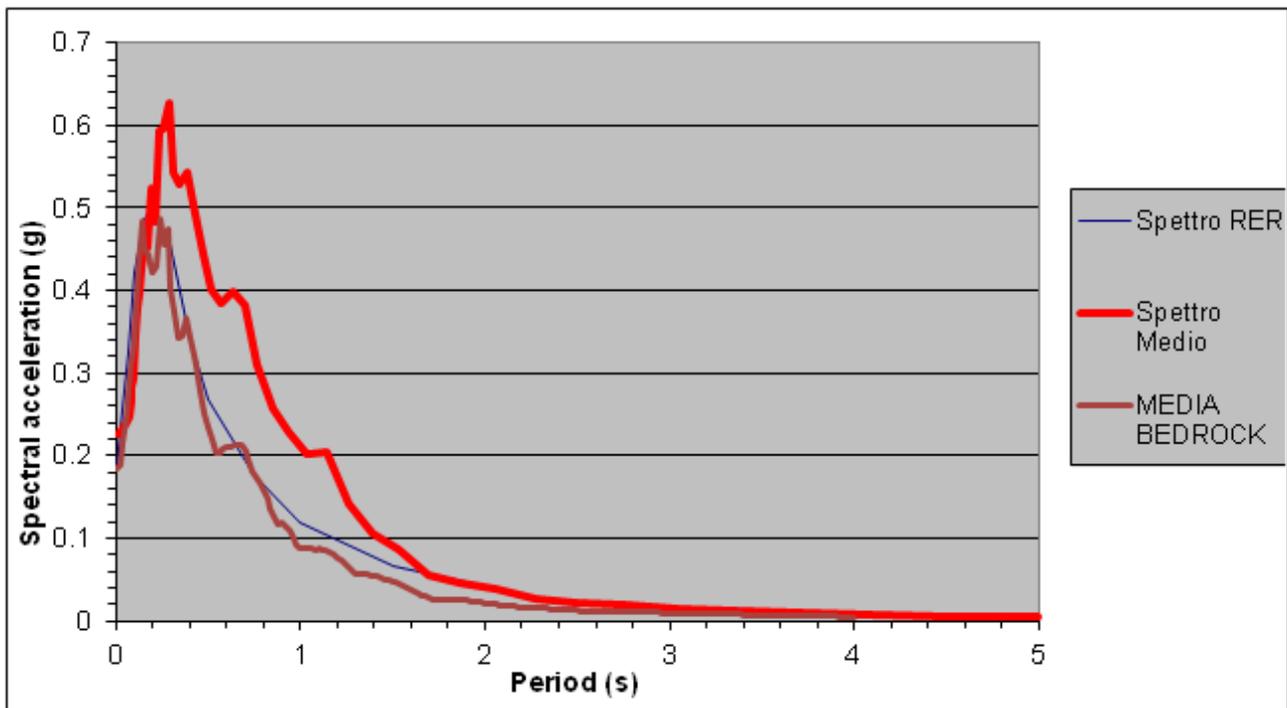
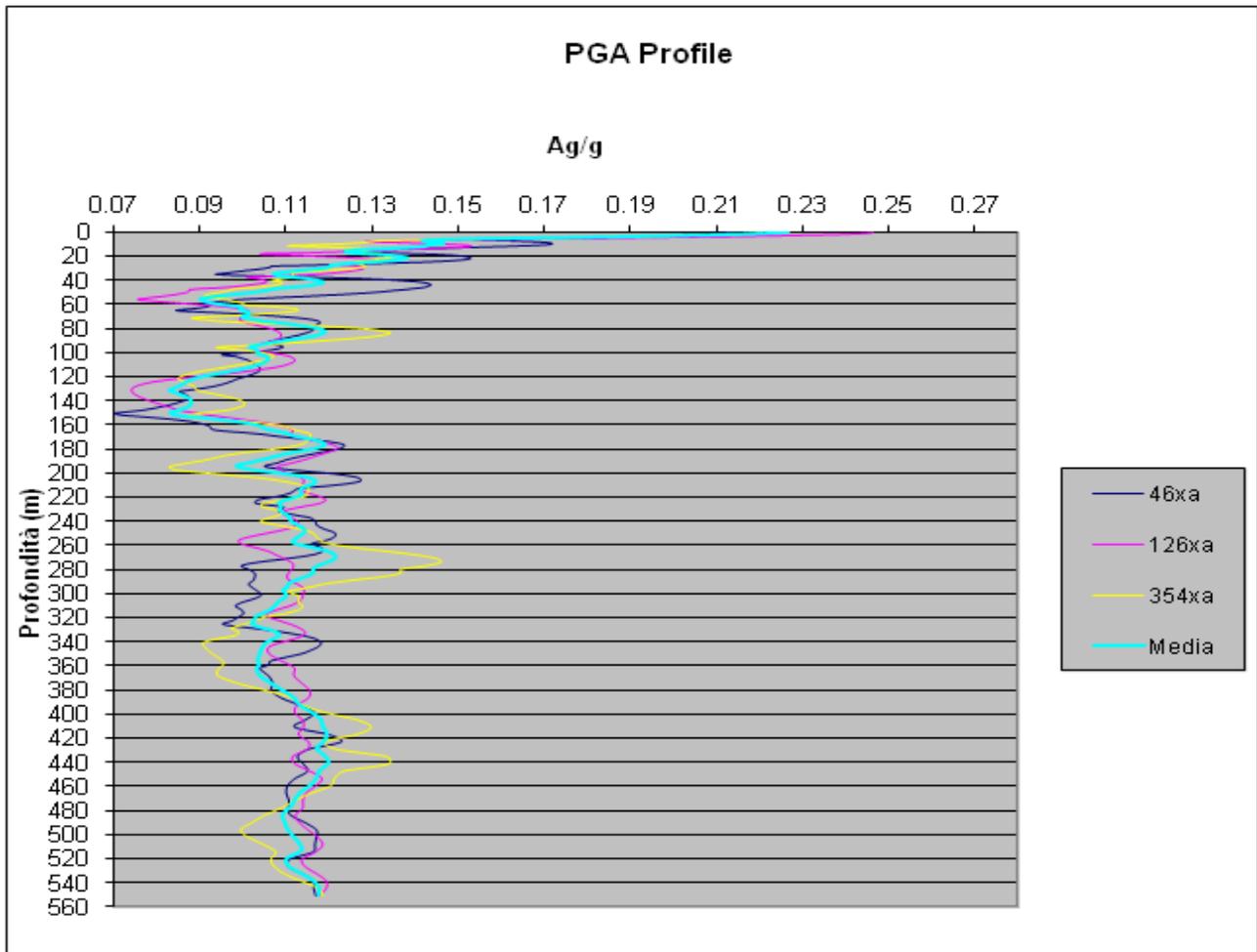
AREA-64\_DH-084\_Fusignano



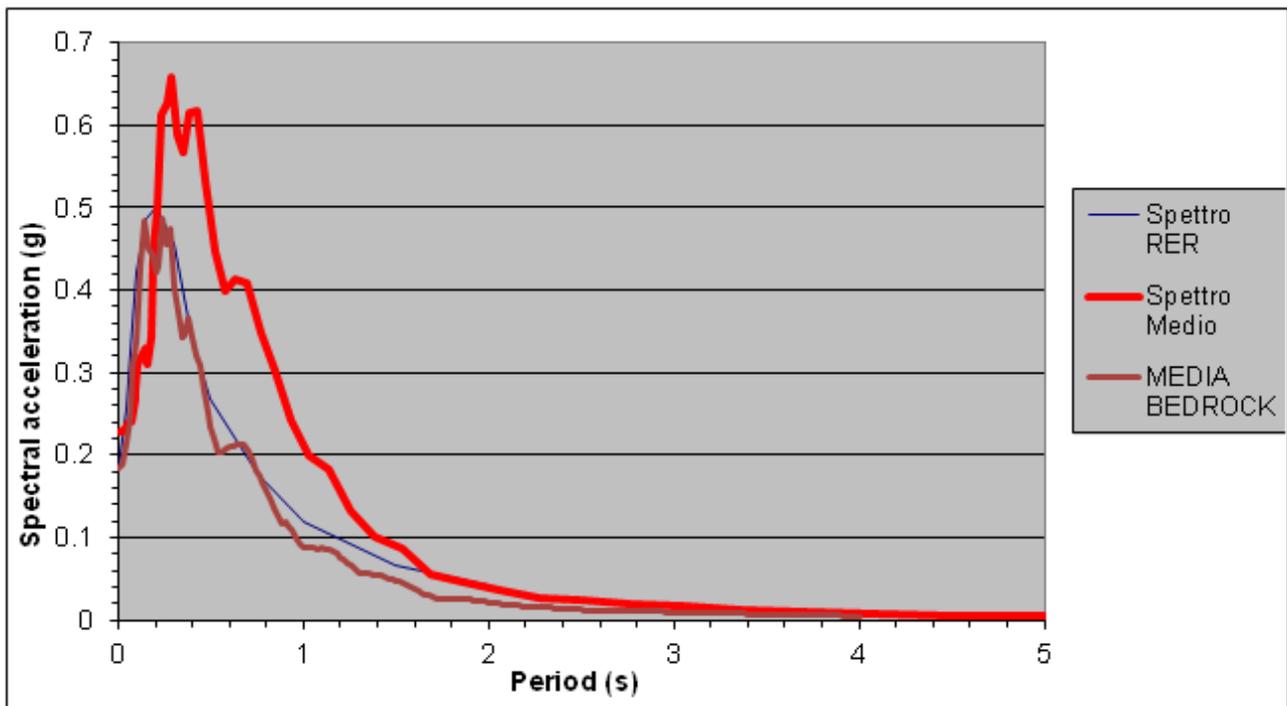
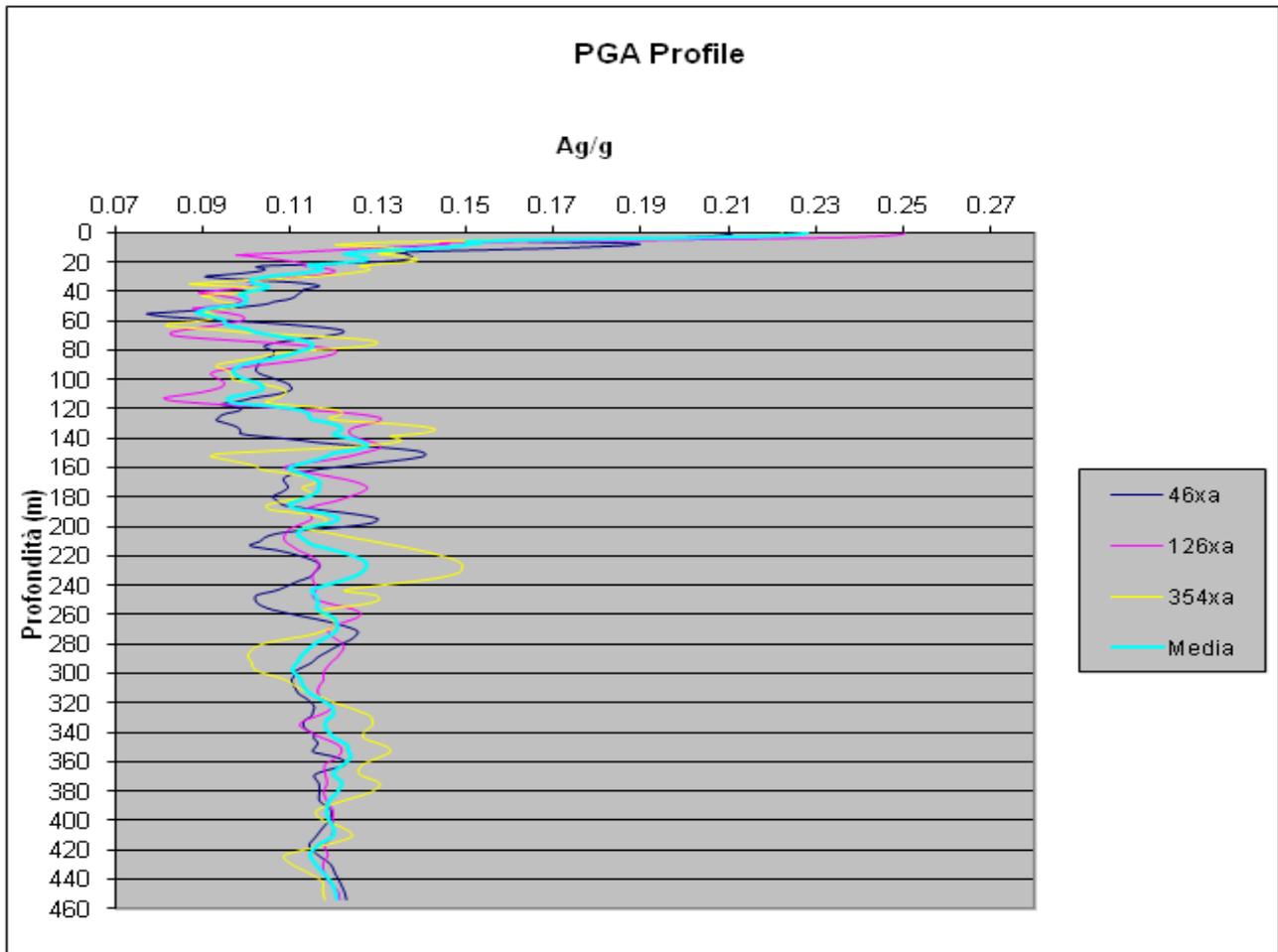
AREA-30\_DH-042\_Lugo



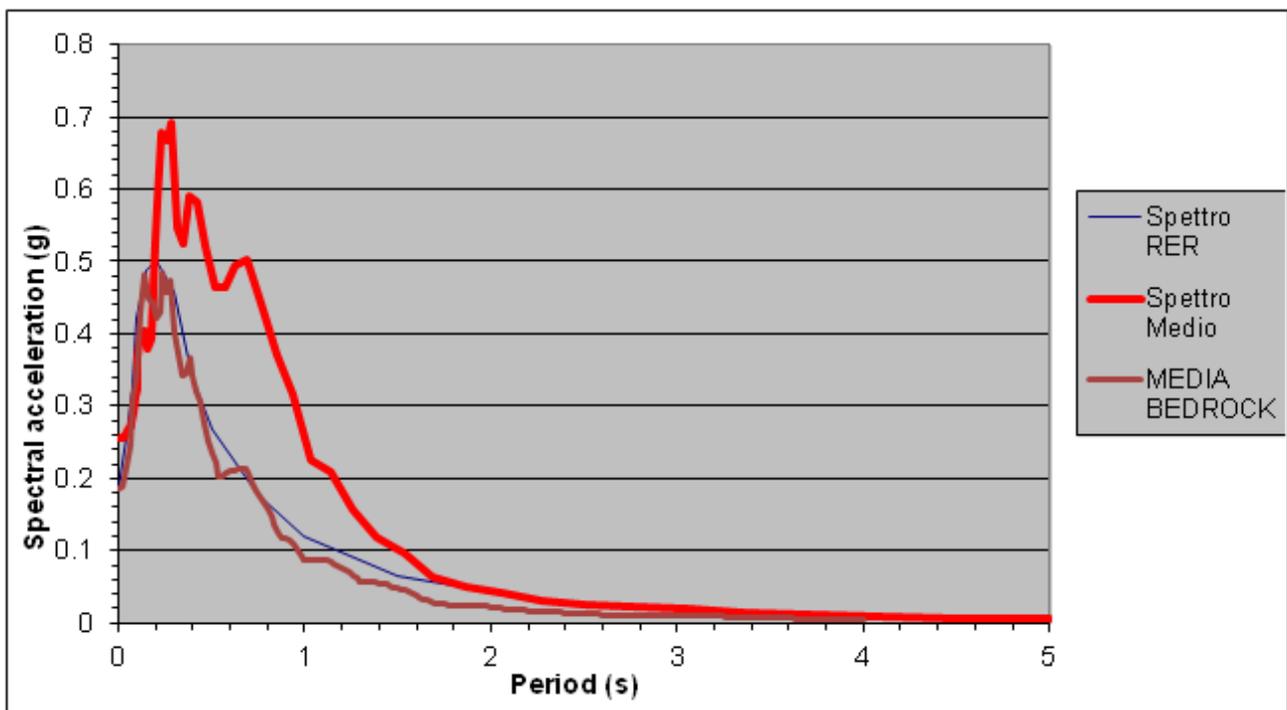
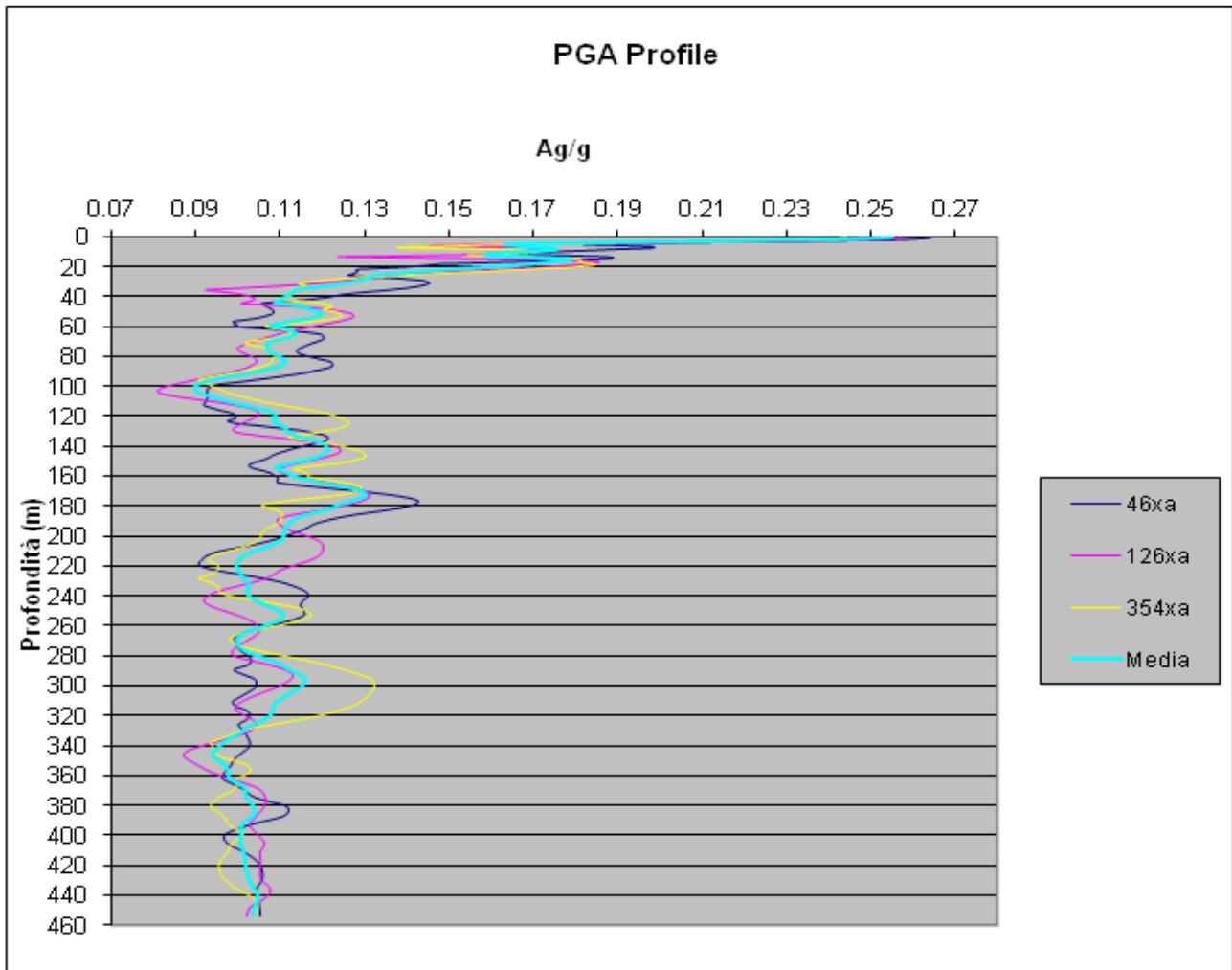
AREA-31\_CPTUS-037\_Lugo



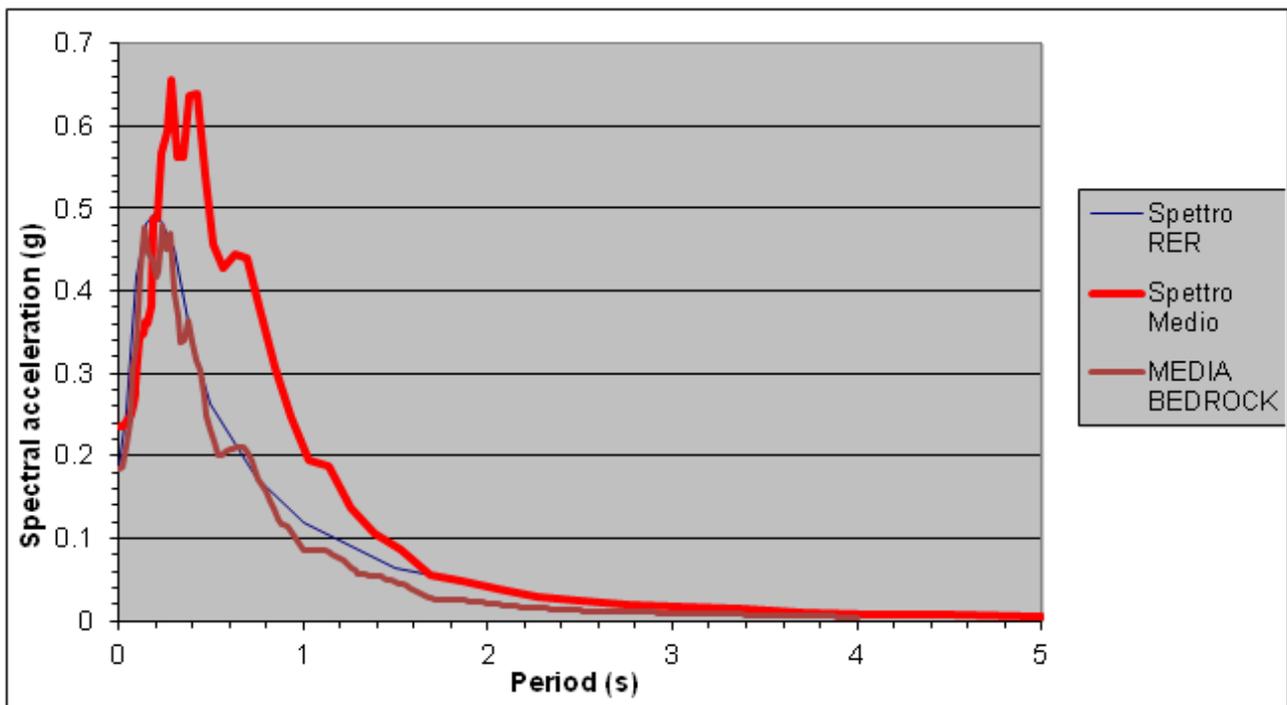
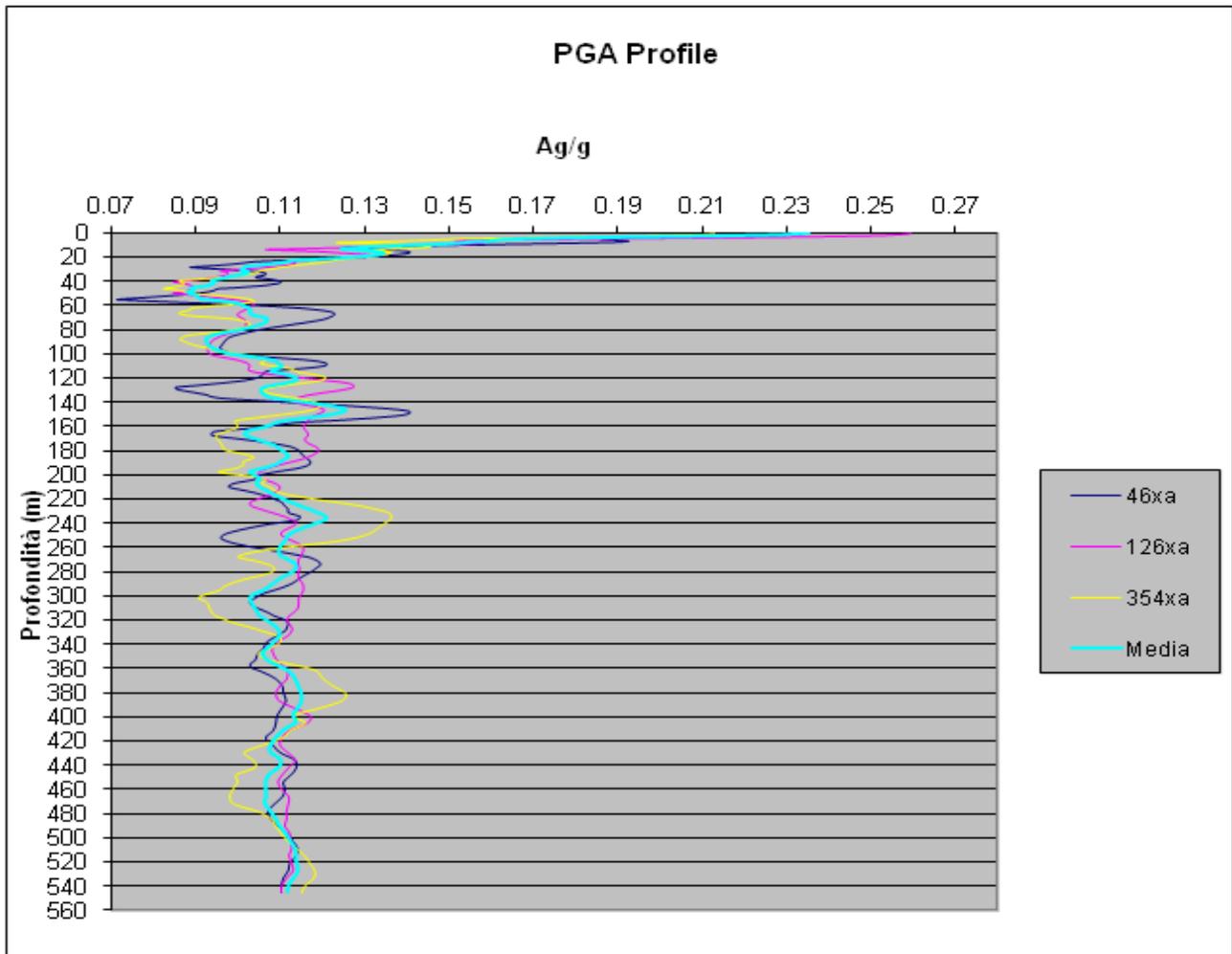
AREA-35\_CPTUS-167\_Lugo



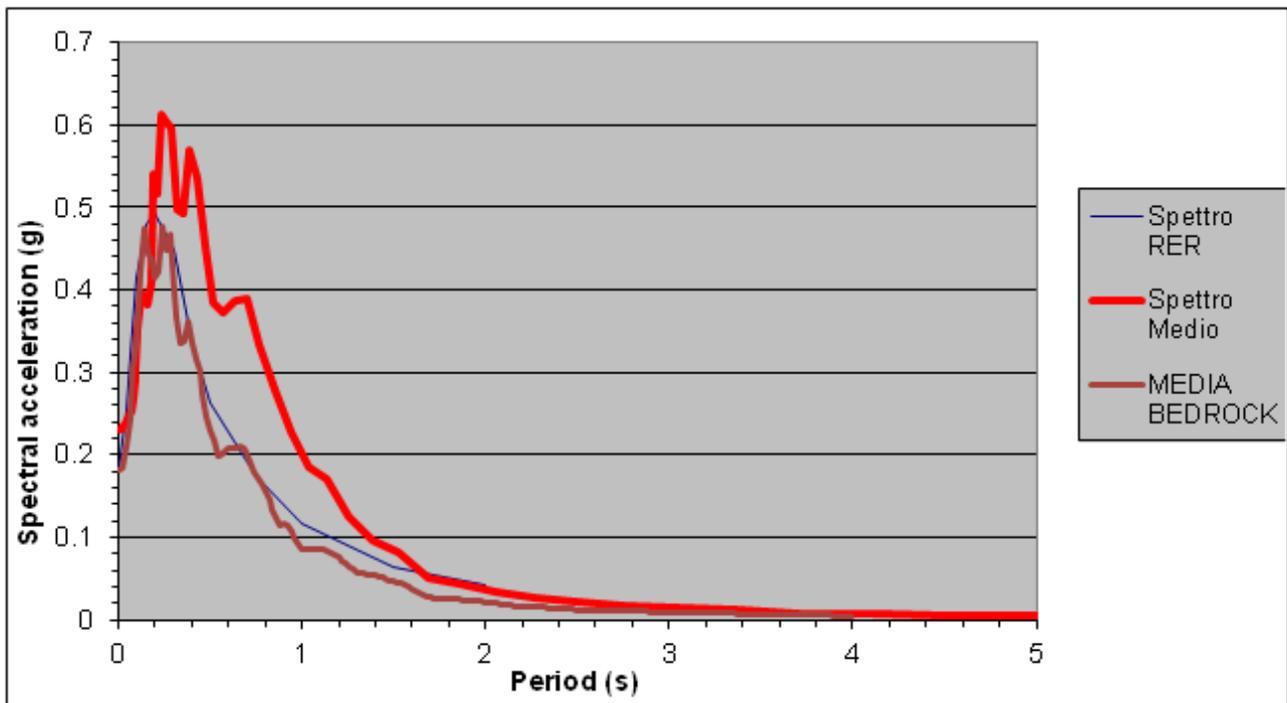
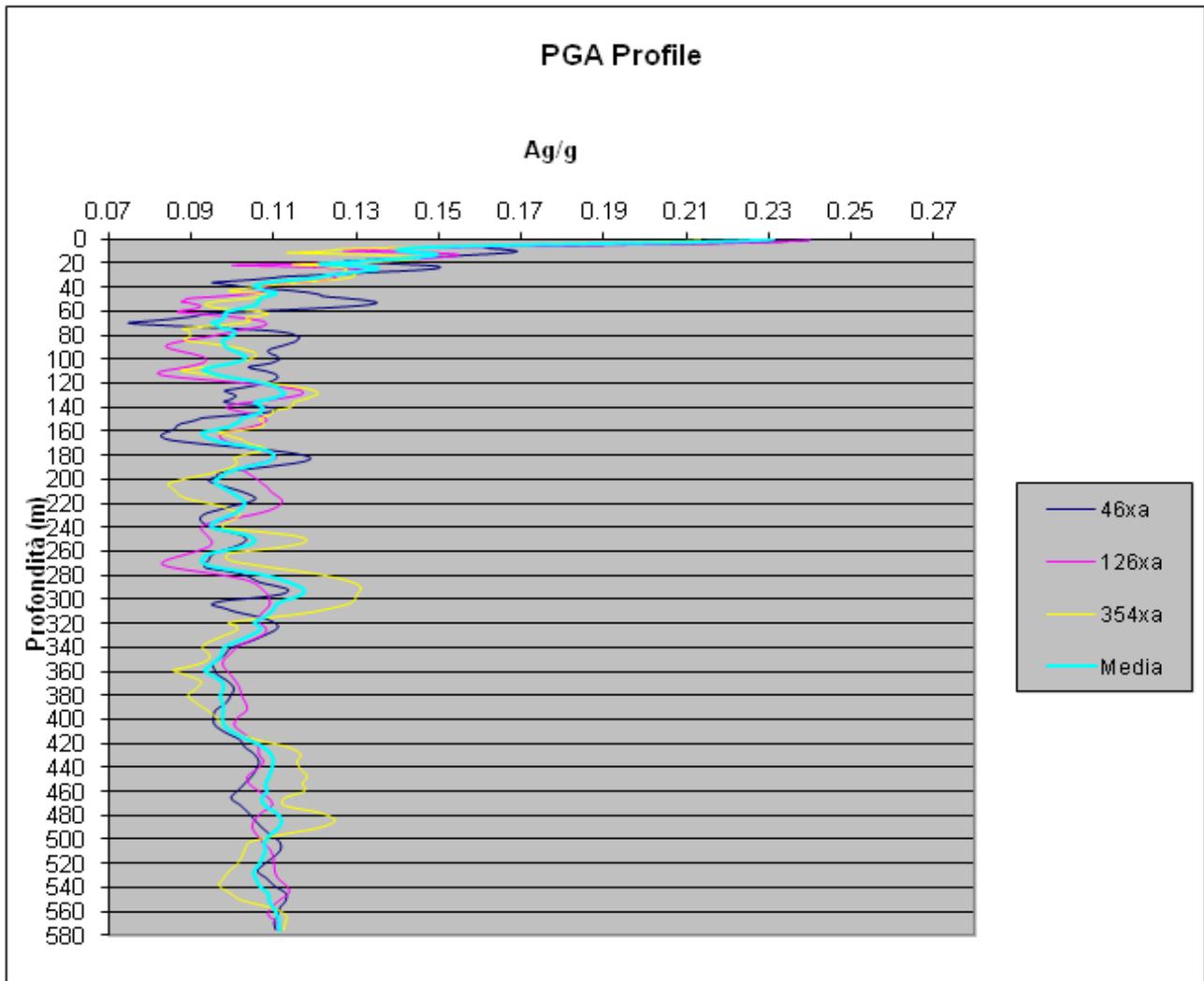
AREA-40\_CPTUS-128\_Lugo



AREA-92\_CPTUS-204\_Massa Lombarda



AREA-76\_CPTUS-178\_Sant'Agata



## **7.2. Potenziale di liquefazione**

### *7.2.1 Analisi di Laboratorio Ciclico e cicli equivalenti*

Al fine di definire con maggior dettaglio il potenziale di liquefazione dei terreni e poter calibrare al meglio le modalità di verifica semplificata tramite i metodi CPT, è stata condotta una campagna mirata di prove Triassiali cicliche finalizzate alla determinazione delle curve rappresentative “Stress Ratio - Numero di Cicli”. In tali test il provino (saturato e consolidato alla tensione efficace standard di 100 kpa) è stato sottoposto a carichi ciclici prestabiliti e la prova è stata protratta fino al raggiungimento della liquefazione. La soglia di innesco della liquefazione è stata considerata pari alla deformazione massima del 5% in doppia ampiezza, soglia generalmente utilizzata dagli autori anche per la calibrazione dei parametri e metodi semplificati; inoltre l’utilizzo di tale soglia consente un raffronto con buona parte dei dati derivanti da prove TRX cicliche reperibili in letteratura.

In particolare sono stati testati n. 5 campioni di terreno differenti, per un totale di 22 provini, di cui 4 provini sono stati analizzati in condizioni indisturbate, mentre i restanti sono stati preliminarmente ricostruiti.

Onde consentire la migliore interpretazione dei dati acquisiti e dei risultati complessivi anche i provini indisturbati appartenenti al campione DH103\_CI4, a termine prova, sono stati ri-testati ricostituendoli con la medesima tecnica di deposizione pluviale e addensamento. Ciò ha consentito di valutare al meglio le differenze di comportamento e di resistenza ciclica attesa in funzione delle varie distribuzioni granulometriche (D50 e fine content), densità relativa, plasticità della parte fine, nonché del grado di resistenza addizionale, tra medesimi terreni indisturbati e ricostruiti, sostanzialmente imputabile alla struttura e storia tensionale naturale del terreno.

In particolare tutti i campioni sono contraddistinti da basse densità relative, mediamente non superiori a 35% e basso grado di sovraconsolidazione.

Le serie di curve CSR/Ncicli hanno permesso di definire un comportamento caratteristico proprio dei depositi incoerenti superficiali (entro i 20 m) presenti nell’area e caratterizzati rispettivamente da un FC mediamente pari a 10-20% e 30-35%, standardizzandolo ad una pressione di confinamento di 100 kpa (particolarmente rappresentativa per terreni fra 7-13 m).

I valori di CSR ottenuti in laboratorio sono stati poi ridotti per tenere in conto le condizioni di spinta a riposo ( $K_0$ ) esistenti in sito (funzione delle caratteristiche geotecniche dei terreni) ed i possibili effetti multidirezionali del sisma, utilizzando la formulazione proposta da Seed come consigliata anche in Idriss e Boulanger 2008 secondo cui:

$$CRR_{field} = 0.9 \left( \frac{1 + 2(K_0)_{field}}{3} \right) CRR_{TX}$$

In figura 7.4 è possibile visualizzare le curve finali. La curva “gialla” di resistenza DH084\_CI2 può essere ritenuta rappresentativa dei depositi incoerenti con  $25 \leq FC \leq 35\%$ , mentre la curva “verde” denominata

“MEDIA RIC”, che interpola (con un ottimo coefficiente di regressione  $R^2=0.92$ ) provini di diversa provenienza e comparabile contenuto in fine, rappresenta il comportamento stimato per i terreni incoerenti con un  $5 \leq FC \leq 20\%$ .

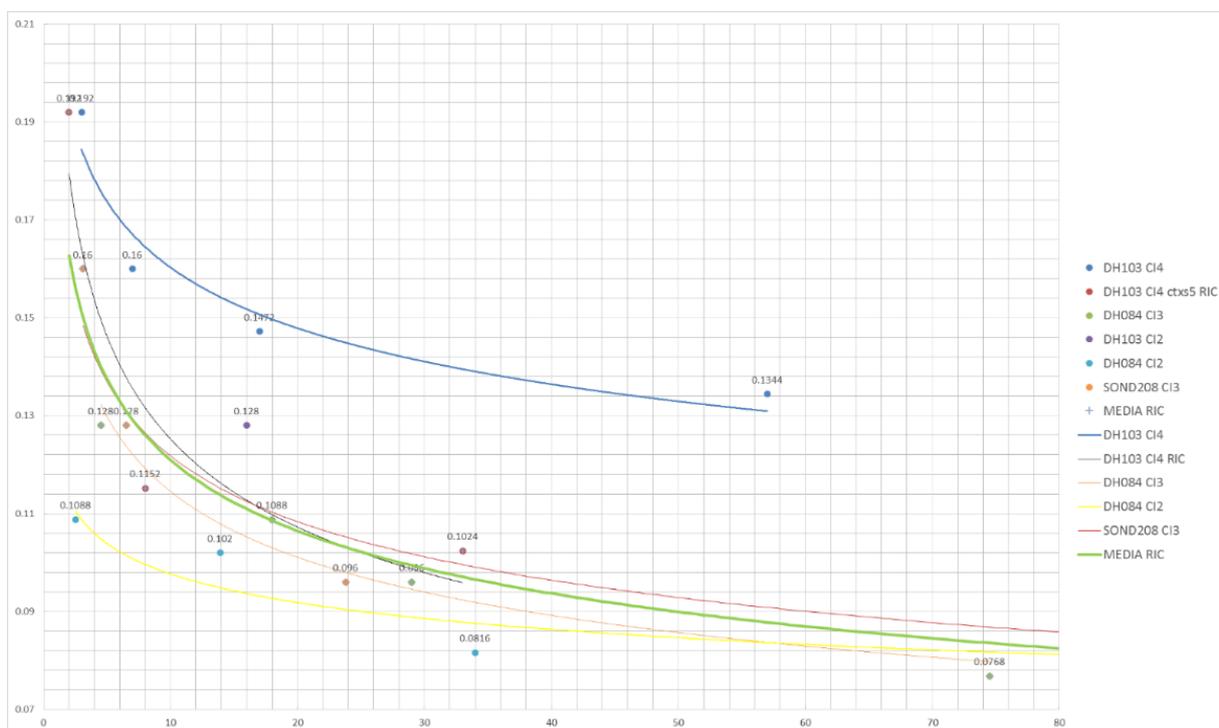


Figura 7.4-Risultati delle indagini Triassiali cicliche su differenti campioni.

Va rilevato che la curva dei terreni a maggiore FC per contro mostra un minore rapporto di resistenza ciclica, molto probabilmente imputabile al fatto che, congiuntamente alla bassa densità relativa, il contenuto in fine è caratterizzato da un significativo IP (>20%), in grado di influenzare il comportamento della matrice ed i meccanismi di accumulo delle sovrappressioni, in accordo con i recenti studi di Prakash et Al.1999 e Park e Kim 2013.

Per la “CURVA MED” il CSR a 15 cicli di riferimento risulta pari a  $CSR_{15}=0.112$  e il  $CSR_{max}=0.185$  (a 1 ciclo), mentre il parametro  $b=0.184$ .

E' possibile rilevare come la curva dei provini ricostituiti appartenenti al campione indisturbato DH103 CI4 risulti pressoché assimilabile agli altri campioni ricostituiti di pari FC (10%-14%) ed alla relativa curva media rappresentativa “MEDIA RIC”. Ciò indica come sussista un costante differenziale di resistenza di riserva tra campioni indisturbati e ricostituiti tale da considerare questi ultimi come rappresentativi di valori di resistenza ciclica di lower bound. Tale differenziale è chiaramente imputabile alla struttura del terreno naturale, fenomeni chimico-fisici e storia tensionale. Nell'ambito del numero di cicli di interesse (indicativamente tra 5 e 30) tale differenziale risulta sempre maggiore di un valore almeno pari al 15% (rispetto 1 provino isolato) e, generalmente, compreso tra il 25-40% (rispetto alla curva dei rimanenti 3 provini ind.).

Pertanto, considerato il numero, tipologia e distribuzione dei campioni, se il comportamento dei terreni a  $5 \leq FC \leq 20\%$  viene affidato alla curva media dei provini ricostituiti (comunque in modo conservativo), il valore di resistenza differenziale con i corrispondenti provini indisturbati si può configurare come un ulteriore fattore a favore di sicurezza pari a non meno di 1.15.

### 7.2.2 Stima dei cicli equivalenti “Neq”

Per utilizzare concretamente le curve di laboratorio ottenute dai TRX ciclici si è reso necessario determinare in via analitica quale fosse il numero di cicli equivalenti di riferimento per il problema in esame.

Gran parte delle formule di bibliografia consentono una tale stima, approssimata e preliminare, tramite relazioni basate principalmente su magnitudo e distanza epicentrale (Seed et Al. 1975/85-Haldar e Tang 1981 - Green 2001), in quanto il n. di cicli risulta sensibilmente condizionato dalle condizioni di propagazione (“near field” o “far field”); tuttavia altri metodi semplificati considerano anche altre informazioni quali direzionalità e/o profondità della superficie di rottura (Stafford Bommer 2009) e/o correzioni per lo specifico meccanismo di rottura (Liu et Al. 2001).

Tali metodi chiaramente portano a conclusioni spesso sensibilmente differenti cosicché, non potendo disporre in via preliminare di informazioni precise relative alle distanze e/o altri parametri sismogenetici, si è scelto di determinare in modo analitico Neq (N. cicli equivalenti) a partire dagli accelerogrammi di output delle analisi di RSL.

Allo scopo ci si avvalsi della metodologia semplificata proposta da Biondi et Al. 2012 (basata su parametri rappresentativi dell’accelerogramma), i quali hanno calibrato il loro metodo di stima anche sulla base di un ampio dataset di accelerogrammi relativi a terremoti italiani.

Per testare l’attendibilità in sito del metodo sono state condotte alcune verifiche a campione calcolando direttamente il Neq di alcuni accelerogrammi tramite il metodo di LEE e CHAN 1972 - Seed et Al 1975 (che, in ogni caso, risulta alla base delle metodologia proposta da Biondi et Al.) utilizzando i criteri e le curve di conversione derivate dalle analisi di laboratorio ciclico riportate in figura 7.5.

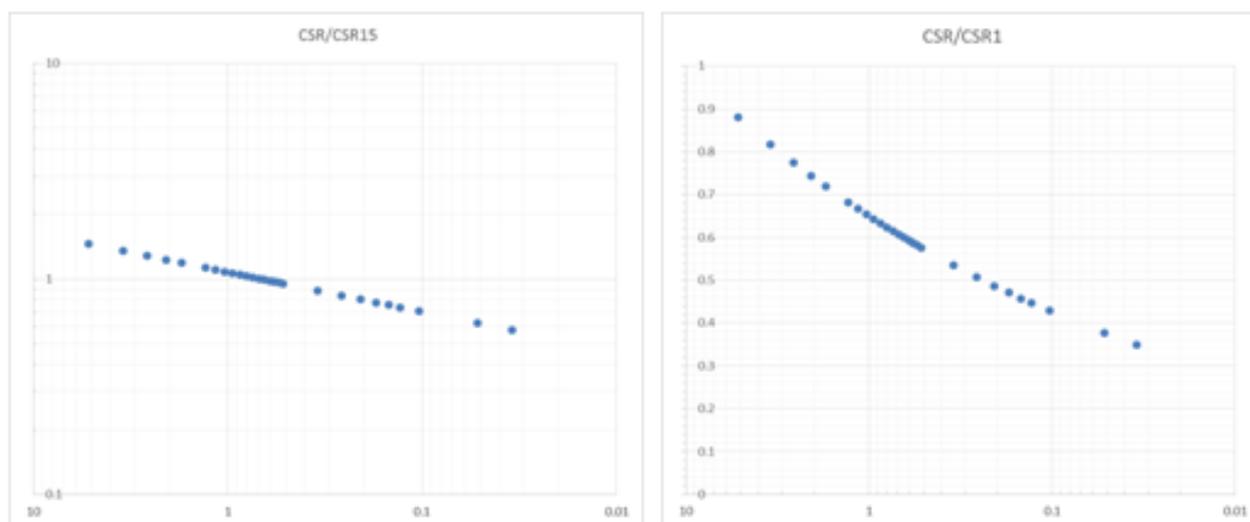


Figura 7.5-Curve di conversione da analisi cicliche computate con la relazione  $CSR_A \cdot (N_{L,A})^m = CSR_B \cdot (N_{L,B})^m$

I test campione hanno confermato la buona congruenza tra  $N_{eq}$  calcolati direttamente (con elevato onere computazionale) e il metodo sopracitato (maggiormente speditivo).

La stima di  $N_{eq}$  in relazione alle curve di resistenza ciclica consentirà poi di valutare meglio anche i metodi semplificati CPT da utilizzare in sito ed relativi fattori di scalatura della magnitudo (MSF).

Sulla base di una comparazione quali/quantitativa con le caratteristiche generali (contenuto energetico e in frequenza, durata, frequenza zero crossing,  $N_{eq}$ , ecc.) dei due main shock del recente sisma del 2012 in Emilia registrati presso il sito di Mirandola MRN\_HNN/MRN\_HNE (giorni 20-05 e 29-05), per il caso specifico si è ritenuto di scartare i risultati relativi al segnale 126xa, troppo differente per durata e contenuto energetico mediando, invece, tutti risultati derivanti dai segnali tipo 046xa e 354xa, considerati maggiormente rappresentativi per quanto attiene i ciclici di carico attesi in funzione delle caratteristiche stratigrafiche e sismogenetiche dell'area.

Pertanto, ai fini della definizione di un  *$N_{eq}$  rappresentativo per tutta l'area*, con lo scopo di utilizzarlo per una selezione del metodo semplificato CPT più appropriato, si è considerato il valore medio calcolato col metodo Biondi et al 2012, sulla base dei segnali di output 046xa e 354xa derivanti da n. 21 RSL distribuite su tutto il territorio. In figura 7.6 è esposta la metodologia di riferimento mentre in tabella 7.1 è riportata una panoramica dei risultati.

Parametri di Input per ciascun acc.	
<b><math>a_{max}</math></b>	a) $\ln N_{eq} = \alpha + \beta \cdot \ln a_{max} + \gamma \cdot \ln M$
<b>Intensità di Arias</b>	b) $\ln N_{eq} = \alpha + \beta \cdot \ln a_{max} + \gamma \cdot \ln I_a$
<b>Durata significativa (Trifunac &amp; Brady 1975)</b>	c) $\ln N_{eq} = \alpha + \beta \cdot \ln a_{max} + \gamma \cdot \ln I_a + \delta \cdot \ln D_{5,95}$
<b>Frequenza zero crossing</b>	d) $\ln N_{eq} = \alpha + \beta \cdot \ln a_{max} + \gamma \cdot \ln I_a + \delta \cdot \ln \nu_0$
<b>Modello di calcolo "e"</b>	e) $\ln N_{eq} = \alpha + \beta \cdot \ln a_{max} + \gamma \cdot \ln I_a + \delta \cdot \ln \nu_0 + \varepsilon \cdot \ln D_{5,95}$
<b>Cat. di suolo "C, D"</b>	<b>Legenda:</b>
<b>Fattore correttivo <math>C_A=1.319</math></b>	$a_{max}$ (g): valore di picco dell'accelerazione
	$I_a$ (m/s): intensità di Arias [ARIAS, 1970]
	$D_{5,95}$ (s): durata della fase <i>strong-motion</i> [TRIFUNAC e BRADY, 1975]
	$\nu_0$ (Hz): frequenza dei passaggi per lo zero valutata nell'ambito della durata $D_{5,95}$
	$N_{eq} = C_A \cdot \exp(\alpha + \beta \cdot \ln a_{max} + \gamma \cdot \ln I_a + \delta \cdot \ln \nu_0 + \varepsilon \cdot \ln D_{5-95}) \Rightarrow \mathbf{Neq = 11.83}$

Figura 7.6-Metodologia di riferimento per il calcolo di  $N_{eq}$  (Biondi et al 2012).

*Studi di Microzonazione Sismica per il territorio dei Comuni della Bassa Romagna (RA)*  
Relazione Tecnico Illustrativa

Tabella 7.1-Risultati per ciascuna delle aree in studio.

<b>Acc 046XA</b>	<b>Acc 354XA</b>	<b>Media Locale</b>	<b>Comune</b>	<b>ID Area</b>
046xa	354xa		<b>ALFONSINE</b>	
6.559092	14.1487	10.3538969		A02
046xa	354xa			
10.12327	13.17166	11.6474637		A03
046xa	354xa			
9.418325	13.24808	11.3332013		A05
046xa	354xa		<b>BAGNACAVALLO</b>	
12.63145	12.48962	12.560538		A07
046xa	354xa			
12.75904	9.254285	11.0066609		A08
046xa	354xa			
8.616901	10.21217	9.41453763		A13
046xa	354xa			
6.147226	13.86886	10.0080445		A14
046xa	354xa			
17.0298	11.42805	14.2289274		A90
046xa	354xa		<b>BAGNARA</b>	
13.4066	11.21159	12.3090955		A15
046xa	354xa		<b>CONSELICE</b>	
8.879834	18.43667	13.6582516		A16
046xa	354xa			
7.353828	15.79618	11.5750014		A17
046xa	354xa			
8.683278	14.5007	11.5919913		A19
046xa	354xa		<b>COTIGNOLA</b>	
11.81723	13.22351	12.5203696		A24
046xa	354xa			
14.32547	10.8164	12.570936		A47
046xa	354xa		<b>FUSIGNANO</b>	
8.502927	13.09896	10.8009458		A64
046xa	354xa		<b>LUGO</b>	
8.447885	13.46819	10.958037		A40
046xa	354xa			
12.39801	12.23797	12.3179911		A35
046xa	354xa			
13.48303	12.65687	13.0699488		A31
046xa	354xa			
13.32404	13.10541	13.2147286		A30
046xa	354xa		<b>MASSA</b>	
10.35163	13.78117	12.0663954		A92
046xa	354xa		<b>SANTAGATA</b>	
10.06701	12.58971	11.3283628		A76
		<b>11.8350155</b>	<b>MEDIA 046XA-354XA</b>	

Il valore di 11.83 è, inoltre, in ottimo accordo anche con la recente formulazione di Kishida-Tsai 2013 (sviluppata su un dataset di 3500 simulazioni su suolo tipo D, norma U.S.) che, sulla base del range di valori di accelerazione ottenuti (0.21g-0.26g), di una  $M_w=6.14$ , della frequenza fondamentale di sito, dei rapporti spettrali da RSL ed i parametri derivabili dal laboratorio ciclico (parametro “b”), porta a stimare un valore di  $10.60 \leq Neq \leq 11.34$  ed un conseguente fattore di scalatura della magnitudo mediamente pari a  $MSF=1.12$  (per i depositi a medio FC).

Si rammenta come tale studio sia in ottimo accordo con la recente revisione del MSF del metodo di Idriss - Boulanger 2014.

Pertanto il parametro  $Neq$  assume un ruolo fondamentale nelle problematiche per liquefazione e per tutte le valutazioni inerenti i rapporti di sovrappressione interstiziale sismicamente indotti.

### *7.2.3 Verifiche semplificate – metodo Cpt*

Essendo in assenza di una “*case history*” sul campo ed avendo la necessità di selezionare quale fosse il metodo di verifica semplificato CPT più appropriato per le caratteristiche litologiche e sismologiche dell’area, si è cercato un riscontro attraverso le esperienze di laboratorio ciclico al fine di giungere ad una stima ragionata e motivata del potenziale di liquefazione IPL in corrispondenza di ciascuna verticale di calcolo.

In prima battuta sono stati scelti alcuni tra i metodi più accreditati ovvero: Robertson 2009 (R&W09), Idriss-Boulanger 2008 (di seguito IB08) e la recente revisione Idriss-Boulanger 2014 (IB14)

Quindi si è condotta una comparazione di alcuni tra i fattori maggiormente significativi di ciascun metodo; in particolare si è confrontato il fattore  $R_d$  (fatt di riduzione per comportamento non lineare del terreno) dei metodi semplificati con quello medio ottenuto dalle analisi di RSL (figura 7.7).

Di seguito si è condotta anche una comparazione tra profili di CSR derivanti da RSL e dai metodi semplificati (figura 7.8), di cui si illustrano gli andamenti in funzione dei valori di  $ag_{max}$  pari a 0.21-0.23 e 0.25g, ritenuti i valori che maggiormente caratterizzano le aree studiate (in cui ciascun profilo derivante da RSL rappresenta la media di tutti i profili appartenenti a zone di pari accelerazione).

Risulta evidente come entrambi i metodi sviluppati da Idriss-Boulanger (caratterizzati dai medesimi fattori di stima/correzione dell’azione sismica) siano maggiormente coerenti con i profili di azione sismica calcolati tramite RSL (pur mantenendo sempre un certo grado di conservativismo).

Per quanto attiene alla stima dei valori di resistenza ciclica (a sua volta derivata dalla normalizzazione della resistenza alla punta e stima di fine content) risultano sufficientemente comparabili; diversamente sensibili differenze vengono riscontrate nel modello di scalatura della magnitudo “MSF”, che risulta condizionare in modo prevalente il risultato finale.

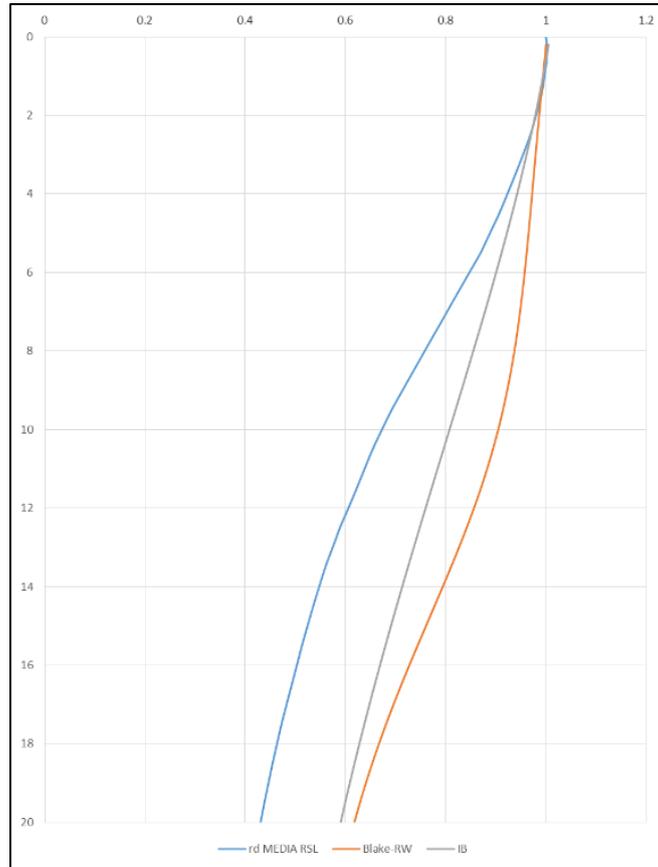


Figura 7.7- Confronto tra il fattore Rd da metodi semplificati e Rd medio da RLS.

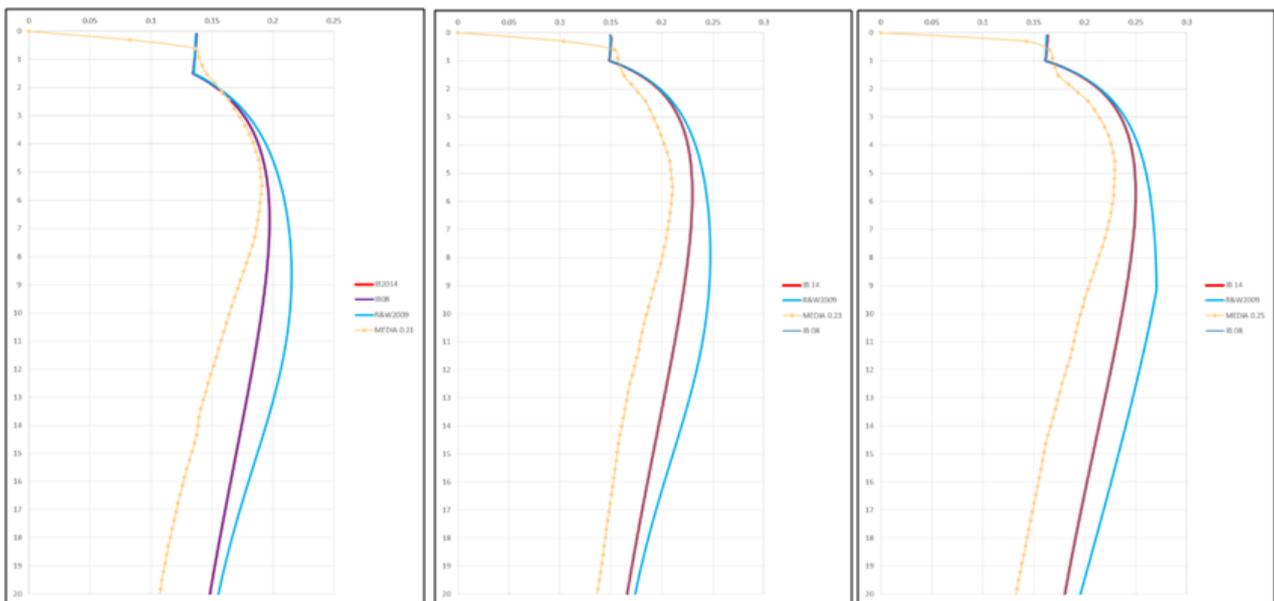


Figura 7.8- Comparazione tra profili di CSR derivanti da RLS e dai metodi semplificati

Mentre il metodo R&W09 contempla un unico valore di MSF in funzione della Mw di riferimento, l'MSF definito tramite IB08, a fronte dell'Mw di riferimento, distingue due valori propri di situazioni di terreno Sand-like e Clay-like; infine la rivisitazione del metodo 2014 arriva a definire una maggior modulazione di tale fattore anche in funzione delle caratteristiche intrinseche del terreno rappresentate sinteticamente dal valore "Qc1ncs".

Lo studio delle curve di laboratorio ciclico ha consentito di verificare quale metodo risultasse maggiormente consono alle risultanze ottenute e, considerando che gli orizzonti campionati presentano generalmente un valore  $65 \leq Qc1ncs \leq 90$ , analizzando il comportamento dei vari provini e delle curve rappresentative, riportandole su una scala logaritmica, in analogia al modello di scalatura MSF di Idriss-Boulanger 2014, si può giungere alla schematizzazione di figura 7.9 ove, oltre agli ambiti di Qc1ncs, anche il parametro "b" rappresentativo dell'interpolazione delle curve ricostituite risulta molto coerente con le correlazioni riportate dall'autore; pertanto lo studio delle curve ottenute in laboratorio, unitamente all'analisi dei cicli equivalenti, conduce ad avvalersi di quest'ultimo fattore MSF (vedi figure 7.9 e 7.10) e, complessivamente, a **ritenere il metodo IB2014 maggiormente appropriato alle caratteristiche dei terreni in sito ed ai profili di azione sismica simulati.**

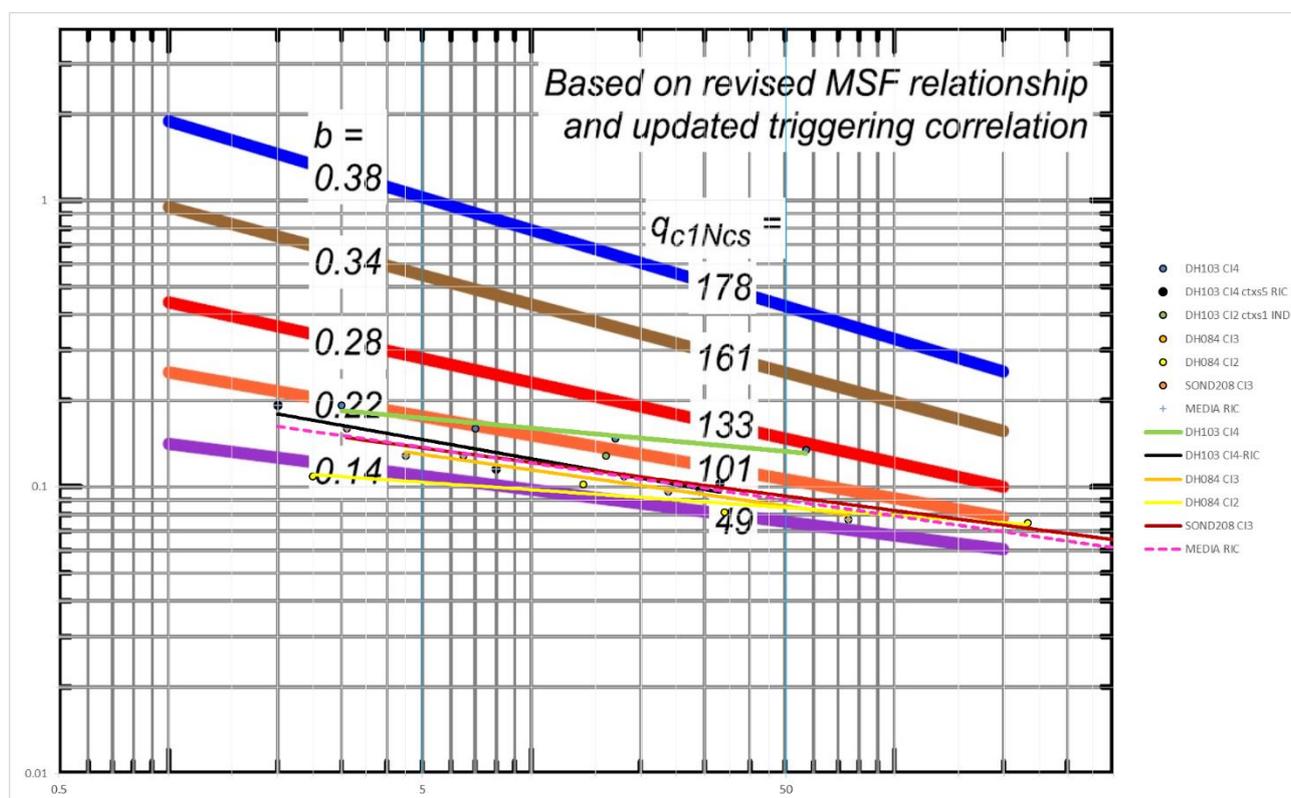


Figura 7.9- Raffronto modello MSF IB14 con curve rappresentative di laboratorio ciclico (maggiori dettagli nel testo).

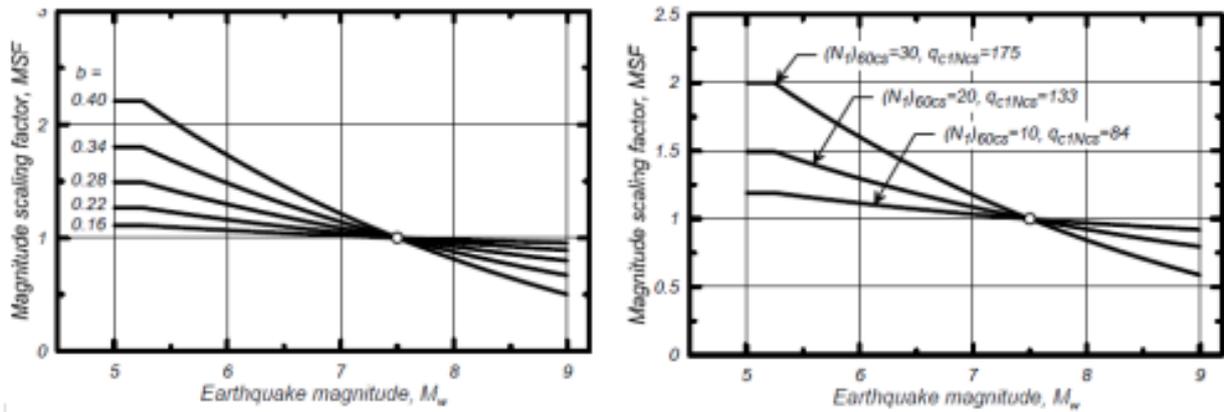


Figura 7.10-Pannello di sinistra: variazione in termini di MSF con il parametro  $b$ . Pannello di destra: variazione in termini di MSF con il parametro  $Q_{c1Ncs}$ .

La curva di riferimento di tale metodo, nella sua forma deterministica, rappresenta una soglia probabilistica pari al 16% (figura 7.11).

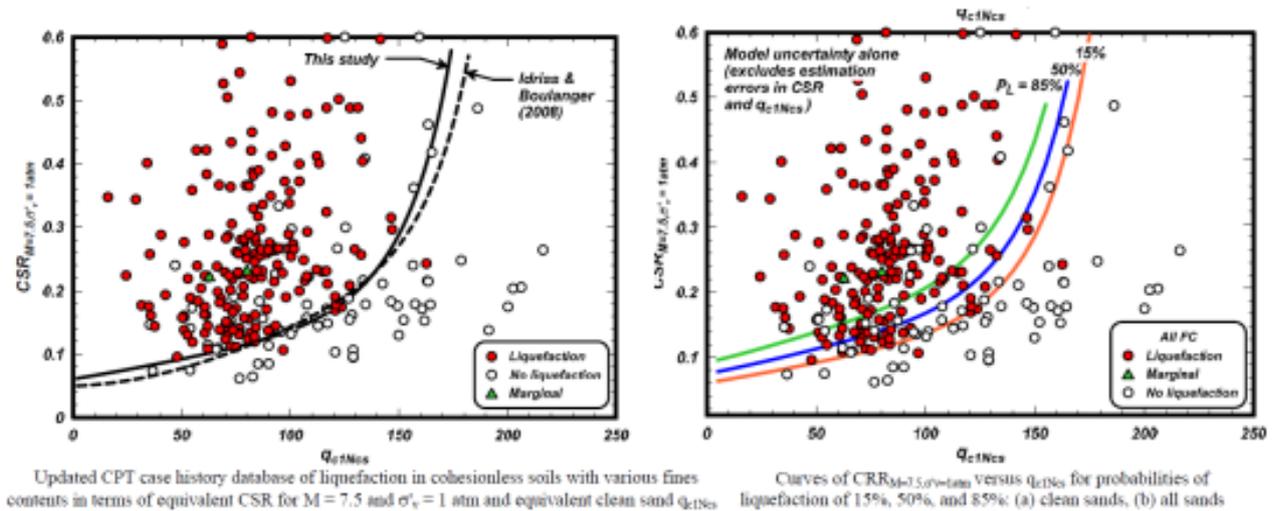


Figura 7.11- Pannello di sinistra: confronto curve di riferimento IB14-IB08. Pannello di destra: soglie probabilistiche 15%-50%-85% associate al metodo IB14

Tuttavia, dato atto che le curve di resistenza dei campioni ricostituiti, aderenti in modo ottimale al modello IB2014, rappresentano delle soglie di resistenza di Lower Bound e che il valore di resistenza differenziale tra corrispondenti provini ricostituiti/indisturbati si può configurare come un ulteriore fattore di sicurezza pari a non meno di 1.15 (altrimenti sempre >25-40%), fa sì che il metodo IB2014 (che ha già proprie soglie di sicurezza insite nella sua case history e trattazione probabilistica) utilizzando un  $F_{srif}=1$  possa rivelarsi forse troppo conservativo; pertanto nell'applicazione del metodo di calcolo si è scelto di adottare un  **$F_{srif}=0.87$** , prendendo in carico quel 15% minimo di resistenza ulteriore, sempre riscontrato su tutti i provini analizzati nell'ambito dei cicli equivalenti di riferimento.

Al fine di ottenere una stima adeguata del contenuto in fine a partire dai valori di  $I_c$  (indice di comportamento da prova cptu), sulla scorta delle analisi granulometriche eseguite su tutti i provini testati con

TRX\_ciclico, si è modulato il parametro  $C(fc)$ , necessario a calibrare la curva  $I_c$ - $F_c$  proposta dall'autore, generalmente secondo valori  $-0.2 < C(fc) < -0.15$  (figura 7.12).

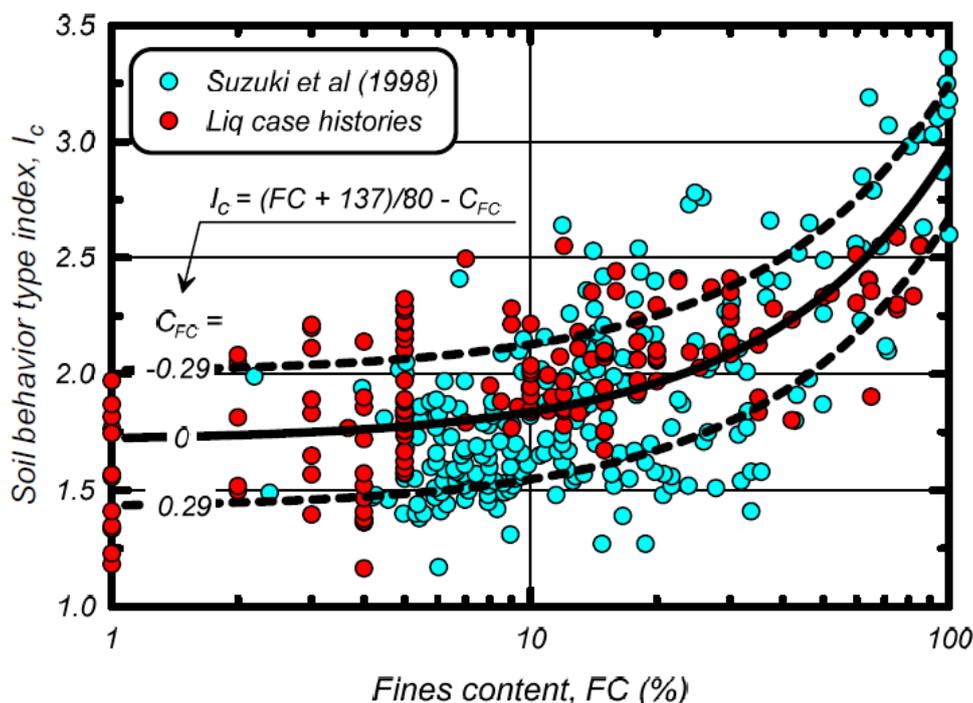


Figura 7.12-Relazione  $I_c$ - $F_c$  proposta e consigliata dagli autori per il metodo IB14

Ovviamente una stima adeguata del contenuto in fine si rende necessaria per il corretto aggiustamento della resistenza alla punta :

$$\Delta q_{c1N} = \left( 11.9 + \frac{q_{c1N}}{14.6} \right) \exp \left( 1.63 - \frac{9.7}{FC + 2} - \left( \frac{15.7}{FC + 2} \right)^2 \right)$$

utile a definire  $Q_{c1Ncs}$  e, quindi, la relativa resistenza ciclica  $CRR_{7.5}$ :

$$CRR_{M=7.5, \sigma'_v=1atm} = \exp \left( \frac{q_{c1Ncs}}{113} + \left( \frac{q_{c1Ncs}}{1000} \right)^2 - \left( \frac{q_{c1Ncs}}{140} \right)^3 + \left( \frac{q_{c1Ncs}}{137} \right)^4 - 2.8 \right)$$

Si segnala inoltre come i risultati ottenibili con la metodologia sopradescritta, in termine di IPL, risultino ben comparabili con il metodo IB 2008, utilizzando quest'ultimo  $FS_{rif}=1$  con stima del  $FC$  tramite la formulazione di Robertson (curva  $I_c$ - $F_c$  risultata anch'essa appropriata) o, comunque, con  $FC$  comparabili e relativo  $Q_{c1Ncs}$ .

Diversamente il metodo R&W, a parità di  $FS_{rif}$ , tende a presentare risultati talora sensibilmente inferiori, soprattutto in funzione del maggior valore di  $MSF$  e della soglia probabilistica associata alla curva di riferimento.

Tutte le verifiche sono state condotte utilizzando una  $M_{wmax}$  pari a 6.14.

Non avendo potuto condurre test ciclici di laboratorio su materiali coesivi, per definirne le specifiche caratteristiche di degradazione ciclica, le verifiche a liquefazione e stime di IPL con metodi semplificati sono state condotte solo sulla parte incoerente del deposito.

Chiaramente i risultati ottenuti e ottenibili dai metodi semplificati possono essere influenzati significativamente da ulteriori variabili di sito e sismogenetiche quali:

- Fenomeni di direzionalità dell'azione sismica e tipologia di faglia
- Distanza epi/ipocentrale
- condizioni idrogeologiche e/o di drenaggio locale
- configurazioni geomorfologiche particolari e/o mancanza di contenimento laterale dei terreni
- presenza di carichi piezometrici e/o falde in pressione
- presenza di gas nel sottosuolo
- fenomeni di interazione terreno struttura e/o di carichi concentrati
- preesistenza di sforzi di taglio in condizioni statiche

In allegato n. 4 si riportano i report sintetici delle verifiche a liquefazione effettuate su ciascuna area, mentre in allegato n. 5 vengono illustrate le tabelle parametriche riepilogative di tutti i corrispondenti valori di IPL calcolati.

## **8. CONCLUSIONI**

La microzonazione sismica effettuata sul territorio dell'Unione dei Comuni della Bassa Romagna ha permesso di valutare la pericolosità sismica sia nelle aree urbane che in quelle di prevista urbanizzazione.

Non sono state riscontrate zone stabili, cioè zone dove non si ipotizzano effetti locali di rilievo di alcuna natura. Tutte le zone individuate sono riconducibili a zone stabili suscettibili di amplificazioni locali e zone suscettibili di instabilità.

Per le prime aree, sono attese amplificazioni del moto sismico come effetto dell'assetto litostratigrafico e morfologico locale mentre nelle seconde, sono attese fenomenologie di liquefazione dei terreni.

Le numerose verifiche di RLS e Potenziale di Liquefazione hanno permesso di quantificare i possibili effetti di 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 2 importanti fattori: il primo quantifica le amplificazioni dovute a fenomenologie di risonanza locale (Fattore di Amplificazione FA), mentre il secondo (potenziale di liquefacibilità IPL) è un indicatore della suscettibilità dei terreni, al verificarsi di un sisma, nei confronti di potenziali fenomeni di liquefazione e relative manifestazioni superficiali.

Tali informazioni potranno essere sfruttate per la progettazione urbanistica e la pianificazione territoriale.