



SOGGETTO ATTUATORE:



**PROVINCIA DI REGGIO EMILIA**  
come da Protocollo d'Intesa tra la Provincia di Reggio Emilia  
e la Provincia di Mantova sottoscritto il 09/03/2020

## MANUTENZIONE STRAORDINARIA DEL PONTE SUL FIUME PO TRA GUASTALLA (RE) E DOSOLO (MN)

CUP: C67H20000290001

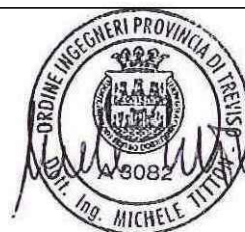
## PROGETTO ESECUTIVO

GRUPPO DI PROGETTAZIONE:

CAPOGRUPPO R.T.P.



**ITS srl**  
Corte delle Caneve, 11  
31053 Pieve di Soligo (TV)  
Tel. 0438 82082 email: info@its-engineering.com



Ing. MICHELE TITTON  
Ing. ANDREA DE PIN  
Ing. MATTEO TANCON  
Ing. MIRKO LORENZON  
Ing. ELOISA TORRESINI  
Ing. MASSIMO DE NARDI  
Geom. FABIO LUCCHETTA

Prof. Ing. PIER GIORGIO MALERBA  
Ing. PAOLO GALLI

MANDANTE:

**MALERBA INGEGNERIA STRUTTURALE**

Prof. Ing. PIER GIORGIO MALERBA  
Viale Abruzzi, 17 - 20131 Milano (MI) - Tel. 02 29526561

ELABORATO:

## GEOLOGIA RELAZIONE SISMICA

PROGETTISTA:

Ing. MICHELE TITTON

RESP. UNICO DEL PROCEDIMENTO:

Ing. GIUSEPPE TUMMINO

IL DIRIGENTE:

Ing. VALERIO BUSSEI

CODICE PROGETTO

PROGETTO

2021 022 - PE

STR. FASE

NOME FILE 2021\_022 PE GEO RE 02\_A\_Rel. sismi.

REVISIONE

SCALA

CODICE ELAB

GEO RE 02

A

-

|      |                 |         |            |           |            |
|------|-----------------|---------|------------|-----------|------------|
|      |                 |         |            |           |            |
|      |                 |         |            |           |            |
|      |                 |         |            |           |            |
| A    | PRIMA EMISSIONE | ADP     | ADP        | MT        | 19.11.2021 |
| REV. | DESCRIZIONE     | REDATTO | VERIFICATO | APPROVATO | DATA       |

• **Indice**

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE .....                               | 1  |
| 2     | STORICITÀ SISMICA DELL'AREA .....                                | 4  |
| 3     | FAGLIE CAPACI.....   | 9  |
| 4     | CARATTERIZZAZIONE SISMOGENETICA.....                             | 10 |
| 5     | INDAGINI ESEGUITE E METODOLOGIA .....                            | 12 |
| 5.1   | INDAGINE SISMICA MASW .....                                      | 13 |
| 5.2   | INDAGINE SISMICA H/V .....                                       | 20 |
| 5.3   | CATEGORIA STRATIGRAFICA E TOPOGRAFICA.....                       | 27 |
| 6     | RISPOSTA SISMICA LOCALE.....                                     | 27 |
| 6.1   | DEFINIZIONE DELLE SCELTE PROGETTUALI .....                       | 27 |
| 6.2   | MODELLO SISMOSTRATIGRAFICO .....                                 | 28 |
| 6.3   | PROCEDURA DI ANALISI .....                                       | 28 |
| 6.4   | RISULTATI ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE .....               | 31 |
| 6.4.1 | Stato limite di Salvaguardia della Vita (SLV).....               | 31 |
| 6.4.2 | Stato limite di Danno (SLD).....                                 | 33 |
| 6.5   | AZIONE SISMICA TERREMOTO 2012 AL PONTE DI DOSOLO-GUASTALLA.....  | 35 |
| 7     | EFFETTI DI DOPPIA RISONANZA SUOLO STRUTTURA.....                 | 37 |
| 8     | VERIFICA DELLA SUSCETTIVITA' ALLA LIQUEFAZIONE DEI TERRENI ..... | 38 |
| 9     | CONCLUSIONI.....   | 42 |
|       | ATLANTE FOTOGRAFICO .....  | 44 |



## 1 PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE

La nuova normativa in materia di classificazione sismica del territorio nazionale e il recepimento a livello regionale (D.g.r. Lombardia n. 5830 del 2016 e DGR Emilia Romagna nr. 1164 del 23/07/2018 ) includono i Comuni di Dosolo (MN) e Guastalla (RE) nella zona 3 (Figure 1-2), a sismicità bassa ( $0.050 \leq a_g \leq 0.150$ ).

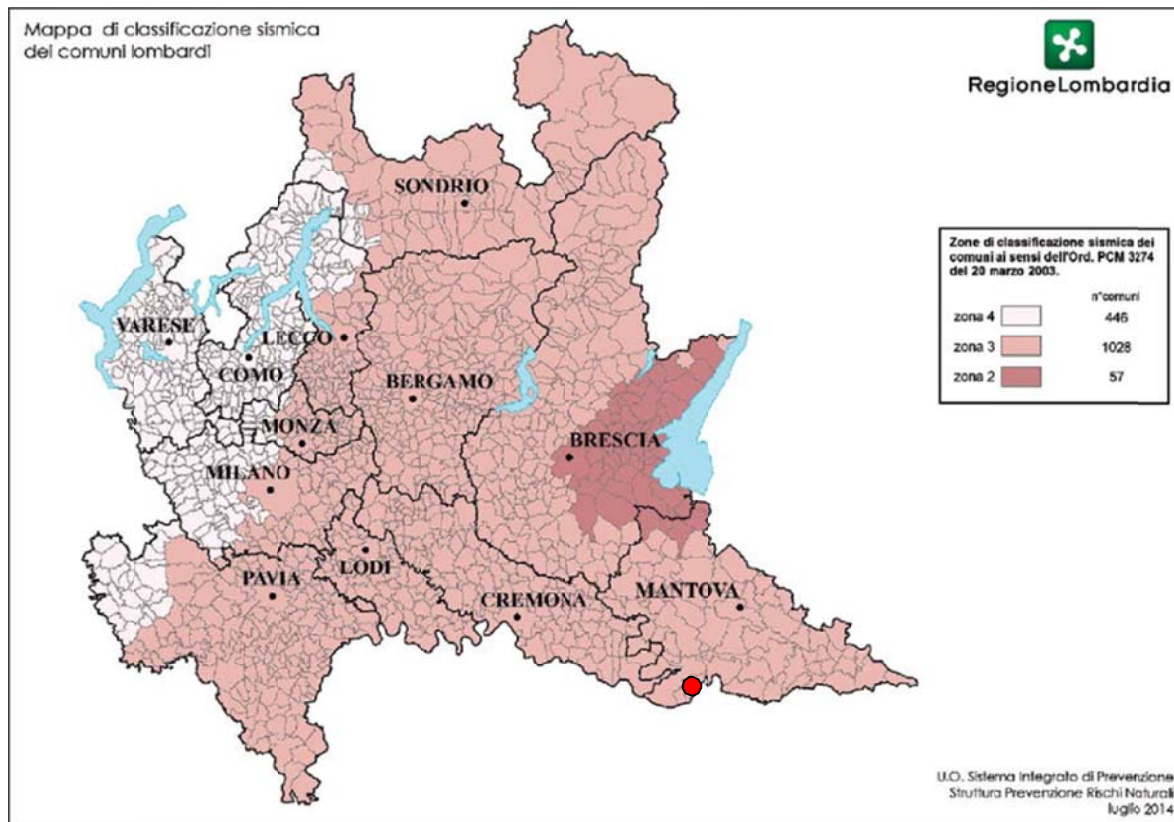


Figura 1: Mappa di classificazione sismica della Regione Lombardia

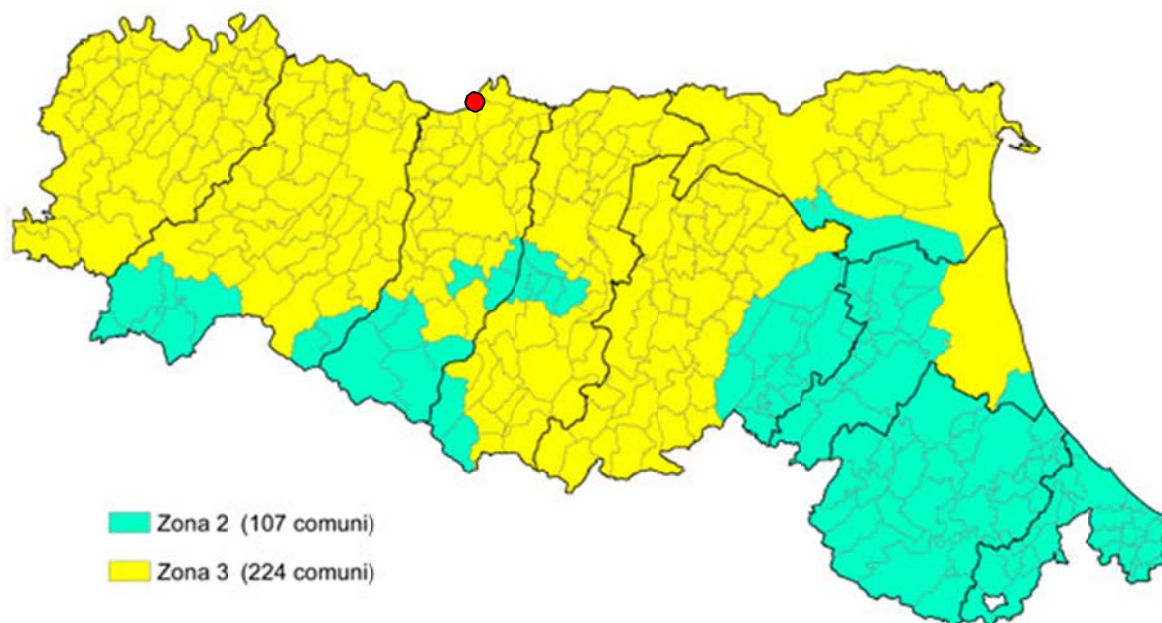


Figura 2: Mappa di classificazione sismica della Regione Emilia Romagna

In merito all'Ordinanza n. 3519/2006<sup>2</sup> la località oggetto di interesse risulta compresa tra punti con le seguenti accelerazioni sismiche dipendenti dagli Stati Limite considerati (cod. ID 14722, 14723, 14945 e 14944) (Figure 3-7).

Per **SLC** si è selezionata una probabilità di **eccedenza del 5% in 50 anni**. In **Figura 3** è riportato il grafico di disaggregazione ottenuto. Per la scelta degli accelerogrammi sismo-spettro compatibili rispetto allo spettro di target (cat. A) si sono quindi scelte una magnitudo **M compresa tra 4.0 e 6.0** e una distanza **R compresa tra 10 e 40 km**, dati utilizzati nel software Rexel 3.5 per la ricerca del gruppo di 7 accelerogrammi utili alle analisi.

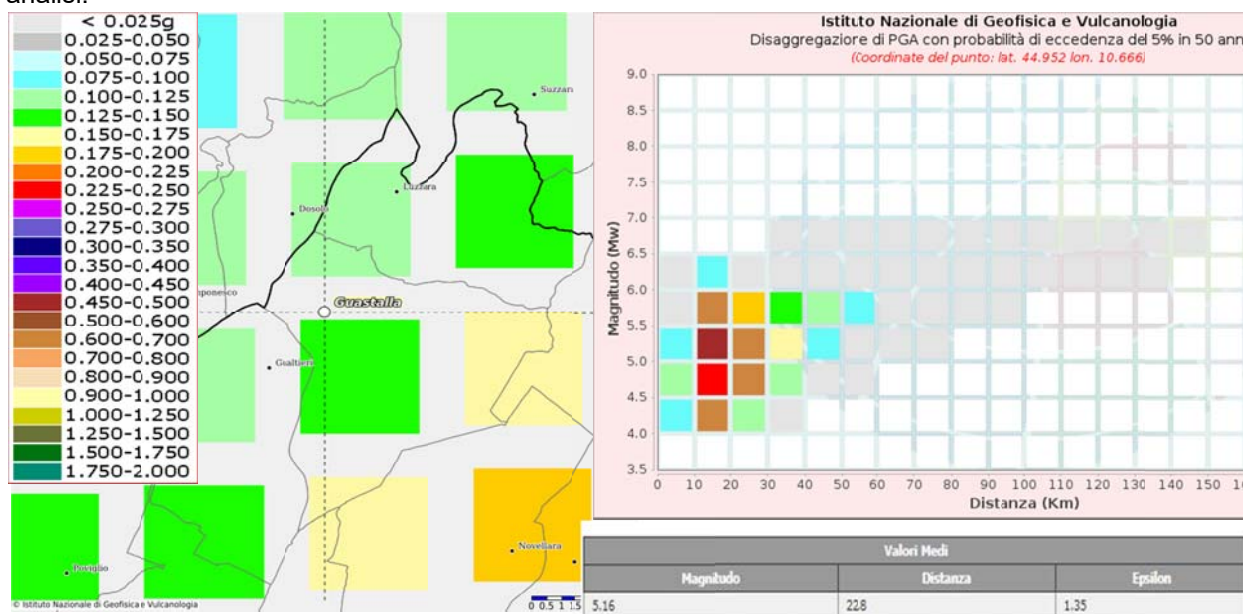


Figura 3 Parametri di disaggregazione SLC.

Per **SLV** si è selezionata una probabilità di **eccedenza del 10% in 50 anni**. In **Figura 4** è riportato il grafico di disaggregazione ottenuto. Per la scelta degli accelerogrammi sismo-spettro compatibili rispetto allo spettro di target (cat. A) si sono quindi scelte una magnitudo **M compresa tra 4 e 6.0** e una distanza **R compresa tra 10 e 40 km**, dati utilizzati nel software Rexel 3.5 per la ricerca del gruppo di 7 accelerogrammi utili alle analisi.

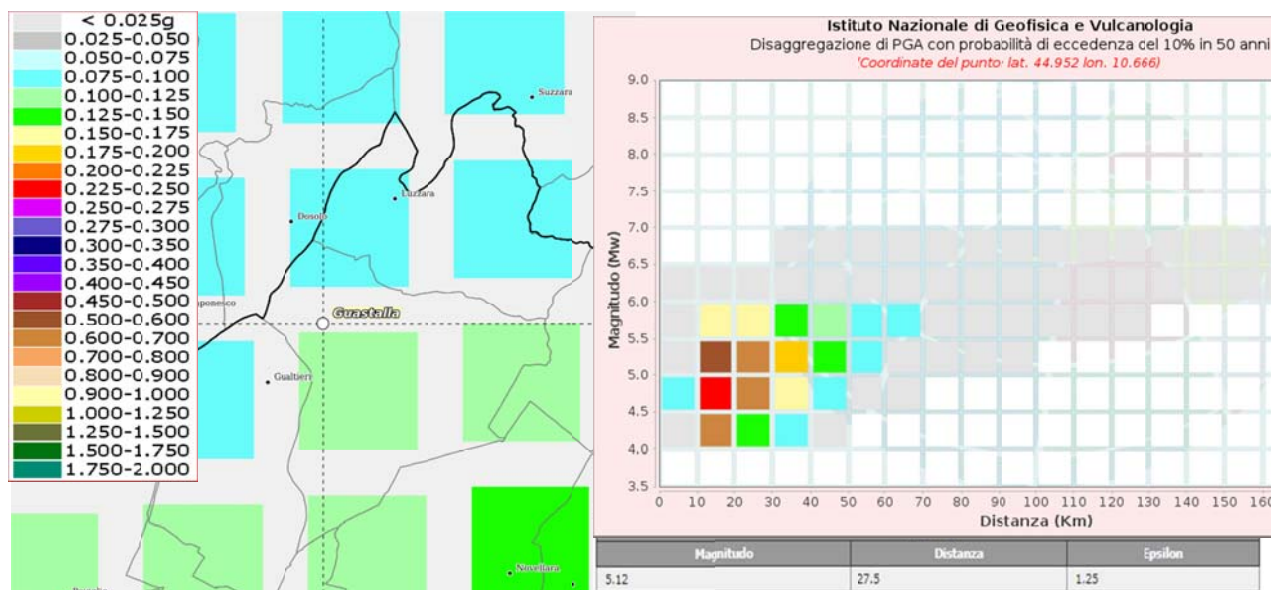


Figura 4 Parametri di disaggregazione SLV.

Per **SLD** si è selezionata una probabilità di **eccedenza del 63% in 50 anni**. In **Figura 5** è riportato il grafico di disaggregazione ottenuto. Per la scelta degli accelerogrammi sismo-spettro compatibili rispetto allo spettro di target (cat. A) si sono quindi scelte una magnitudo **M compresa tra 4 e 5.5** e una distanza **R compresa tra 10 e 70 km**, dati utilizzati nel software Rexel 3.5 per la ricerca del gruppo di 7 accelerogrammi utili alle analisi.

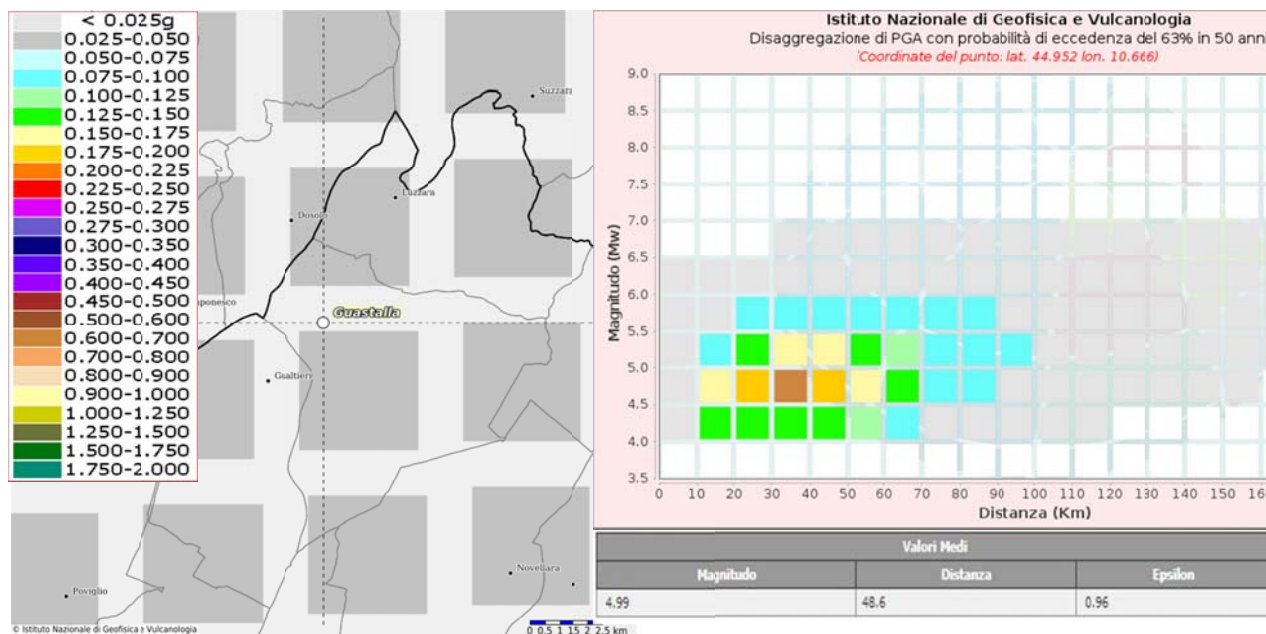


Figura 5 Parametri di disaggregazione SLD.

Per **SLO** si è selezionata una probabilità di **eccedenza del 81% in 50 anni**. In **Figura 6** è riportato il grafico di disaggregazione ottenuto. Per la scelta degli accelerogrammi sismo-spettro compatibili rispetto allo spettro di target (cat. A) si sono quindi scelte una magnitudo M compresa tra 4 e 5.5 e una distanza R compresa tra 10 e 80 km, dati utilizzati nel software Rexel 3.5 per la ricerca del gruppo di 7 accelerogrammi utili alle analisi.

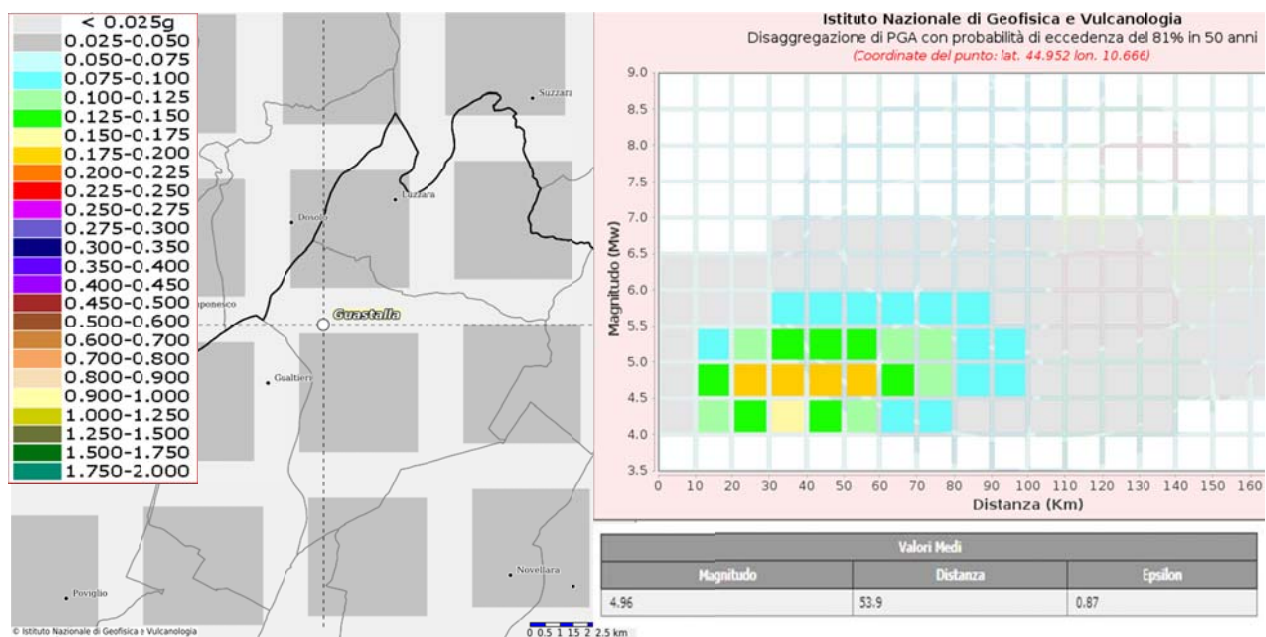


Figura 6 Parametri di disaggregazione SLO

## 2 STORICITÀ SISMICA DELL'AREA

L'esame dei dati disponibili nel Database Macrosismico Italiano 2015 (DBMI15), utilizzato per la compilazione di CPTI15 (Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani 2015) ha permesso di ricostruire la storicità sismica dell'area (Figure 16 e 17).

Nel caso di Dosolo-Guastalla vengono evidenziati circa 50 eventi di riferimento, in un periodo compreso tra il 1695 e il 2012. La maggior parte dei terremoti di magnitudo maggiore di 5 hanno il loro epicentro collocato nel Friulano, in Emilia-Romagna orientale, nell'Asolano o nel Veronese .

DBMI15 fornisce un set omogeneo di intensità macrosismiche provenienti da diverse fonti relativo ai terremoti con intensità massima  $\geq 5$  e d'interesse per l'Italia nella finestra temporale 1000-2014. I dati sono disponibili al link: <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>.

### Dosolo

|                            |                |
|----------------------------|----------------|
| PlaceID                    | IT_19577       |
| Coordinate (lat, lon)      | 44.954, 10.641 |
| Comune (ISTAT 2015)        | Dosolo         |
| Provincia                  | Mantova        |
| Regione                    | Lombardia      |
| Numero di eventi riportati | 15             |

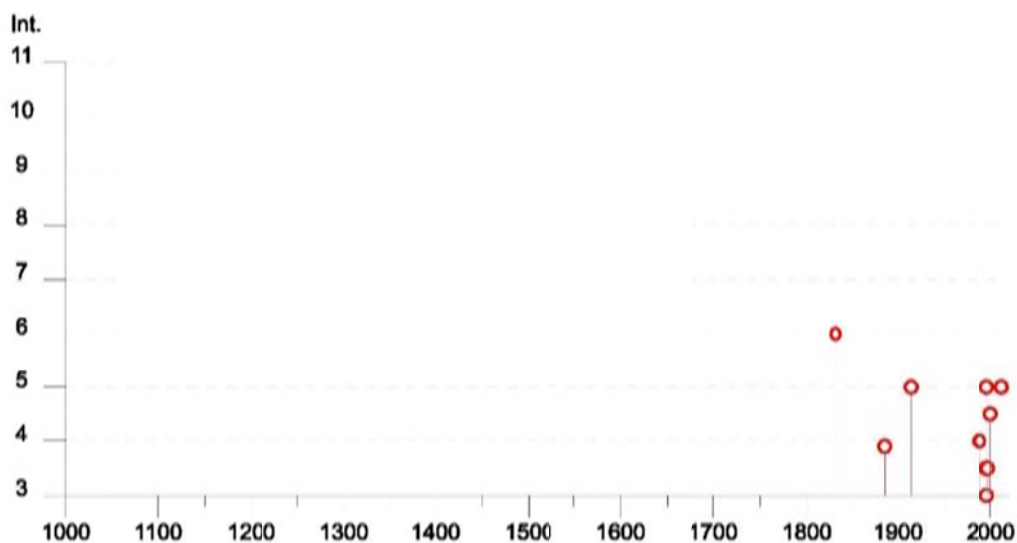


Figura 7- rappresentazione grafica degli eventi sismici con Magnitudo > 5 registrati nel territorio di Dosolo (MN)  
(<http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>).

| Effetti | In occasione del terremoto del |    |    |    |    |    |                  |      |     |      |
|---------|--------------------------------|----|----|----|----|----|------------------|------|-----|------|
| Int.    | Anno                           | Me | Gi | Ho | Mi | Se | Area epicentrale | NMDP | Io  | Mw   |
| 6       | 1832                           | 03 | 13 | 03 | 30 |    | Reggiano         | 97   | 7-8 | 5.51 |
| F       | 1886                           | 10 | 15 | 02 | 20 |    | Collecchio       | 44   | 6   | 4.70 |
| 5       | 1914                           | 10 | 27 | 09 | 22 |    | Lucchesia        | 660  | 7   | 5.63 |
| NF      | 1986                           | 12 | 06 | 17 | 07 | 1  | Ferrarese        | 604  | 6   | 4.43 |
| 4       | 1987                           | 05 | 02 | 20 | 43 | 5  | Reggiano         | 802  | 6   | 4.71 |
| 4       | 1988                           | 03 | 15 | 12 | 03 | 1  | Reggiano         | 160  | 6   | 4.57 |
| 5       | 1996                           | 10 | 15 | 09 | 55 | 5  | Pianura emiliana | 135  | 7   | 5.38 |
| NF      | 1996                           | 10 | 26 | 04 | 56 | 0  | Pianura emiliana | 63   | 5-6 | 3.94 |
| 3       | 1996                           | 10 | 26 | 06 | 50 | 2  | Pianura emiliana | 35   | 5-6 | 3.63 |
| 3-4     | 1996                           | 11 | 25 | 19 | 47 | 5  | Pianura emiliana | 65   | 5-6 | 4.29 |
| NF      | 1996                           | 12 | 16 | 09 | 09 | 5  | Pianura emiliana | 115  | 5-6 | 4.06 |
| 3-4     | 1997                           | 05 | 12 | 22 | 13 | 0  | Pianura emiliana | 56   | 4-5 | 3.68 |
| NF      | 1998                           | 02 | 21 | 02 | 21 | 0  | Pianura emiliana | 104  | 5   | 3.93 |
| 4-5     | 2000                           | 06 | 18 | 07 | 42 | 0  | Pianura emiliana | 304  | 5-6 | 4.40 |
| 5       | 2012                           | 01 | 25 | 08 | 06 | 3  | Pianura emiliana | 25   | 5-6 | 4.98 |

Figura 8- rappresentazione grafica degli eventi sismici con Magnitudo>5 registrati nel territorio di Dosolo (MN)  
(<http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>).

Più ricca è la documentazione di scuotimenti sismici di una certa entità (intensità registrata al sito  $I_s \geq 5$ ) in località vicine entro 10 km. Di seguito, per alcune località, il numero (NMO) di eventi registrati:

Località vicine (entro 10km)

| Località       | EQs | Distanza (km) |
|----------------|-----|---------------|
| Guastalla      | 51  | 4             |
| Luzzara        | 26  | 4             |
| Pomponesco     | 12  | 5             |
| Gualtieri      | 19  | 6             |
| Cizzolo        | 1   | 7             |
| Pieve Saliceto | 1   | 7             |
| Codisotto      | 1   | 7             |
| Casoni         | 1   | 8             |
| Boretto        | 14  | 9             |
| San Rocco      | 1   | 9             |
| Villarotta     | 1   | 9             |
| Suzzara        | 21  | 9             |
| Santa Croce    | 2   | 10            |
| Viadana        | 37  | 10            |

Figura 9 Eventi sismici con Magnitudo>5 registrati nei dintorni del territorio di Dosolo (MN) (<http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>).

## Guastalla

PlaceID IT\_37545  
 Coordinate (lat, lon) 44.921, 10.654  
 Comune (ISTAT 2015) Guastalla  
 Provincia Reggio nell'Emilia  
 Regione Emilia-Romagna  
 Numero di eventi riportati 51

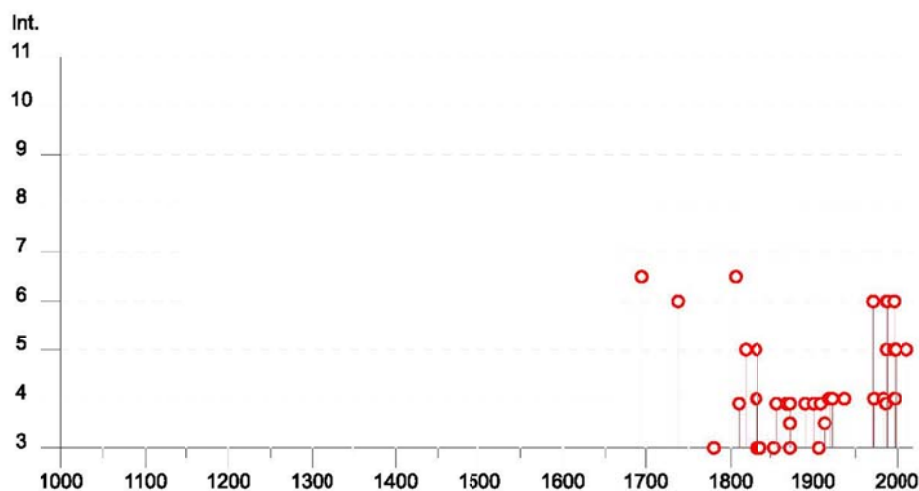


Figura 10- rappresentazione grafica degli eventi sismici con Magnitudo>5 registrati nel territorio di Guastalla (RE)  
 (<http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>).

| Effetti | In occasione del terremoto del |    |    |    |    |    |                       |      |     |      |
|---------|--------------------------------|----|----|----|----|----|-----------------------|------|-----|------|
| Int.    | Anno                           | Me | Gi | Ho | Mi | Se | Area epicentrale      | NMDP | Io  | Mw   |
| 6-7     | 1695                           | 02 | 25 | 05 | 30 |    | Asolano               | 107  | 10  | 6.40 |
| 6       | 1738                           | 11 | 05 | 00 | 30 |    | Emilia occidentale    | 10   | 7   | 5.10 |
| 3       | 1780                           | 02 | 06 | 04 |    |    | Bolognese             | 9    | 6-7 | 5.06 |
| 6-7     | 1806                           | 02 | 12 |    |    |    | Reggiano              | 28   | 7   | 5.21 |
| F       | 1810                           | 12 | 25 | 00 | 45 |    | Pianura emiliana      | 33   | 6   | 5.06 |
| 5       | 1818                           | 12 | 09 | 18 | 55 |    | Parmense              | 26   | 7   | 5.24 |
| 2-3     | 1826                           | 06 | 24 | 12 | 15 |    | Garda occidentale     | 20   | 5   | 4.62 |
| 3       | 1831                           | 07 | 14 | 15 | 30 |    | Reggiano              | 8    | 5-6 | 4.60 |
| 4       | 1831                           | 09 | 11 | 18 | 15 |    | Pianura emiliana      | 25   | 7-8 | 5.48 |
| 3       | 1831                           | 09 | 13 | 05 | 30 |    | Pianura emiliana      | 7    |     |      |
| 3       | 1832                           | 03 | 11 | 08 | 45 |    | Parmense              | 14   |     |      |
| 4       | 1832                           | 03 | 12 | 02 | 30 |    | Parmense              | 4    |     |      |
| 5       | 1832                           | 03 | 13 | 03 | 30 |    | Reggiano              | 97   | 7-8 | 5.51 |
| 3       | 1832                           | 03 | 14 | 07 | 41 |    | Reggiano              | 7    |     |      |
| 3       | 1834                           | 07 | 04 | 00 | 45 |    | Val di Taro-Lunigiana | 24   | 6-7 | 5.08 |
| 3       | 1837                           | 04 | 11 | 17 |    |    | Lunigiana             | 60   | 9   | 5.94 |

Figura 11- rappresentazione grafica degli eventi sismici con Magnitudo>5 registrati nel territorio di Guastalla (RE)  
 (<http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>).

| Effetti | In occasione del terremoto del |    |    |    |    |    |                          |  |  |  |      |           |
|---------|--------------------------------|----|----|----|----|----|--------------------------|--|--|--|------|-----------|
| Int.    | Anno                           | Me | Gi | Ho | Mi | Se | Area epicentrale         |  |  |  | NMDP | Io Mw     |
| 2-3     | 1843                           | 10 | 25 | 03 | 30 |    | Mugello                  |  |  |  | 17   | 6-7 5.03  |
| 2       | 1846                           | 08 | 14 | 12 |    |    | Colline Pisane           |  |  |  | 121  | 9 6.04    |
| 3       | 1854                           | 06 | 16 | 13 | 25 |    | Imola                    |  |  |  | 9    | 5 4.57    |
| F       | 1857                           | 02 | 01 |    |    |    | Parmense-Reggiano        |  |  |  | 22   | 6-7 5.11  |
| F       | 1869                           | 12 | 13 | 02 | 53 |    | Sassuolo                 |  |  |  | 13   | 5 4.57    |
| 3       | 1873                           | 05 | 16 | 19 | 35 |    | Reggiano                 |  |  |  | 15   | 6-7 5.01  |
| F       | 1873                           | 06 | 29 | 03 | 58 |    | Alpago Cansiglio         |  |  |  | 197  | 9-10 6.29 |
| 3-4     | 1873                           | 09 | 17 |    |    |    | Appennino tosco-ligure   |  |  |  | 64   | 6-7 5.26  |
| F       | 1891                           | 06 | 07 | 01 | 06 | 14 | Valle d'Ilasi            |  |  |  | 403  | 8-9 5.87  |
| F       | 1901                           | 10 | 30 | 14 | 49 | 58 | Garda occidentale        |  |  |  | 289  | 7-8 5.44  |
| NF      | 1904                           | 06 | 10 | 11 | 15 | 28 | Frignano                 |  |  |  | 101  | 6 4.82    |
| 3       | 1907                           | 04 | 25 | 04 | 52 |    | Veronese                 |  |  |  | 122  | 6 4.79    |
| NF      | 1908                           | 07 | 10 | 02 | 13 | 35 | Carnia                   |  |  |  | 119  | 7-8 5.31  |
| F       | 1909                           | 01 | 13 | 00 | 45 |    | Emilia Romagna orientale |  |  |  | 867  | 6-7 5.36  |
| 3-4     | 1914                           | 10 | 27 | 09 | 22 |    | Lucchesia                |  |  |  | 660  | 7 5.63    |
| 4       | 1919                           | 06 | 29 | 15 | 06 | 13 | Mugello                  |  |  |  | 565  | 10 6.38   |
| 4       | 1920                           | 09 | 07 | 05 | 55 | 40 | Garfagnana               |  |  |  | 750  | 10 6.53   |
| 4       | 1923                           | 06 | 28 | 15 | 12 |    | Modenese                 |  |  |  | 22   | 6 5.04    |
| NF      | 1930                           | 10 | 30 | 07 | 13 |    | Senigallia               |  |  |  | 268  | 8 5.83    |
| 4       | 1937                           | 09 | 17 | 12 | 19 | 05 | Parmense                 |  |  |  | 34   | 7 4.77    |
| 6       | 1971                           | 07 | 15 | 01 | 33 | 23 | Parmense                 |  |  |  | 228  | 8 5.51    |
| 4       | 1972                           | 10 | 25 | 21 | 56 | 1  | Appennino settentrionale |  |  |  | 198  | 5 4.87    |
| 4       | 1983                           | 11 | 09 | 16 | 29 | 52 | Parmense                 |  |  |  | 850  | 6-7 5.04  |
| NF      | 1984                           | 04 | 29 | 05 | 02 | 59 | Umbria settentrionale    |  |  |  | 709  | 7 5.62    |
| F       | 1986                           | 12 | 06 | 17 | 07 | 1  | Ferrarese                |  |  |  | 604  | 6 4.43    |
| 5       | 1987                           | 04 | 24 | 02 | 30 | 2  | Reggiano                 |  |  |  | 54   | 6 4.64    |
| 6       | 1987                           | 05 | 02 | 20 | 43 | 5  | Reggiano                 |  |  |  | 802  | 6 4.71    |
| 6       | 1988                           | 03 | 15 | 12 | 03 | 1  | Reggiano                 |  |  |  | 160  | 6 4.57    |
| 6       | 1996                           | 10 | 15 | 09 | 55 | 5  | Pianura emiliana         |  |  |  | 135  | 7 5.38    |
| 4       | 1996                           | 10 | 26 | 04 | 56 | 0  | Pianura emiliana         |  |  |  | 63   | 5-6 3.94  |
| 4       | 1996                           | 10 | 26 | 06 | 50 | 2  | Pianura emiliana         |  |  |  | 35   | 5-6 3.63  |
| 5       | 1996                           | 11 | 25 | 19 | 47 | 5  | Pianura emiliana         |  |  |  | 65   | 5-6 4.29  |
| 4       | 1997                           | 05 | 12 | 22 | 13 | 0  | Pianura emiliana         |  |  |  | 56   | 4-5 3.68  |
| 5       | 1998                           | 02 | 21 | 02 | 21 | 0  | Pianura emiliana         |  |  |  | 104  | 5 3.93    |
| 5       | 2012                           | 01 | 25 | 08 | 06 | 3  | Pianura emiliana         |  |  |  | 25   | 5-6 4.98  |

Figura 12- rappresentazione grafica degli eventi sismici con Magnitudo>5 registrati nei dintorni del territorio di Guastalla (RE)  
 (<http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>).

Località vicine (entro 10km)

| Località       | EQs | Distanza (km) |
|----------------|-----|---------------|
| Gualtieri      | 19  | 3             |
| Dosolo         | 15  | 4             |
| Pieve Saliceto | 1   | 5             |
| Pomponesco     | 12  | 5             |
| Luzzara        | 26  | 5             |
| San Rocco      | 1   | 5             |
| San Bernardino | 1   | 6             |
| Casoni         | 1   | 7             |
| Villarotta     | 1   | 7             |
| Santa Vittoria | 2   | 8             |
| Boretto        | 14  | 8             |
| Brugneto       | 2   | 9             |
| Codisotto      | 1   | 9             |
| Santa Croce    | 2   | 9             |
| Meletole       | 2   | 10            |
| Cizzolo        | 1   | 10            |

Figura 13- Eventi sismici con Magnitudo>5 registrata in località entro i 10 km dal territorio di Guastalla (RE)  
 (<http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>).

Dall'analisi congiunta dei dati risulta che gli eventi che hanno avuto maggiori risentimenti in zona sono stati quelli provenienti dalle zone dell'Appennino Tosco-Ligure, Friuli-Carnia, Alpagò-Cansiglio, Asolo, Colli Veronesi, ed anche dell'Umbria settentrionale Emilia Romagna e l'Abruzzo.

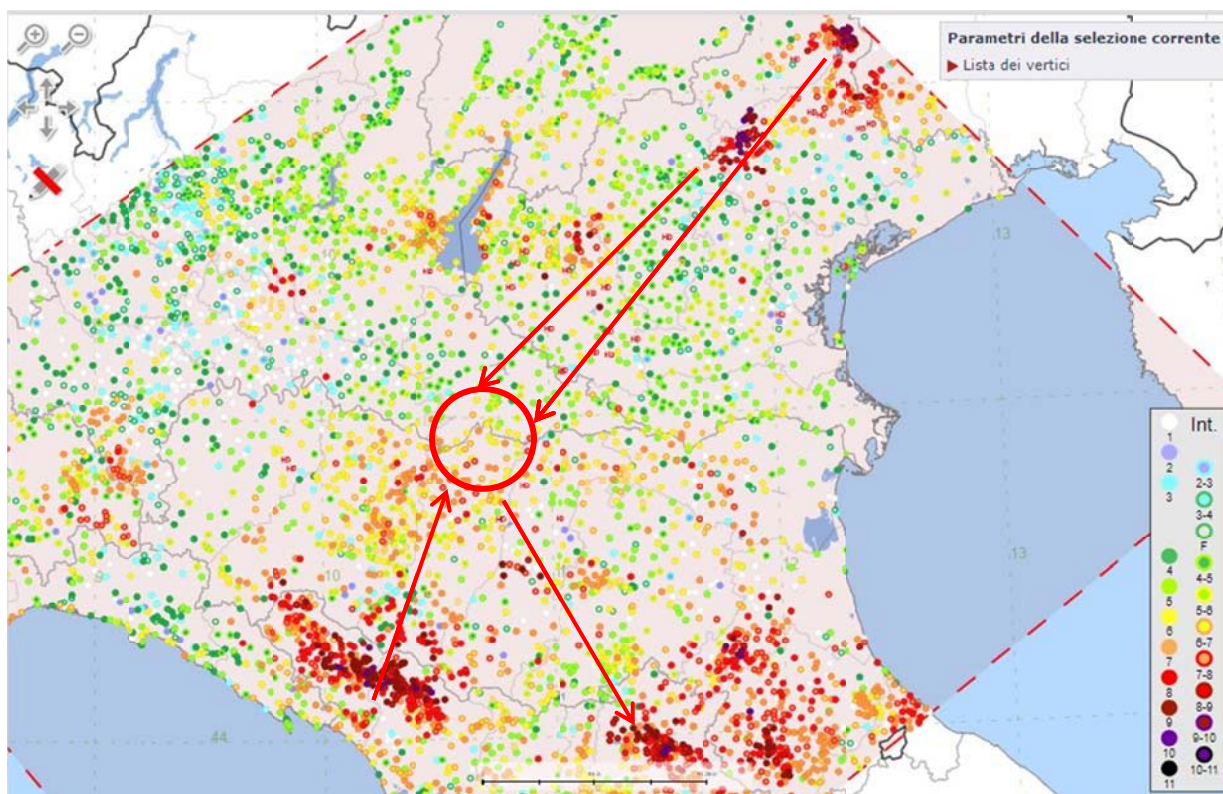


Figura 14- Carta della sismicità storica per la zona di Guastalla-Dosolo (cerchiata in rosso) (da SLEJKO D., 2006).

Nella tabella che segue sono riportati i terremoti principali indicate in precedenza, con magnitudo ( $M$ )  $\geq 5,0$  con le coordinate geografiche degli ipocentri.

| Effetti | In occasione del terremoto del |                  |      |      |      |  |
|---------|--------------------------------|------------------|------|------|------|--|
| Int.    | Anno Me Gi Ho Mi Se            | Area epicentrale | NMDP | Io   | Mw   |  |
| 10      | 1920 09 07 05 55 40            | Garfagnana       | 750  | 10   | 6.53 |  |
| 10      | 1919 06 29 15 06 13            | Mugello          | 565  | 10   | 6.38 |  |
| 10      | 1695 02 25 05 30               | Asolano          | 107  | 10   | 6.40 |  |
| F       | 1873 06 29 03 58               | Alpago Cansiglio | 197  | 9-10 | 6.29 |  |

Tabella 1: terremoti principali registrati nell'area d'indagine con magnitudo ( $M$ )  $\geq 5,0$  con le coordinate geografiche degli ipocentri.

### 3 FAGLIE CAPACI

Il Dipartimento di Protezione Civile (2015) ha emanato le “Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da Faglie Attive e Capaci (FAC)”, definite come quelle faglie per le quali sia testimoniata l'attività, con deformazione che arriva alla superficie topografica, negli ultimi 40.000 anni.

L'informazione sull'ubicazione e sulle caratteristiche delle faglie capaci è di grande importanza pratica per la pianificazione territoriale, che ne dovrebbe tenere adeguatamente conto; le strutture antropiche (infrastrutture, costruzioni) dovrebbero essere possibilmente collocate ad adeguata distanza da queste o essere progettate con opportuni accorgimenti tecnici.

Per riguarda la specifica area in esame, il catalogo ITHACA (ITaly HAZard from CAPable faults) riporta la presenza di una faglia capace a poca distanza dal ponte in esame: la faglia **PIADENA**. Questa faglia ha direzione circa NW-SE e comportamento prevalentemente inverso. A sud, sono presenti altre faglie inverse con medesima direzione e facenti parte del sistema di faglie pedemontano Alpino-appeninico comprendenti l'intera area tra Forlì e Milano (**Figura 15**).

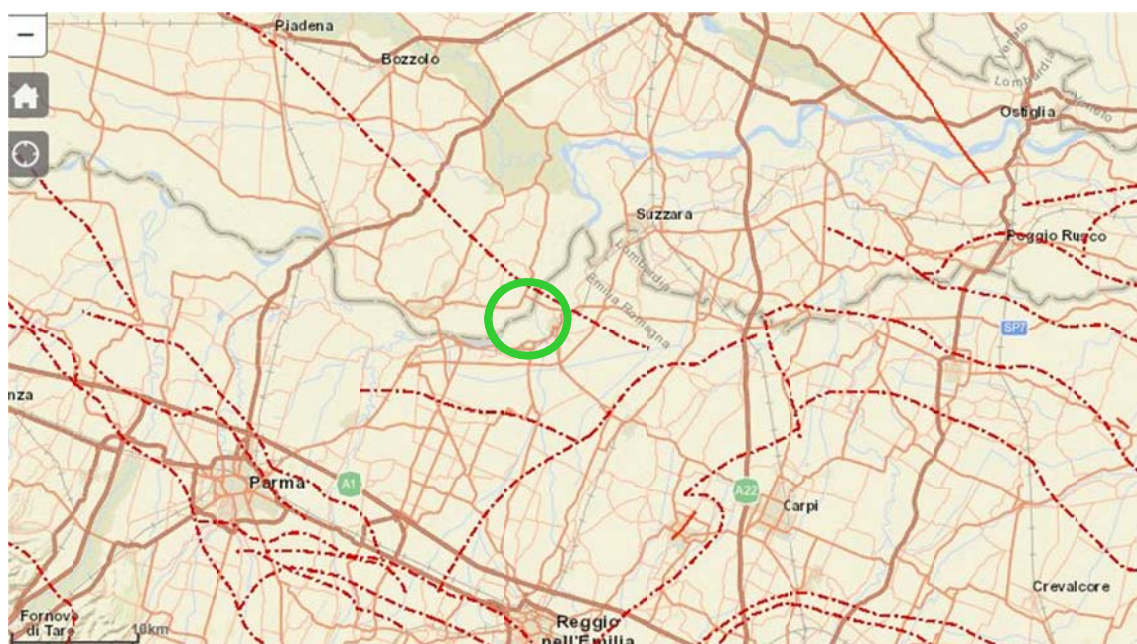


Figura 15- ubicazione delle faglie capaci nella zona di Marghera: non sono presenti faglie capaci negli immediati dintorni dell'area di Guastalla-Dosolo (da sito ISPRA – ITHACA: <http://www.isprambiente.gov.it/it/progetti/ithaca-catalogo-delle-faglie-capaci>).

## 4 CARATTERIZZAZIONE SISMOGENETICA

La pericolosità sismica di un'area è intesa come la probabilità che un dato valore di scuotimento del terreno, espresso con parametri fisici (picco di accelerazione orizzontale, picco di velocità, picco di spostamento, accelerazione spettrale) possa essere superato in un certo lasso di tempo a seguito di un terremoto. La pericolosità sismica insieme alla vulnerabilità e al valore esposto in un'area rappresenta la grandezza fondamentale per la definizione del rischio sismico inteso come la probabilità che un dato valore di danno possa essere superato in un certo intervallo di tempo a seguito di un evento sismico (Elementi di calcolo della pericolosità D. Slejko).

Il punto di riferimento per la valutazione della pericolosità di base del territorio italiano era rappresentato, fino al 2002 dalla zonazione sismogenetica ZS4 (Meletti et al., 2000 Scandone e Stucchi 2000). Successivamente, i nuovi sviluppi e ricerche nell'ambito della sismogenesi (INGV-AA.VV 2004) hanno evidenziato alcune incongruenze e la scarsa compatibilità con alcuni cataloghi di terremoti. Pertanto è stato proposto un nuovo modello di zonazione sismogenetica denominato ZS9. Tale zonazione ha apportato alcune modifiche al modello iniziale con il raggruppamento e l'introduzione di nuove zone sismogenetiche (**vedi figura 16**).

Secondo la zonazione sismogenetica ZS9, utilizzata per compilare la mappa della pericolosità sismica in riferimento all'OPCM 3519/2006, l'area ricade ad una distanza di circa 50 km a sud dalla Zona Sismogenetica n° 906 – Garda e Veronese, circa 30 km a nord-est dalla n° 911 e 12 km a nord-ovest dalla zona n° 912 Friuli Veneto orientale (Figura 16). La zona d'indagine si trova dunque al di fuori delle zone proprie della ZS9, ma comunque racchiusa tra i sistemi alpino, dove si manifesta il massimo raccorciamento nella collisione tra placca europea e microplacca adriatica a Sud, comprendente le Z906, ed appenninico, dove si trovano le aree più attive dal punto di vista sismica del centro nord-ovest italico.

Per quanto riguarda la zona 911 (indicata "Tortona-Bobbio"), in cui rientra il comprendente il cosiddetto "arco di Pavia" e le strutture ad esso relative, essa rappresenta il limite settentrionale dell'arco appenninico, costituendo un ruolo di svincolo tra il sistema alpino e quello appenninico; il meccanismo di fagliazione prevalente risulta essere trascorrente; a tale zona sismogenetica viene associata una Magnitudo massima  $M_{wmax1} = 5,68$

Riguardo alla ZS 913 - Appennino Emiliano-Romagnolo che ricade in una fascia di transizione a carattere misto in cui convivono meccanismi diversi (essenzialmente compressivi a NW e distensivi a SE); si possono altresì avere meccanismi trascorrenti nelle zone di svincolo che dissecano la continuità longitudinale delle strutture. I terremoti storici raramente hanno raggiunto valori molto elevati di magnitudo; nella zona sismogenetica 913 è previsto, sulla base dei meccanismi focali, valori di massima magnitudo pari a  $M_{wmax1} = 5,91$ .

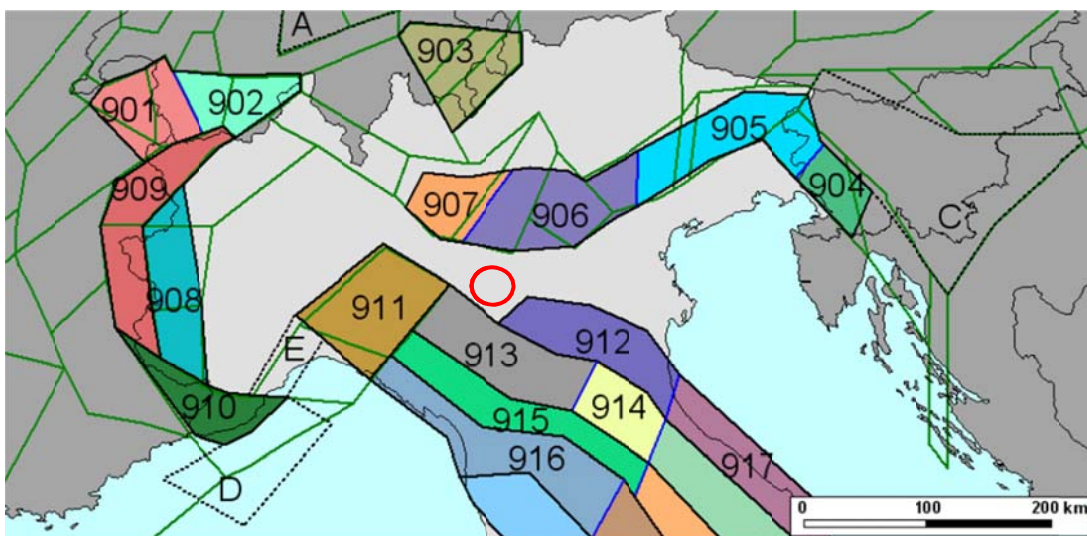


Figura 16- Dettaglio dell'estensione delle zone sismogenetiche del nord Italia. L'area d'indagine risulta vicina alle ZS 906-911-912 (rappresentata in AZZURRO).

Il meccanismo di fagliazione responsabile dei terremoti che avvengono nella ZS906 e ZS912 è di tipo faglia inversa (**Figura 17**), con una profondità efficace compresa tra 5 e 12 km (figura 18), mentre per la ZS913 il meccanismo principale e la fagliazione diretta con profondità epicentrale compresa tra 12 e 20 km.

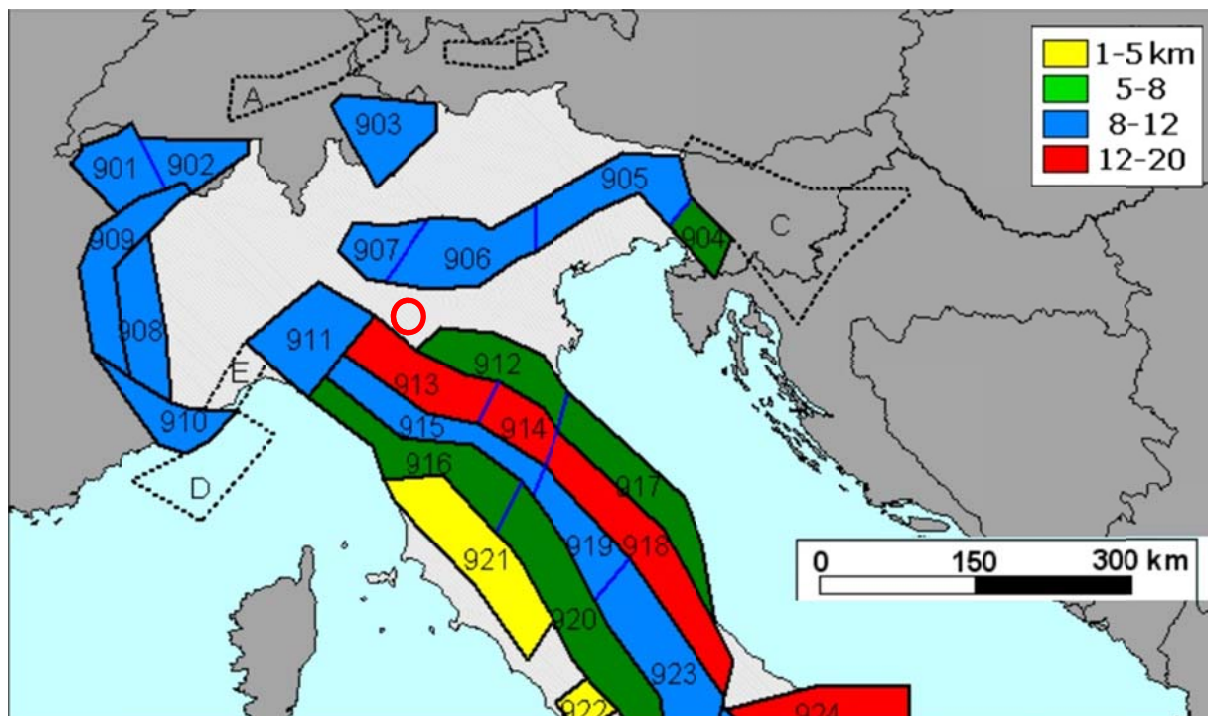


Figura 17- Zonazione sismogenetica dell'Italia settentrionale. I colori si riferiscono alla profondità ipocentrale media (Meletti C., Valensise G., 2004).

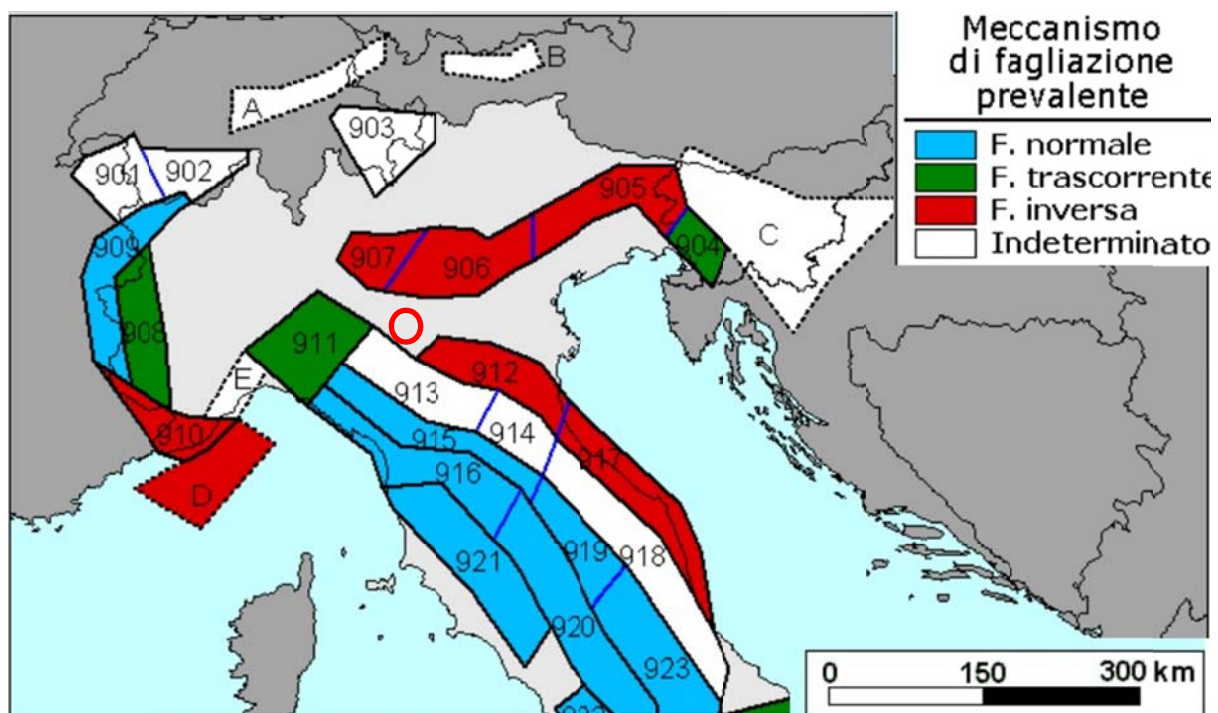


Figura 18- Zonazione sismogenetica dell'Italia settentrionale. I colori si riferiscono al meccanismo di fagliazione (Meletti C., Valensise G., 2004).

## 5 INDAGINI ESEGUITE E METODOLOGIA

È stata condotta una campagna di indagini geologiche e geofisiche a supporto del presente Studio di Vulnerabilità Sismica. Di seguito si riporta lo schema di ubicazione delle indagini:



Figura 19- mappa di ubicazione delle indagini.

Le indagini sismiche sono state eseguite nell'immediato intorno delle opere di fondazione più prossime al letto del Fiume Po' e su entrambe le sponde (Pila 10 lato Reggio Emilia, Pila 6 lato Mantova) , al molteplice scopo di:

- Ricavare i parametri sismici e lo spettro elastico locali, la velocità media delle onde S nei primi 30 metri di sottosuolo e dunque la Categoria Sismica, ed il Fattore di Amplificazione per il sito d'indagine secondo NTC 2018;
- Confrontare i parametri sismici ricavati secondo normativa NTC 2018 con quelli ottenuti dallo studio di risposta sismica locale;
- L'individuazione del modo fondamentale di vibrare del sito in caso di sisma, da confrontare con il primo modo di vibrare del Ponte in esame;

Per ricavare i parametri sismici (categoria sismica del sottosuolo e velocità media delle onde S nei primi 30 metri ovvero il parametro  $V_{s30}$ ) l'approccio utilizzato è stato l'analisi congiunta di curve di dispersione derivanti da misure MASW e curve H/V, avendo cura di far coincidere il più fedelmente possibile le curve di dispersione del modello con i segnali dello spettro di velocità e fare contestualmente coincidere la frequenza del principale picco della curva H/V (quello che tipicamente è legato al più profondo contatto litologico "significativo"). Si è fatto, inoltre, riferimento ai risultati delle indagini geognostiche (vedi "Relazione sulle indagini Geognostiche") sulla effettiva natura del terreno nei primi 50-60 m da p.c.

La correlazione , dunque , fra i dati gesostratigrafici, la velocità delle onde S, la dispersione delle onde di Rayleigh e l'analisi dei microtremiti, ha permesso di ricostruire il modello sismogeostatigrafico che risulta piuttosto vincolato e significativo.

E' stata poi condotta un'analisi di Risposta Sismica Locale monodimensionale con il metodo lineare equivalente, dalla quale è stato ricavato lo Spettro di RS locale .

| INDAGINE                     | DESCRIZIONE   | PARAMETRI  |
|------------------------------|---|--|
| MASW<br>n.2<br>(120.0 m tot) | Prospezione geofisica col metodo sismico MASW per l'esecuzione di profili sismici con allineamenti unitari di 12 geofoni con numero di 5 tiri per BASE (esterna)                  | Vs, Vs30, Modulo di deformazione al taglio (G0), Modulo edometrico (Ed), Modulo di compressibilità volumetrica (M0), Modulo di Young (E) |
| HVSR<br>n.2                  | misura a stazione singola con tecnica passive HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) per l'analisi del microtremore sismico con registrazione temporale minima di 20 minuti | Frequenza di risonanza del sito, validazione dei dati ottenuti dalle altre due tecniche d'indagine, profilo Vs puntuale                  |

Tabella 2 :riepilogo dell'indagini geognostiche effettuate nel mese di Maggio 2021

## 5.1 INDAGINE SISMICA MASW

Il metodo MASW si basa sull'analisi della dispersione del segnale. Secondo l'ipotesi fondamentale della fisica lineare (Teorema di Fourier) i segnali possono essere rappresentati come la somma di segnali indipendenti, dette armoniche del segnale. Tali armoniche, per analisi monodimensionali, sono funzioni trigonometriche seno e coseno, e si comportano in modo indipendente non interagendo tra di loro. Concentrando l'attenzione su ciascuna componente armonica il risultato finale in analisi lineare risulterà equivalente alla somma dei comportamenti parziali corrispondenti alle singole armoniche. L'analisi di Fourier (analisi spettrale FFT) è lo strumento fondamentale per la caratterizzazione spettrale del segnale. L'analisi delle onde di Rayleigh, mediante tecnica MASW, viene eseguita con la trattazione spettrale del segnale nel dominio trasformato dove è possibile, in modo abbastanza agevole, identificare il segnale relativo alle onde di Rayleigh rispetto ad altri tipi di segnali, osservando, inoltre, che le onde di Rayleigh si propagano con velocità che è funzione della frequenza. Il legame velocità frequenza è detto spettro di dispersione. La curva di dispersione individuata nel dominio f-k è detta curva di dispersione sperimentale, e rappresenta in tale dominio le massime ampiezze dello spettro.

E' possibile simulare, a partire da un modello geotecnico sintetico caratterizzato da spessore, densità, coefficiente di Poisson, velocità delle onde S e velocità delle Onde P, la curva di dispersione teorica la quale lega velocità e lunghezza d'onda secondo la relazione:

$$v = \lambda \times f$$

Modificando i parametri del modello geotecnico sintetico, si può ottenere una sovrapposizione della curva di dispersione teorica con quella sperimentale: questa fase è detta di inversione e consente di determinare il profilo delle velocità in mezzi a differente rigidità.

Sia nella curva di inversione teorica che in quella sperimentale è possibile individuare le diverse configurazioni di vibrazione del terreno. I modi per le onde di Rayleigh possono essere: deformazioni a contatto con l'aria, deformazioni quasi nulle a metà della lunghezza d'onda e deformazioni nulle a profondità elevate.

Le onde di Rayleigh decadono a profondità circa uguali alla lunghezza d'onda. Piccole lunghezze d'onda (alte frequenze) consentono di indagare zone superficiali mentre grandi lunghezze d'onda (basse frequenze) consentono indagini a maggiore profondità.

L'indagine sismica attiva è stata effettuata con il metodo MASW, impiegando un array digitale (SoilSpy Rosina, Micromed spa), collegato a geofoni verticali a frequenza propria di 4.5 Hz. La digitalizzazione del segnale avviene direttamente sui geofoni, il che elimina la possibilità di fenomeni di cross-talk lungo il cavo, migliorando il rapporto segnale-rumore. Le acquisizioni sono state condotte a frequenza di campionamento di 512 Hz.

L'elaborazione dei dati, acquisiti mediante metodo attivo (energizzazione su piastra), è stata effettuata con il software *Grilla* di Moho Instruments SRL per il processing della dispersione delle velocità delle onde S generate artificialmente. Sono stati generalmente utilizzati un *range* di frequenze da 5 a 65 Hz, ed un *range* di velocità da 100 a 800 m/sec. La definizione del modello sintetico è stata supportata da un'operazione di *picking*; la successiva inversione si è basata su un numero di iterazioni pari a 1000. Sono stati analizzati la percentuale di errore (molto bassa, 0.002%) ed il fattore di disadattamento della soluzione (0.005).

Le indagini hanno riguardato i sedimenti di fondazione delle strutture in esame.



Figura 20: Indagine MASW presso Golena Mantovana



*Figura 21: Indagine MASW presso Golena Emiliana.*

Per la prova MASW si sono eseguiti **nr. 2** stendimenti con direzione circa nord-ovest/sud-est, l'uno al di sotto dei cavalcavia al livello della Pila 5 in Golena Mantovana, e l'altro in prossimità della pila 10 presso il lato Emiliano. Si è energizzato in tutti e due i casi in testa allo stendimento, alla distanza di 5 m dal primo geofono. La sorgente sismica utilizzata è consistita in una massa battente di 5 Kg. La durata della registrazione è stata di 5 s a partire dal superamento del valore di soglia.

Le due finestre temporali multicanale ottenute sono state elaborate nel dominio frequenza-velocità di fase al fine di discriminare l'energia associata alle onde di Rayleigh.

## MASW 1

Start recording: 05/05/21 12:30:24

End recording: 05/05/21 12:47:12

Trace length: 0h16'46"

Analysis performed on the entire trace.

Sampling rate: 256 Hz

Channel labels: TR1+ TR1-; TR2+ TR2-; TR3+ TR3-; TR4+ TR4-; TR5+ TR5-; TR6+ TR6-; TR7+ TR7-; TR8+ TR8-; TR9+ TR9-; TR10+TR10; TR11+TR11; TR12+TR12

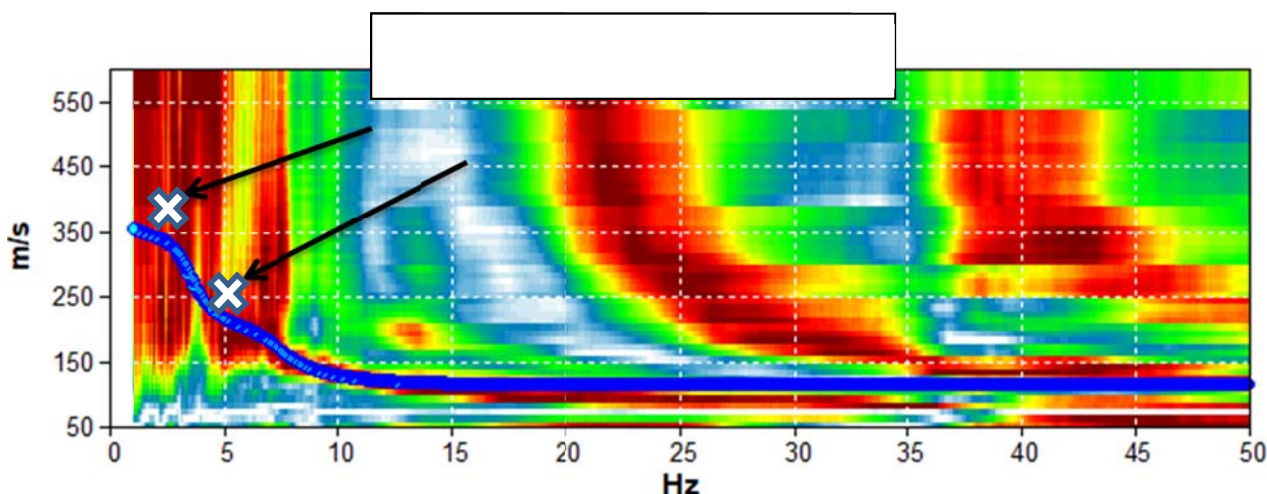


Figura 22- Grafico a contour: spettri di velocità di fase dell'onda di Rayleigh per lo stendimento MASW1. Linea azzurra: primo modo della curva di dispersione teorica per il modello di sottosuolo proposto per il sito. Il modello di sottosuolo a frequenze minori (maggiori profondità) è derivato dal fit congiunto delle prove in array e delle prove H/V.

A partire dalla legge fisica  $\lambda f = V$  (ove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda,  $f$  la frequenza e  $V$  la velocità) e considerato che la capacità di penetrazione nel sottosuolo di questi metodi in array è all'incirca  $\lambda/2$ , si ottengono informazioni relative ai cambi di litologia nel sottosuolo, ove la curva stessa riscontri un cambio di pendenza. Nel caso in esame si riscontra:

- Un primo significativo cambio di pendenza che si identifica a circa 5Hz ed indica la presenza di uno strato di spessore circa 7 metri ed avente velocità di circa 120 m/s;
- Un secondo cambio stratigrafico a circa 2.0 Hz legato al passaggio tra argille prevalenti (tra 0.0 e 7.0 m dal p.c.) e sabbie prevalenti (presenti tra 7.0 m da p.c. e 29.0 m dal p.c.).

Ne risulta così che la Velocità media equivalente delle onde S nei primi 30 metri dal p.c. è di **circa 192 m/s**.

Il valore definitivo di  $V_{s30eq}$  e la restante parte del modello di sottosuolo sono state derivate dopo l'elaborazione delle rimanenti prove sismiche.

| Depth at the bottom of the layer [m] | Thickness [m] | Vs [m/s] | Poisson ratio |
|--------------------------------------|---------------|----------|---------------|
| 7.00                                 | 7.00          | 120      | 0.50          |
| 29.00                                | 22.00         | 230      | 0.49          |
| inf.                                 | inf.          | 390      | 0.46          |

Tabella 3: sismostratigrafia da indagine MASW1

Da cui risulta :  $V_{s\_eq}(0.0-30.0)=192 \text{ m/s}$

VELOCITA' ONDE SISMICHE

| Metri da p.c. | Litologia prevalente |
|---------------|----------------------|
| -7,0          | Argille e Limi       |
| -29,0         | Sabbie               |
| oltre         | Ghiaie               |

SISMOSTRATIGRAFIA

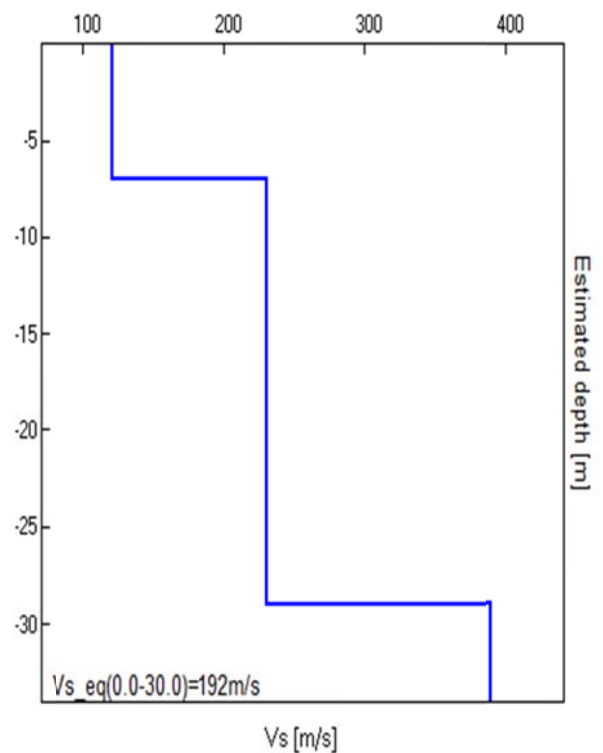


Figura 23: sismostratigrafia da indagine sismica MASW 1.

## MASW 2

Start recording: 05/05/21 14:43:31      End recording: 05/05/21 14:44:42

Trace length: 0h00'03".      Analysis performed on the entire trace.

Sampling rate: 128 Hz

Channel labels: TR01 +TR01; TR02 +TR02; TR03 +TR03; TR04 +TR04; TR05 +TR05; TR06 +TR06; TR07 +TR07; TR08 +TR08; TR09 +TR09; TR10 +TR10; TR11 +TR11; TR12 +TR12

Array geometry (x): 0.0 5.2 10.4 15.6 20.8 26.0 31.2 36.4 41.6 46.8 52.0 57.2 m.

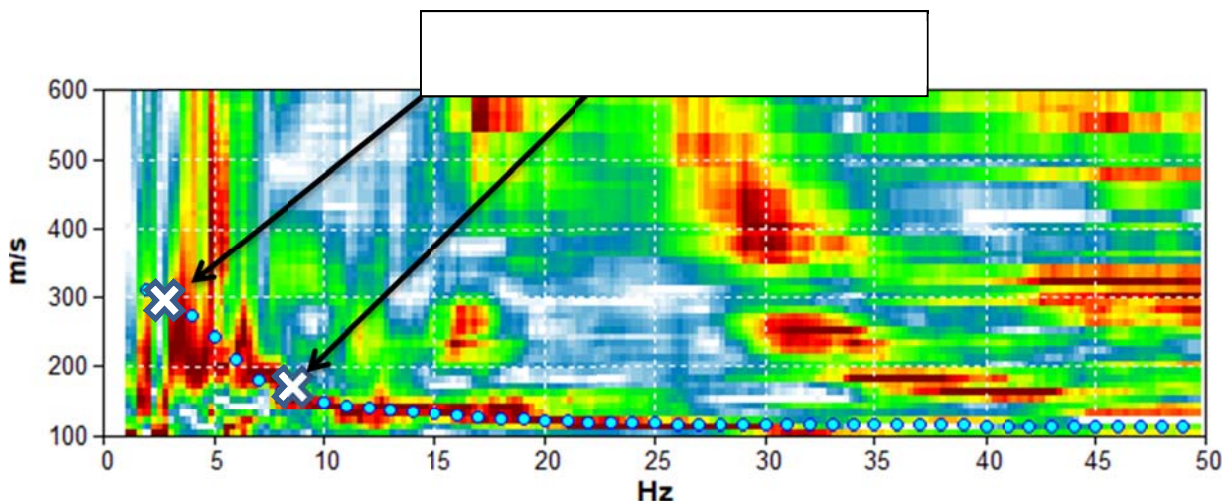


Figura 24- Grafico a contour: spettri di velocità di fase dell'onda di Rayleigh per lo stendimento MASW. Linea azzurra: primo modo della curva di dispersione teorica per il modello di sottosuolo proposto per il sito. Il modello di sottosuolo a frequenze minori (maggiori profondità) è derivato dal fit congiunto delle prove in array e delle prove H/V.

In questo caso, a partire dalla legge fisica  $\lambda f = V$  (ove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda,  $f$  la frequenza e  $V$  la velocità) e considerato che la capacità di penetrazione nel sottosuolo di questi metodi in array è all'incirca  $\lambda/2$ , si ottengono informazioni relative ai cambi di litologia nel sottosuolo, ove la curva stessa riscontri un cambio di pendenza. Nel caso in esame si riscontra:

- Un primo significativo cambio di pendenza che si identifica a circa 8Hz ed indica la presenza di uno strato di spessore circa 3.5 metri ed avente velocità di circa 120 m/s;
- Un secondo cambio stratigrafico a circa. 4.0 Hz legato al passaggio tra argille prevalenti (tra 0.0 e 3.5 m dal p.c.) e sabbie limose prevalenti (presenti tra 3.5 m da p.c. e 11.50 m dal p.c).
- Un terzo cambio stratigrafico a circa. 1.5 Hz legato al passaggio tra sabbie limose prevalenti (tra 3.5 m e 11.50 m dal p.c.) e sabbie prevalenti (presenti tra 11.5 m da p.c. e 31.50 m dal p.c).

Ne risulta così che la Velocità media equivalente delle onde S nei primi 30 metri dal p.c. è di **circa 205 m/s**.

Il valore definitivo di  $V_{s30eq}$  e la restante parte del modello di sottosuolo sono state derivate dopo l'elaborazione delle rimanenti prove sismiche.

| Depth at the bottom of the layer [m] | Thickness [m] | Vs [m/s] | Poisson ratio |
|--------------------------------------|---------------|----------|---------------|
| 3.50                                 | 3.50          | 120      | 0.49          |
| 11.50                                | 8.00          | 160      | 0.49          |
| 31.50                                | 20.00         | 275      | 0.48          |
| inf.                                 | inf.          | 350      | 0.47          |

Tabella 4: sismostratigrafia da indagine MASW2

Da cui risulta:  $V_{s\_eq}(0.0-30.0)=205\text{m/s}$

VELOCITA' ONDE SISMICHE

| Metri da p.c. | Litologia prevalente |
|---------------|----------------------|
| -3.5          | Argille e limi       |
| -11.50        | Sabbie limose        |
| -31.50        | Sabbie               |
| oltre         | Sabbie ghiaiose      |

SISMOSTRATIGRAFIA

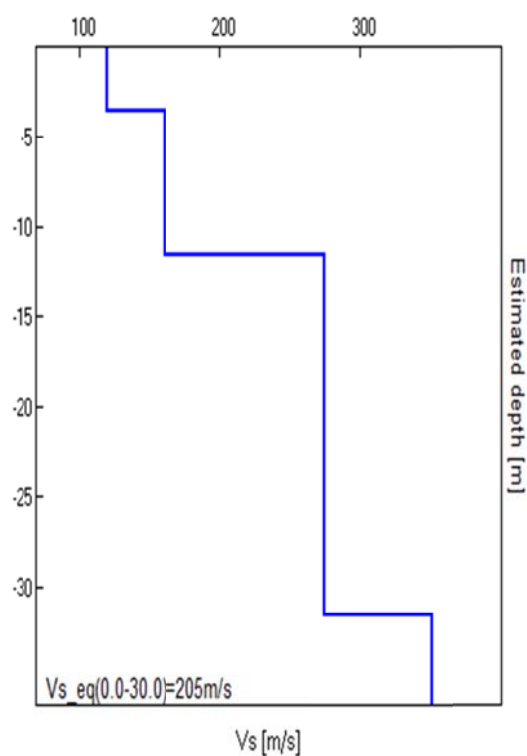


Figura 25: sismostratigrafia da indagine sismica MASW 2

## **5.2 INDAGINE SISMICA H/V**

La tecnica HVSR permette in primo luogo di valutare la frequenza di vibrazione naturale di un sito. Successivamente, come ulteriore sviluppo, la stima del parametro normativo Vs30 attraverso un processo di inversione del problema iniziale. Le ipotesi alla base della tecnica sono: una concentrazione del contenuto in frequenza localizzato maggiormente in quelle basse (tipicamente al di sotto dei 20 Hz); assenza di sorgenti periodiche e/o con contenuto in alte frequenze; le sorgenti di rumore sono uniformemente distribuite intorno alla stazione di registrazione. Se queste sono soddisfatte, la tecnica può essere suddivisa nelle fasi che vengono di seguito illustrate.

Si esegue una registrazione del rumore ambientale lungo tre direzioni ortogonali tra loro (x,y,z) con una singola stazione. Tale registrazione deve essere effettuata, secondo le indicazioni del progetto SESAME, per una durata non inferiore ai 20 minuti.

Si esegue un'operazione detta di *windowing*, in cui le tre tracce registrate vengono suddivise in finestre temporali di prefissata durata. Secondo le indicazioni del succitato progetto SESAME tale dimensione, detta *Long Period*, deve essere almeno pari ai 20 secondi. Si ottiene così un insieme di finestre "*long*", che sono sincronizzate fra le tracce.

Queste finestre vengono filtrate in base a dei criteri che permettono di individuare l'eventuale presenza di transienti (disturbi temporanei con grandi contributi nelle frequenze alte) o di fenomeni di saturazione.

Per ciascuna delle finestre rimanenti, quindi ritenute valide, viene valutato lo spettro di Fourier. Quest'ultimo viene sottoposto a *tapering* e/o lisciamiento secondo una delle varie tecniche note in letteratura e ritenute all'uopo idonee.

Successivamente si prendono in considerazione gli spettri delle finestre relative alle tracce orizzontali in coppia. Ovvero, ogni spettro di una finestra per esempio della direzione X, ha il suo corrispettivo per le finestre nella direzione Y, vale a dire che sono relative a finestre temporali sincrone. Per ognuna di queste coppie viene eseguita una somma tra le componenti in frequenza secondo un determinato criterio che può essere, ad esempio, una semplice media aritmetica o una somma euclidea.

Per ciascuna coppia di cui sopra, esiste lo spettro nella direzione verticale Z, ovvero relativo alla finestra temporale sincrona a quelle della coppia. Ogni componente in frequenza di questo spettro viene usato come denominatore nel rapporto con quello della suddetta coppia. Questo permette quindi di ottenere il ricercato rapporto spettrale H/V per tutti gli intervalli temporali in cui viene suddivisa la registrazione durante l'operazione di *windowing*.

Eseguendo per ciascuna frequenza di tali rapporti spettrali una media sulle varie finestre, si ottiene il rapporto spettrale H/V medio, la cui frequenza di picco (frequenza in cui è localizzato il massimo valore assunto dal rapporto medio stesso) rappresenta la deducibile stima della frequenza naturale di vibrazione del sito.

L'ulteriore ipotesi che questo rapporto spettrale possa ritenersi una buona approssimazione dell'ellitticità del modo fondamentale della propagazione delle onde di Rayleigh, permette di confrontare questi due al fine di ottenere una stima del profilo stratigrafico. Tale procedura, detta di inversione, consente di definire il profilo sostanzialmente in termini di spessore e velocità delle onde di taglio. Avendo quindi una stima del profilo della velocità delle onde di taglio, è possibile valutarne il parametro normativo Vs30<sub>equivalente</sub>.

L'indagine geofisica eseguita si avvale della metodologia basata sul rapporto spettrale H/V, sopra descritta. Il valore di tale rapporto è direttamente correlato con la frequenza di risonanza determinata dal passaggio tra due strati con una differenza significativa del contrasto di impedenza (velocità delle onde e densità del materiale). Considerando due strati con differente impedenza acustica, la frequenza di risonanza è legata allo spessore e alla velocità delle onde di taglio Vs del primo strato dalla seguente relazione:  $f_r = V_{s1} / 4h$  ( $V_{s1}$  = velocità delle onde S del primo strato;  $h$  = spessore primo strato).

La sismica passiva si basa sulla misura dei microtremori che sono sempre presenti sulla superficie terrestre e sono generati da fenomeni naturali (vento, onde marine) e artificiali (attività antropiche).

La strumentazione utilizzata per la registrazione è costituita da un tromografo digitale (TROMINO della MOHO S.r.l.) dotato di tre sensori elettrodinamici (velocimetri) orientati sul piano orizzontale (N-S e E-W) e sul piano verticale (Up-Down). I dati di rumore, amplificati e digitalizzati, sono stati acquisiti alla frequenza di campionamento di 128 Hz ritenuta la più indicata per la tipologia di indagine .

Per l'Analisi spettrale delle tracce e la modellazione si è utilizzato uno specifico software dedicato (Grilla della MICROMED S.p.a), conforme alle direttive fornite dal progetto di ricerca europeo SESAME.



*Figura 26: Indagine HVSR 2 - lato Guastalla (RE)*



*Figura 27: Indagine HVSR 1 – lato Dosolo (MN)*

## ***RISULTATI Indagini sismica passiva a stazione singola***

L'indagine di sismica passiva si è basata sulla misura dei microtremori che sono sempre presenti sulla superficie terrestre e sono generati da fenomeni naturali (vento, onde marine) e artificiali (attività antropiche).

Il metodo di indagine utilizzato è stato quello a stazione singola dei rapporti spettrali (HVSr).

E' stato definito il rapporto spettrale tra la componente orizzontale del rumore e quella verticale (H/V spectrum). Il valore di tale rapporto è direttamente correlato con la frequenza di risonanza determinata dal passaggio tra due strati con una differenza significativa del contrasto di impedenza (velocità delle onde e densità del materiale).

Considerando due strati con differente impedenza acustica, la frequenza di risonanza è legata allo spessore e alla velocità delle onde di taglio  $V_s$  del primo strato dalla seguente relazione:

|   |
|---|
| $f_r = V_{s1} / 4 h$                            |
| $V_{s1}$ velocità delle onde S del primo strato |
| $h$ spessore primo strato                       |

## ***HVSr 1 - PONTE DOSOLO-GUASTALLA, LATO DOSOLO***

Instrument: TZ3-0079/02-19

Data format: 32 byte

Full scale [mV]: 51

Start recording: 05/05/21 12:27:26      End recording: 05/05/21 12:47:26

Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

GPS data not available

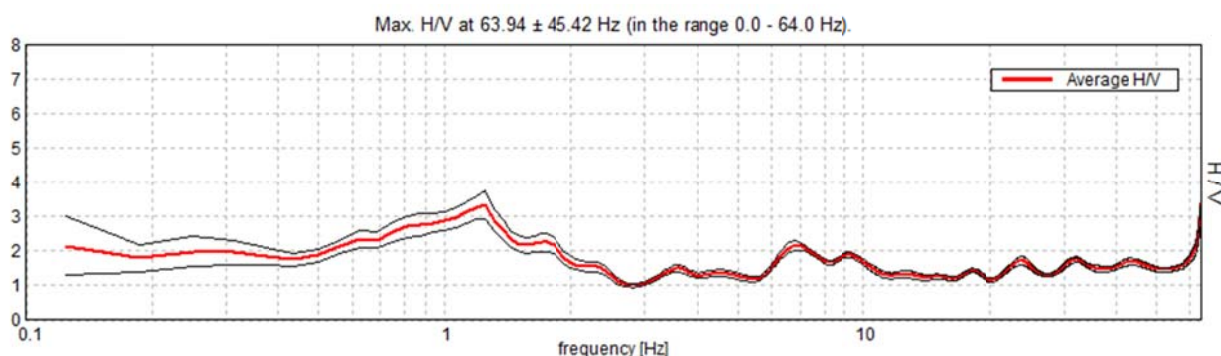
Trace length: 0h20'00".      Analysis performed on the entire trace.

Sampling rate: 128 Hz

Window size: 10 s

Smoothing type: Triangular window

Smoothing: 10



*Figura 28 HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO (HVSr 1)*

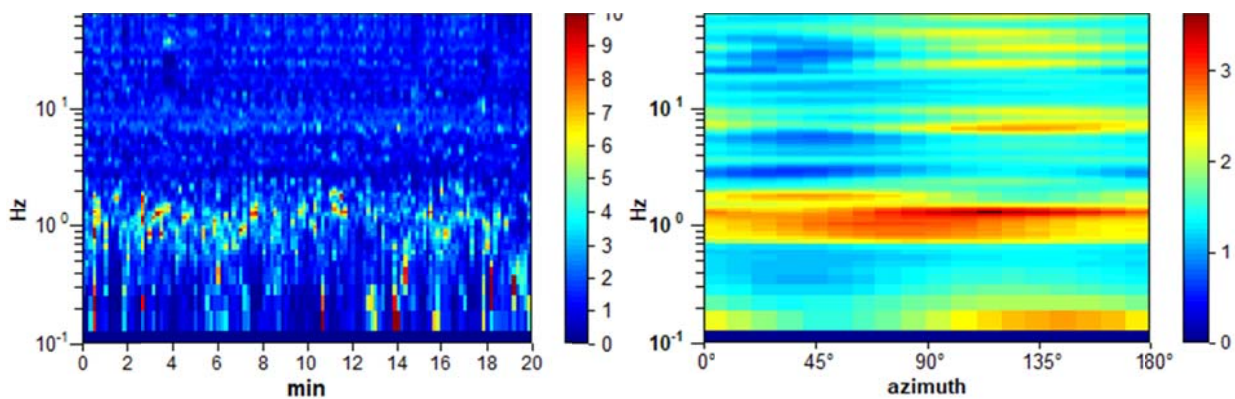


Figura 29 H/V TIME HISTORY (HVSR 1) e DIRECTIONAL H/V

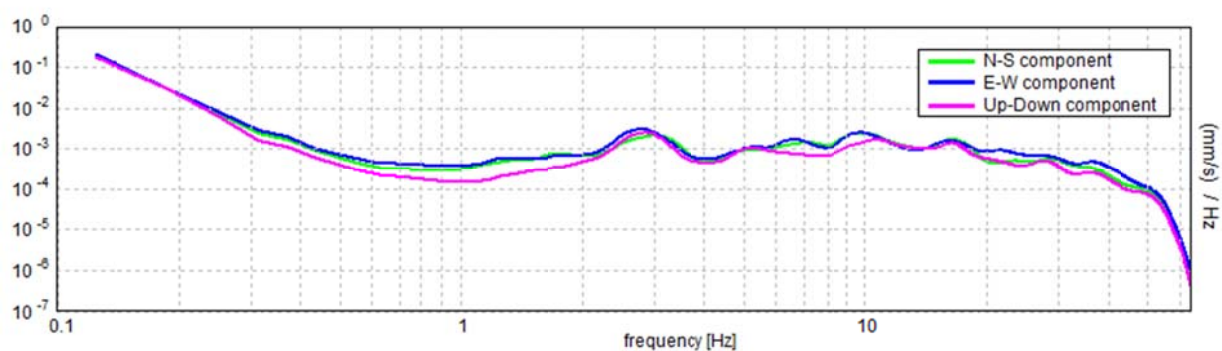


Figura 30 SINGLE COMPONENT SPECTRA (HVSR 1)

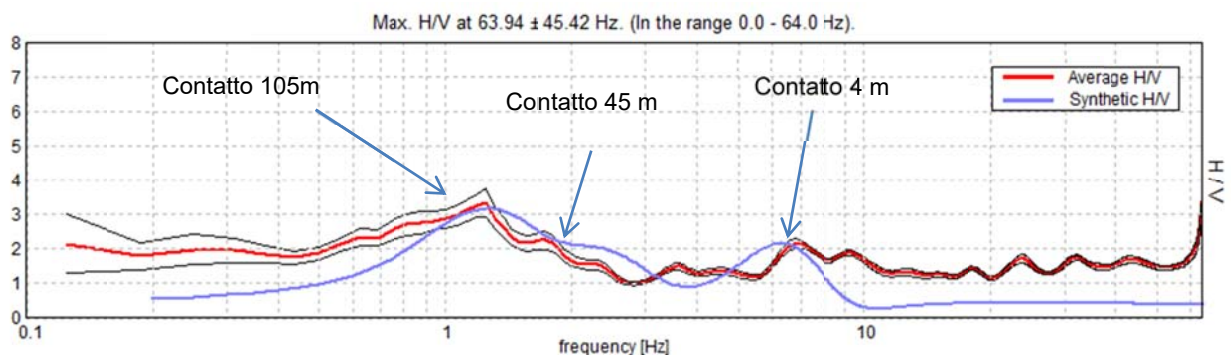


Figura 31 spettro locale Vs spettro sperimentale (HVSR 1)

| Depth at the bottom of the layer [m]                                  | Thickness [m] | Vs [m/s] | Vs30 [m/s] |
|---|---------------|----------|------------|
| 4.00  | 4.00          | 110      | 305        |
| 14.00   | 10.00         | 190      |            |
| 45.00   | 31.00         | 280      |            |
| 105.00  | 60.00         | 400      |            |
| inf.  | inf.          | 600      |            |
| FREQUENZE DI RISONANZA DEL TERRENO = f0 1.2 Hz ; f1 2.0 Hz ; f2 7 Hz; |               |          |            |
| PERIODI PROPRIO DEL TERRENO = T0 0.83 s ; T1 0.50s ; T2 0.14 s        |               |          |            |
| AMPLIFICAZIONE DEL TERRENO = fino a 3                                 |               |          |            |
| PROFONDITA' DEL SUOLO RIGIDO (ghiaie) = 105.0 m da p.c.               |               |          |            |

TABELLA 5 Riepilogo risultati Indagine Sismica HVSR 1

VELOCITA' ONDE SISMICHE

| Metri da p.c. | Litologia prevalente                      |
|---------------|---|
| -4,0          | Argille e Limi                            |
| -14,0         | Sabbie Imose                              |
| -45,0         | Sabbie                                    |
| -105,00       | Sabbie ghiaiose con strati limo-argillose |
| oltre         | Ghiaie                                    |

SISMOSTRATIGRAFIA

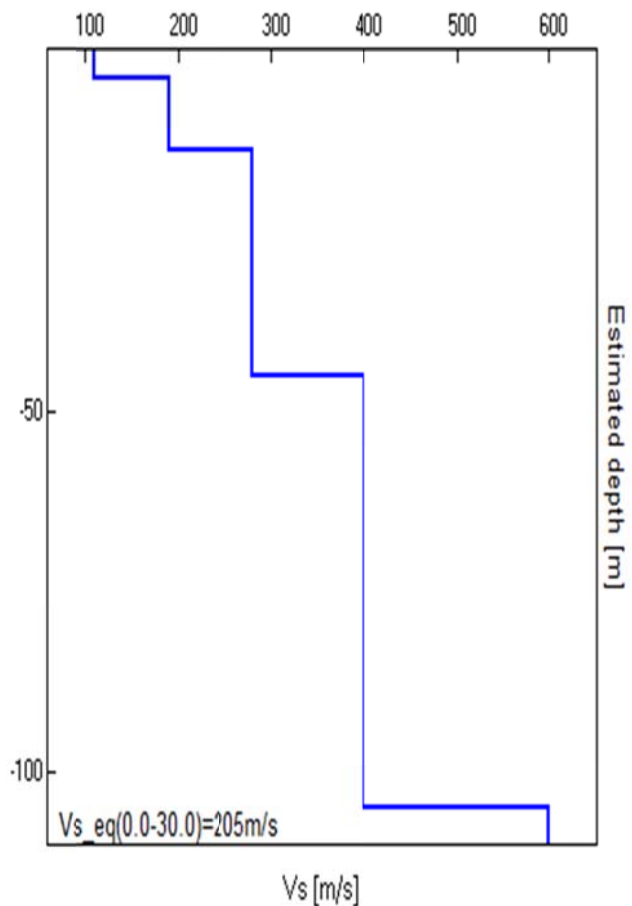


Figura 32: sismostratigrafia da indagine di sismica passive HVSR 1

**PONTE DOSOLO-GUASTALLA, LATO GUASTALLA**

Instrument: TZ3-0079/02-19

Data format: 32 byte

Full scale [mV]: 51

Start recording: 05/05/21 14:10:12 End recording: 05/05/21 14:30:12

Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

GPS data not available

Trace length: 0h20'00". Analyzed 22% trace (manual window selection)

Sampling rate: 128 Hz

Window size: 10 s

Smoothing type: Triangular window

Smoothing: 10%

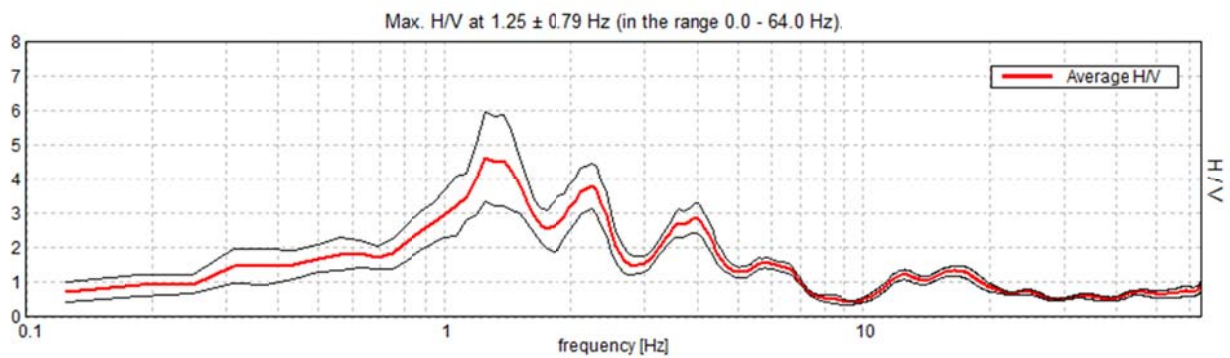


Figura 33 HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO (HVSr 2)

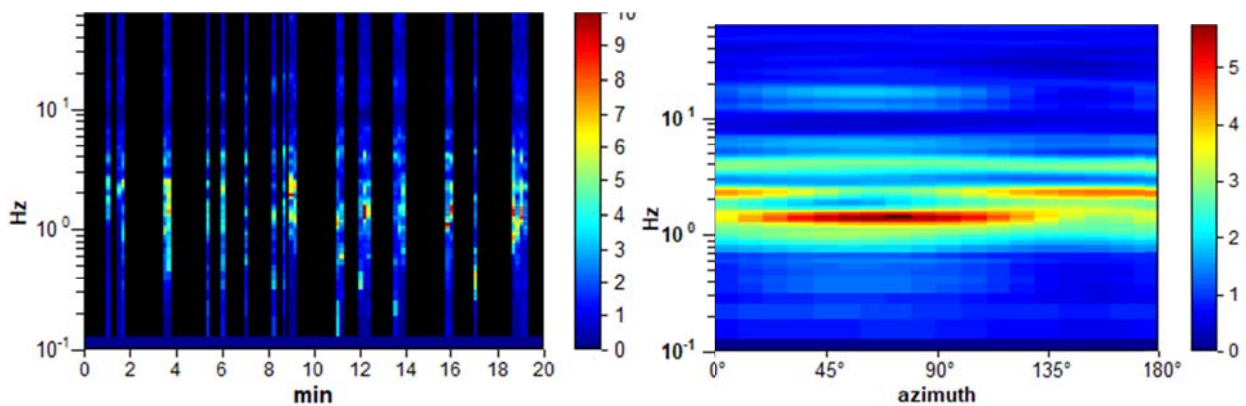


Figura 34 H/V TIME HISTORY (HVSr 2) e DIRECTIONAL H/V

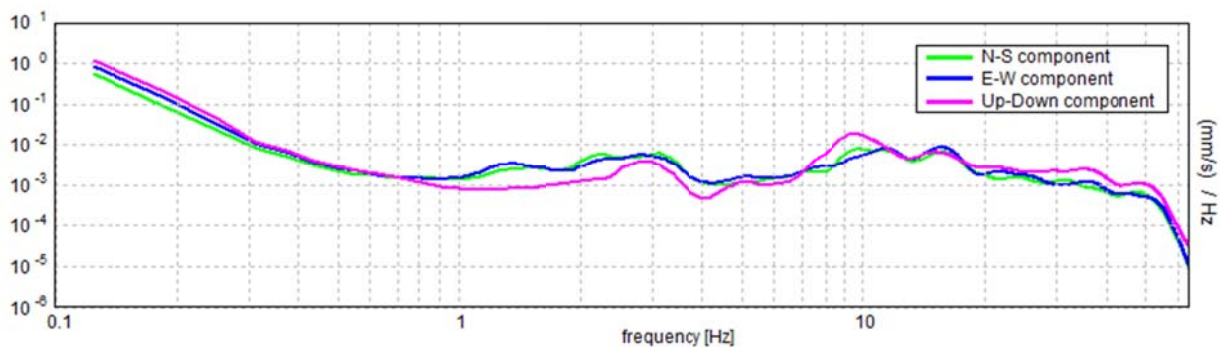


Figura 35 SINGLE COMPONENT SPECTRA (HVSr 2)

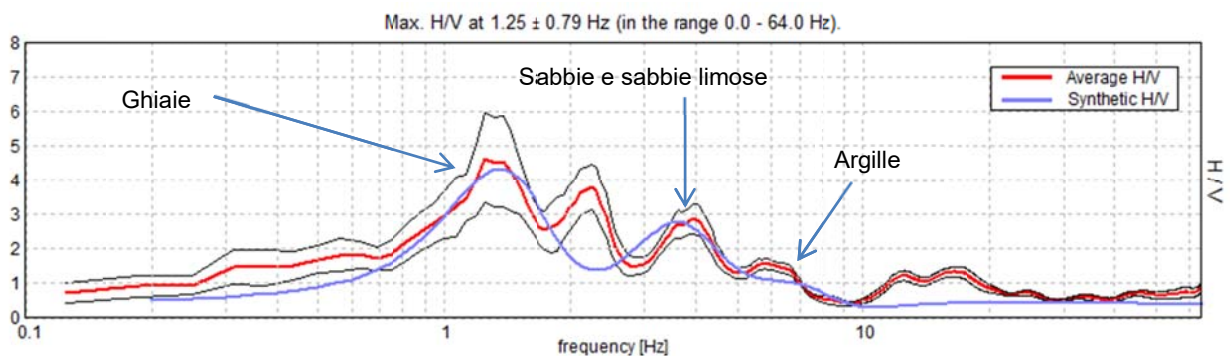


Figura 36 H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO (HVSr 2)

| Depth at the bottom of the layer [m]                                    | Thickness [m] | Vs [m/s] | Vs30 [m/s] |
|---|---------------|----------|------------|
| 5.00  | 5.00          | 120      | 302        |
| 18.00   | 13.00         | 220      |            |
| 66.00   | 48.00         | 340      |            |
| inf.  | inf.          | 550      |            |
| FREQUENZE DI RISONANZA DEL TERRENO = f0 1.5 Hz ; f1 4.0 Hz ; f2 8.0 Hz; |               |          |            |
| PERIODI PROPRIO DEL TERRENO = T0 0.67 s ; T1 0.25 s ; T2 0.12 s ;       |               |          |            |
| AMPLIFICAZIONE DEL TERRENO = fino a 4                                   |               |          |            |
| PROFONDITA' DEL SUOLO RIGIDO (ghiaie) = 70,0 m da p.c.                  |               |          |            |

TABELLA 6: Riepilogo risultati Indagine Sismica HVSR 2

VELOCITA' ONDE SISMICHE

| Metri da p.c. | Litologia prevalente |
|---------------|----------------------|
| -5,0          | Argille              |
| -18,0         | Sabbie limose        |
| -66,0         | Sabbie               |
| oltre         | Sabbie e Ghiaie      |

SISMOSTRATIGRAFIA

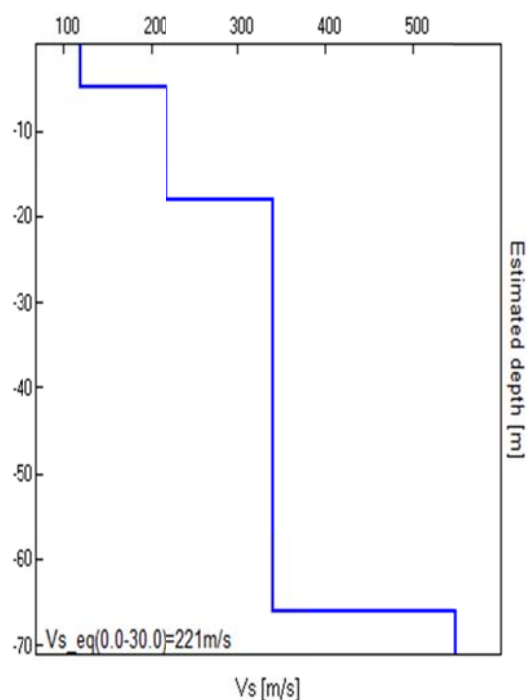


Figura 37: sismostratigrafia

## Conclusioni indagini MASW - HVSR

In definitiva, si distinguono abbastanza chiaramente alcuni picchi o depressioni significative nel rapporto spettrale H/V, che possono venire così riassunte per le 4 indagini (MASW 1-2; HVSR 1-2);

- **7.0-8.0 Hz** discontinuità sismostratigrafica legata al passaggio tra argille prevalenti (tra 0.0 e 5.0 m circa dal p.c.) e sabbie limose (presenti tra 5.0 m da p.c. e 20.0 m circa dal p.c.).
- **2.0-4.0 Hz** circa contatto tra sabbie limose prevalenti (presenti tra 9.5 m da p.c. e 35.0 m dal p.c.) e sabbie compatte prevalenti (identificate tra 5 e 20 m circa dal p.c.).
- **1.2-1.5 Hz** circa contatto tra sabbie compatte prevalenti (identificate tra 20 e 70-90 m circa dal p.c.) e primo substrato like bed-rock ovvero il contatto con terreni presumibilmente a maggior componente Ghiaiosa e di origine fluvioglaciale.

### 5.3 CATEGORIA STRATIGRAFICA E TOPOGRAFICA

In ottemperanza alla nuova normativa (DM 14/01/2008) e visto le informazioni a disposizione su terreni di fondazione vengono inseriti in via preliminare nella **Categoria di Sottosuolo C** :

*Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente addensati consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.*

Per quanto riguarda le condizioni topografiche, nella categoria **T1** (*superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione con inclinazione media  $i < 15^\circ$* ). Categoria topografica

|                         |    |
|-------------------------|----|
| Categoria di sottosuolo | C  |
| Categoria topografica   | T1 |

Tabella 7: categoria stratigrafica e topografica per la zona d'indagine.

## 6 RISPOSTA SISMICA LOCALE

La risposta sismica locale (RSL) consente di definire le modifiche che un segnale sismico subisce, a causa dalle particolari condizioni locali dovute alle caratteristiche topografiche e stratigrafiche dei depositi di terreno e degli ammassi rocciosi ed alle proprietà fisiche e meccaniche dei materiali che li costituiscono, rispetto a quello di un sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale. Nell'ambito del presente studio le analisi della risposta sismica locale sono effettuate utilizzando procedure di calcolo numerico in cui viene simulata la propagazione delle onde sismiche entro gli strati di terreno compresi tra il sottostante substrato rigido e il piano di campagna.

La **metodologia numerica** consiste nella modellazione di situazioni reali mediante un'appropriata e dettagliata caratterizzazione geometrica e meccanica del sito e nella valutazione della risposta sismica locale tramite codici di calcolo matematico più o meno sofisticati.

La valutazione della RSL monodimensionale è stata eseguita mediante analisi lineare equivalente con il software RSL III 1D (Geostru, 2019), tramite l'uso di un gruppo di 7 accelerogrammi naturali sismo-spettro compatibili estratti tramite il software REXEL 3.5 (Iervolino I., Galasso C. e Chioccarelli E. 2008-2011) a partire dalla banca dati europea ESD, e l'impiego della sismostratigrafia in termini di onde di taglio Vs e di parametri geotecnici ricavata dalle indagini MASW, HVSr e CPTU eseguite, nonché confronto con i dati di bibliografia.

### 6.1 DEFINIZIONE DELLE SCELTE PROGETTUALI

Di seguito sono riepilogati i parametri relativi alla scelta progettuale dell'analisi del sito di interesse (si considerano le coordinate al centro del letto fluviale in corrispondenza del ponte sul Po'), riferiti a costruzioni di **Classe III: Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività pericolose per l'ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d'uso IV. Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza.** [...] e di **Vita nominale** pari a **50 anni**, come definiti dalle NTC 2008. La Vita nominale deve comunque essere stabilita in fase progettuale ( $\geq 50$  anni secondo le NTC 2008) (p.to C.2.4.1 della Circolare n.617/09). (**Tabella 8**).

| Sito in esame (coordinate ED50) |           | Siti di riferimento (coordinate ED50): |           |              |                     |
|---------------------------------|-----------|--|-----------|--------------|---------------------|
| latitudine:                     | 44,937147 | Sito 1                                 | ID: 14722 | Lat: 44,9499 | Lon: 10,5957        |
| longitudine:                    | 10,636013 | Sito 2                                 | ID: 14723 | Lat: 44,9515 | Lon: 10,6662        |
| Classe:                         | 3         | Sito 3                                 | ID: 14945 | Lat: 44,9016 | Lon: 10,6686        |
| Vita nominale:                  | 50        | Sito 4                                 | ID: 14944 | Lat: 44,8999 | Lon: 10,5981        |
|                                 |           |  |           |              | Distanza: 3476,346  |
|                                 |           |  |           |              | Distanza: 2865,236  |
|                                 |           |  |           |              | Distanza: 4713,066  |
|                                 |           |  |           |              | Distanza: 5107,2098 |

| Parametri sismici               |        |        | Coefficienti Sismici |       |  |
|---------------------------------|--------|--------|----------------------|-------|--|
| Categoria sottosuolo:           | C      |        | SLO:                 |       |  |
| Categoria topografica:          | T1     |        | Ss:                  | 1,500 |  |
| Periodo di riferimento:         | 75anni |        | Cc:                  | 1,650 |  |
| Coefficiente cu:                | 1,5    |        | St:                  | 1,000 |  |
|                                 |        |        | Kh:                  | 0,012 |  |
| Operatività (SLO):              |        |        | Kv:                  | 0,006 |  |
| Probabilità di superamento:     | 81     | %      | Amax:                | 0,604 |  |
| Tr:                             | 45     | [anni] | Beta:                | 0,200 |  |
| ag:                             | 0,041  | g      | SLD:                 |       |  |
| Fo:                             | 2,570  |        | Ss:                  | 1,500 |  |
| Tc*:                            | 0,252  | [s]    | Cc:                  | 1,610 |  |
|                                 |        |        | St:                  | 1,000 |  |
| Danno (SLD):                    |        |        | Kh:                  | 0,015 |  |
| Probabilità di superamento:     | 63     | %      | Kv:                  | 0,007 |  |
| Tr:                             | 75     | [anni] | Amax:                | 0,724 |  |
| ag:                             | 0,049  | g      | Beta:                | 0,200 |  |
| Fo:                             | 2,582  |        | SLV:                 |       |  |
| Tc*:                            | 0,272  | [s]    | Ss:                  | 1,500 |  |
|                                 |        |        | Cc:                  | 1,530 |  |
| Salvaguardia della vita (SLV):  |        |        | St:                  | 1,000 |  |
| Probabilità di superamento:     | 10     | %      | Kh:                  | 0,039 |  |
| Tr:                             | 712    | [anni] | Kv:                  | 0,019 |  |
| ag:                             | 0,107  | g      | Amax:                | 1,575 |  |
| Fo:                             | 2,573  |        | Beta:                | 0,240 |  |
| Tc*:                            | 0,319  | [s]    | SLC:                 |       |  |
|                                 |        |        | Ss:                  | 1,490 |  |
| Prevenzione dal collasso (SLC): |        |        | Cc:                  | 1,530 |  |
| Probabilità di superamento:     | 5      | %      | St:                  | 1,000 |  |
| Tr:                             | 1462   | [anni] | Kh:                  | 0,049 |  |
| ag:                             | 0,136  | g      | Kv:                  | 0,024 |  |
| Fo:                             | 2,587  |        | Amax:                | 1,987 |  |
| Tc*:                            | 0,321  | [s]    | Beta:                | 0,240 |  |

Tabella 8: parametri sismici di base dell'area di studio (estratto da app Geostru PS)

## 6.2 MODELLO SISMOSTRATIGRAFICO

Il contesto sismostratigrafico, ottenuto a partire da analisi MASW e indagini HVSR elaborate congiuntamente, ed integrato con dati derivanti da indagini pregresse, è riportato nella tabella sottostante, assieme alle caratteristiche geotecniche.

| n. | Spessore [m] | Peso unità vol. [kN/m³] | Vs [m/s] | Tensione verticale [kPa] | Descrizione                                    |
|----|--------------|-------------------------|----------|--------------------------|--|
| 1  | 5.0          | 18.5                    | 110.0    | 55.0                     | ARGILLA LIMOSA                                 |
| 2  | 10.0         | 19.0                    | 190.0    | 171.0                    | SABBIA E LIMO                                  |
| 3  | 30.0         | 19.5                    | 280.0    | 414.8                    | SABBIA   |
| 4  | --           | 20.0                    | 400.0    | 597.6                    | SABBIA E GHIAIA CON LIVELLI ARGILLOSI COMPATTI |

Tabella 9: modello sismostratigrafico semplificato utilizzato per analisi di Risposta Sismica Locale

## 6.3 PROCEDURA DI ANALISI

Per poter effettuare tali analisi, è necessario definire l'azione sismica da applicare al substrato roccioso, rappresentata da un numero prefissato di registrazioni accelerometriche. Sono stati utilizzati accelerogrammi naturali (il numero minimo che consente di far riferimento ai valori medi dei risultati, secondo quanto prescritto dalle NTC 18) selezionati da banche accelerometriche digitali (European Strong-motion Database), imponendo i criteri di scelta e spettro-compatibilità imposti dalle NTC 18. Il primo criterio per la selezione degli accelerogrammi reali è la compatibilità con i vincoli sismotettonici del contesto geologico regionale ed, in particolare, con i valori di magnitudo, distanza epicentrale e i meccanismi focali dei terremoti di scenario che contribuiscono maggiormente alla pericolosità del sito.

Tale informazione può essere ottenuta dall'analisi di **disaggregazione della pericolosità**. I risultati della disaggregazione dello studio di pericolosità sismica sono disponibili sul sito web dell'INGV (<http://esse1-gis.mi.ingv.it>) per tutto il territorio nazionale, con riferimento ai punti del reticolo in cui esso è stato suddiviso.

Per la selezione delle combinazioni degli **accelerogrammi naturali compatibili** con gli spettri da normativa, si è utilizzato il programma REXEL versione 3.5, sviluppato da Iervolino I., Galasso C. e Chioccarelli E.. Gli accelerogrammi selezionati sono stati tutti registrati su siti rocciosi affioranti e sono caratterizzati da valori di magnitudo e distanza epicentrale, compatibili con i risultati dello studio di disaggregazione. La tolleranza adottata sui valori di distanza è tipicamente maggiore di quella sui valori di magnitudo, poiché quest'ultima ha un'influenza maggiore sulle caratteristiche del moto sismico. L'altro criterio importante e restrittivo adottato per la selezione degli accelerogrammi reali è quello della spettro-compatibilità. Gli accelerogrammi selezionati per il sito in esame sono spettro-compatibili, in media, con lo spettro di risposta elastico su suolo di categoria A prescritto dalle NTC 18 per il periodo di ritorno previsto per ciascuno stato limite nell'intervallo di periodo specificato.

Per ottenere i parametri di disaggregazione degli stati limite di interesse si è consultata la pagina web dell'INGV <http://esse1-gis.mi.ingv.it> (fonte ufficiale per l'identificazione della pericolosità di sito e dei valori di disaggregazione), con riferimento al nodo del reticolo nazionale di riferimento più prossimo al sito in analisi, il n. **14723**.

Si è quindi utilizzato il codice di calcolo "RSL III 1D" che calcola la risposta dinamica monodimensionale (1D) di una colonna di terreno utilizzando un modello di propagazione lineare delle onde, con proprietà dinamiche del terreno variabili in funzione del livello deformativo. Il programma permette di eseguire *analisi lineari elastiche* (EL), dove le proprietà elastiche e lo smorzamento sono mantenuti costanti, o *analisi equivalenti lineari* (EQL) dove le proprietà elastiche e lo smorzamento vengono fatti variare in funzione del livello deformativo. I parametri di input possono essere costituiti dalle serie temporali oppure da spettri di Fourier o risposta che vengono modificati tramite la *random vibration theory* (RVT).

L'utilizzo di "RSL III 1D" ha permesso di scalare gli accelerogrammi scelti nella precedente fase per ricondurli al valore di accelerazione sismica del sito per la scelta progettuale adottata, applicando l'analisi di risposta sismica locale con **metodo lineare equivalente** (EQL – modulo di rigidità  $G$  e smorzamento  $D$  variabili in funzione della deformazione) per ottenere la modificazione degli accelerogrammi di input in funzione delle condizioni sismostratigrafiche e geologico-tecniche del sito.

**L'analisi è stata condotta per lo Stato limite di salvaguardia della vita (SLV) e per lo Stato limite di Danno (SLD).**

È stato quindi definito il **modello sismostratigrafico** così come descritto al **Paragrafo 6.2**, assegnando ai vari sismostrati diversi valori di **velocità  $V_s$  e proprietà geotecniche**. Riguardo al modello sismico del sottosuolo si sono scelte **curve di degradazione della rigidità  $G/G_{max} - \gamma$  e curve del rapporto di smorzamento  $D - \gamma$**  tratte da bibliografia e in particolare da EPRI (1993) con valori in funzione della profondità, e dalla Regione Lombardia.

In seguito sono stati definiti i **segnali di input** e a quale **profondità** immetterli nel profilo di terreno. Il segnale è stato imposto alla base della coltre, ovvero alla sommità del bedrock (alla sommità del semispazio che definisce il substrato rigido); quindi è stata eseguita l'**importazione** delle storie temporali dalla **settupla** spettrocompatibile definita tramite REXEL (**Figura 36-37**). Per ogni accelerogramma acquisito è stato definito il **fattore di scala** (numero utilizzato dal programma per **riportare la  $PGA_0$  al valore di normativa di  $a_g$ , pari a 0.107g per il sito del Ponte sul Po' tra Dosolo e Guastalla in classe di edificio 3**).

Ai fini progettuali lo "spectral ratio" (rapporto tra gli spettri di risposta) individuato in quest'ultima analisi permette di **stabilire l'amplificazione tra spettro di risposta in accelerazione in superficie ed il corrispondente al bedrock**.

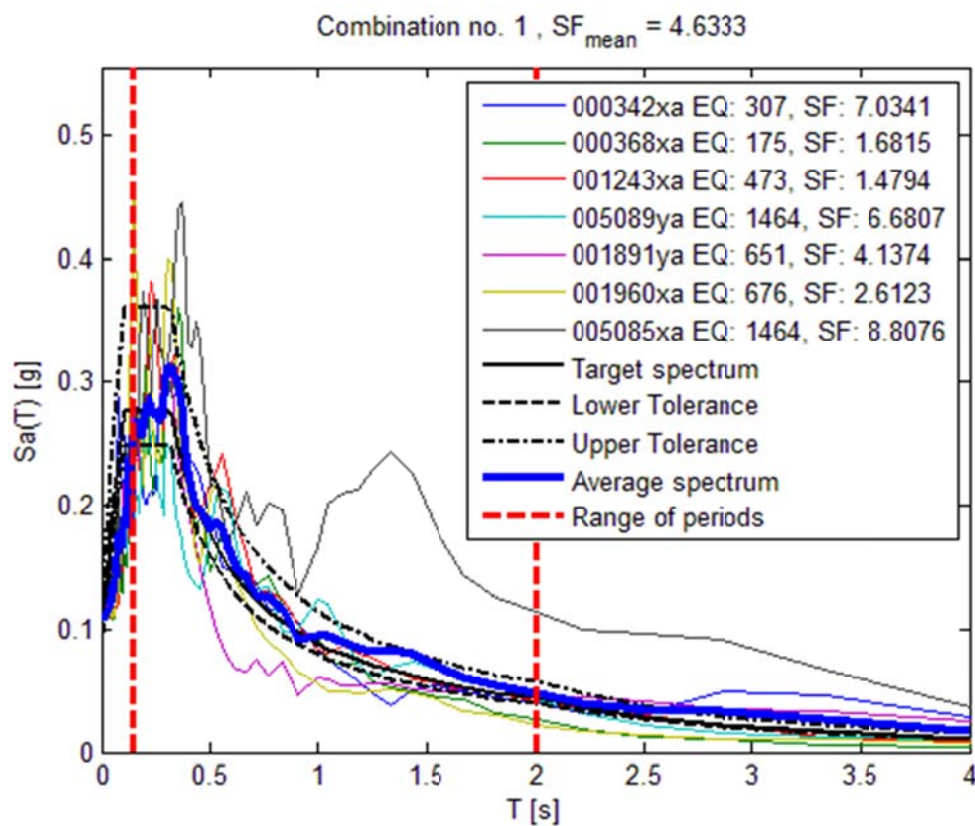


Figura 38: Accelerogrammi di Input ricavati con l'utilizzo del Software Roxel 3.5 per gli Stati limite SLV , Classe d'edificio 3, Categoria sismica C. (progetto dell'Università Federico II di Napoli)

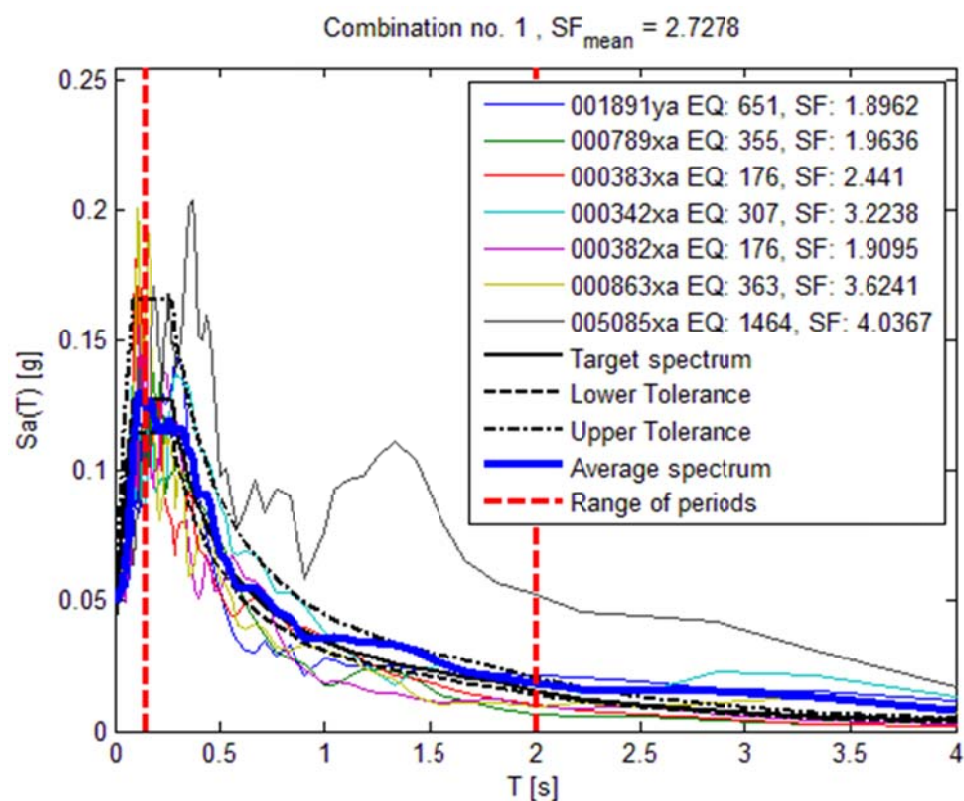


Figura 39: Accelerogrammi di Input ricavati con l'utilizzo del Software Roxel 3.5 per gli Stati limite SLV , Classe d'edificio 3, Categoria sismica C (progetto dell'Università Federico II di Napoli)

## 6.4 RISULTATI ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE

L'analisi ha permesso di **confrontare gli accelerogrammi di input, derivanti da registrazioni naturali, con quelli di output**, e, ricostruendo la stratigrafia locale, di estrarre la **funzione di trasferimento dell'accelerazione (Figura 51)**. E' stato quindi possibile **ricostruire gli spettri di risposta** per i singoli accelerogrammi, ricavando lo spettro medio, per poi **valutare la rispondenza con lo spettro di normativa**.

Si evidenzia che tale approccio ha dei limiti intrinseci, essendo il metodo in evoluzione. Si tenga presente che tali simulazioni si basano su registrazioni spesso riferite al piano campagna, che nel modello vengono poste al bedrock, introducendo quindi un errore di partenza. Va inoltre considerato che, seppur si siano incrociati vari metodi di indagine raffrontandoli con dati bibliografici e sondaggi eseguiti in passato, risulta difficoltoso definire un modello rappresentativo della colonna stratigrafica locale in un ambiente dinamico quale una bassa pianura alluvionale. I risultati dell'analisi vanno quindi analizzati qualitativamente.

### 6.4.1 STATO LIMITE DI SALVAGUARDIA DELLA VITA (SLV)

Dall'analisi della funzione di trasferimento dell'accelerazione per lo stato limite di riferimento SLV **si nota come siano eccitate le frequenze comprese tra 1.0 Hz e 5.0 Hz**. Ciò si riflette nei risultati dell'indagine **HVSR (vedi tabelle 5 e 6)**. La freq. di 1.0 Hz e 2.0 Hz (come enunciato al capitolo 7) sono a tutti gli effetti interferenti positivamente con strutture delle dimensioni paragonabili a quelle del Ponte sul Po' nella sua porzione più elevata (altezza di 30 metri fuori terra) . L'amplificazione sismica provoca un aumento pari a circa 1.4 volte dell'accelerazione sismica di base di 0.107 g alle basse frequenze.

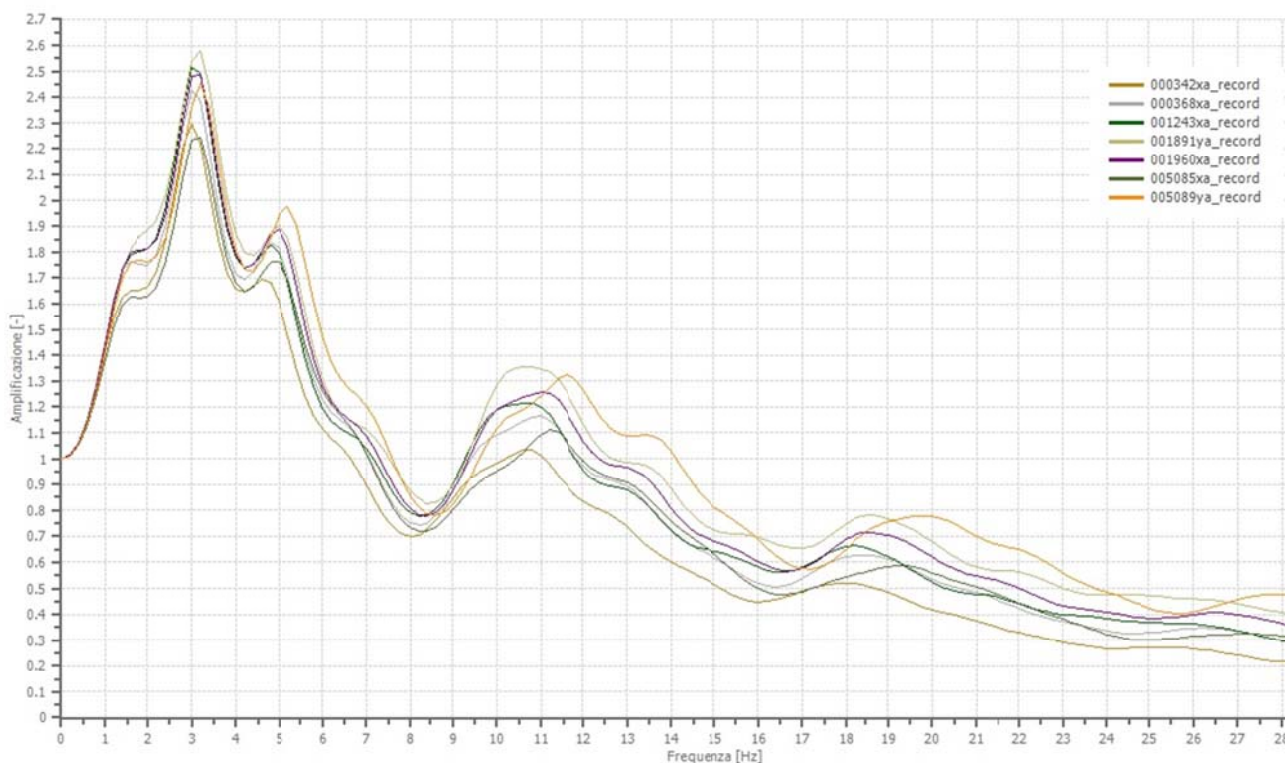
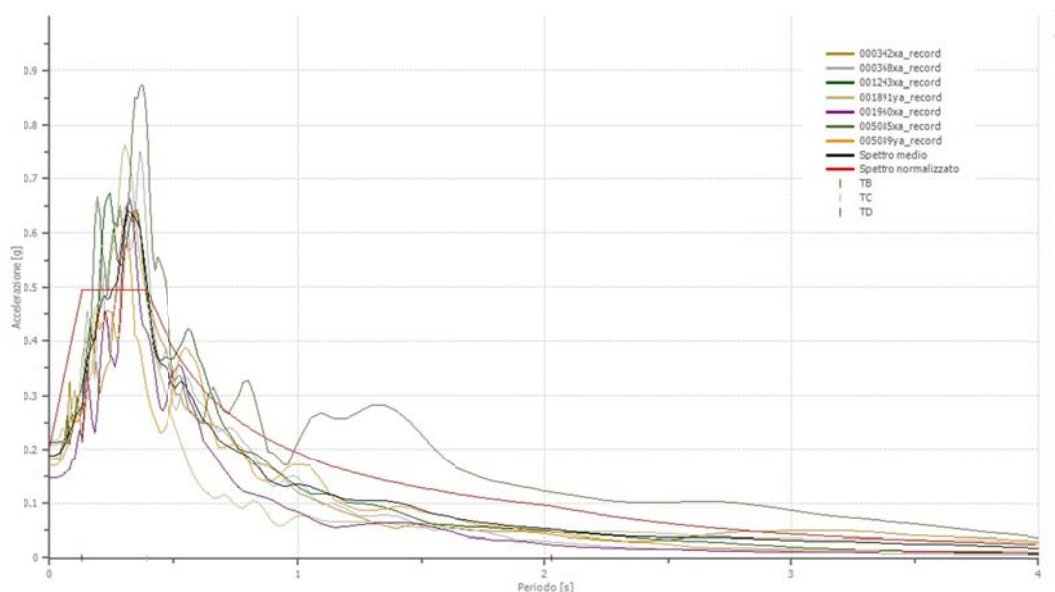


Figura 40: Funzione di trasferimento dell'accelerazione

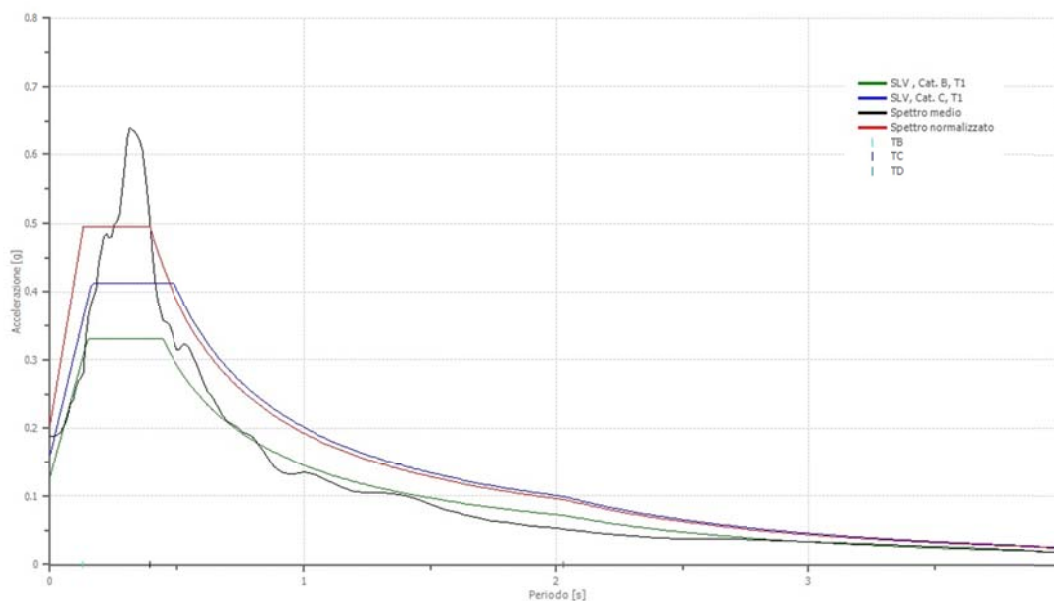
La seguente **Figura 39** riporta lo **spettro medio di accelerazione di output** in sovrapposizione agli spettri degli accelerogrammi utilizzati come dato di input.



*Figura 41: Spettro di risposta medio ricavato dallo Studio di Risposta Sismica Locale. Stato limite di riferimento SLV. In sostanza lo spettro ci dice su quali frequenze di vibrazione la sollecitazione sulle strutture risulta massima e sono possibili fenomeni di risonanza, che potrebbero determinarne il collasso.*

Al fine poi di confrontare lo **spettro medio di risposta sismica locale** con quello risultante dalle indagini eseguite (approccio semplificato), ovvero con gli spettri di normativa, si è realizzato il grafico di **Figura 40**.

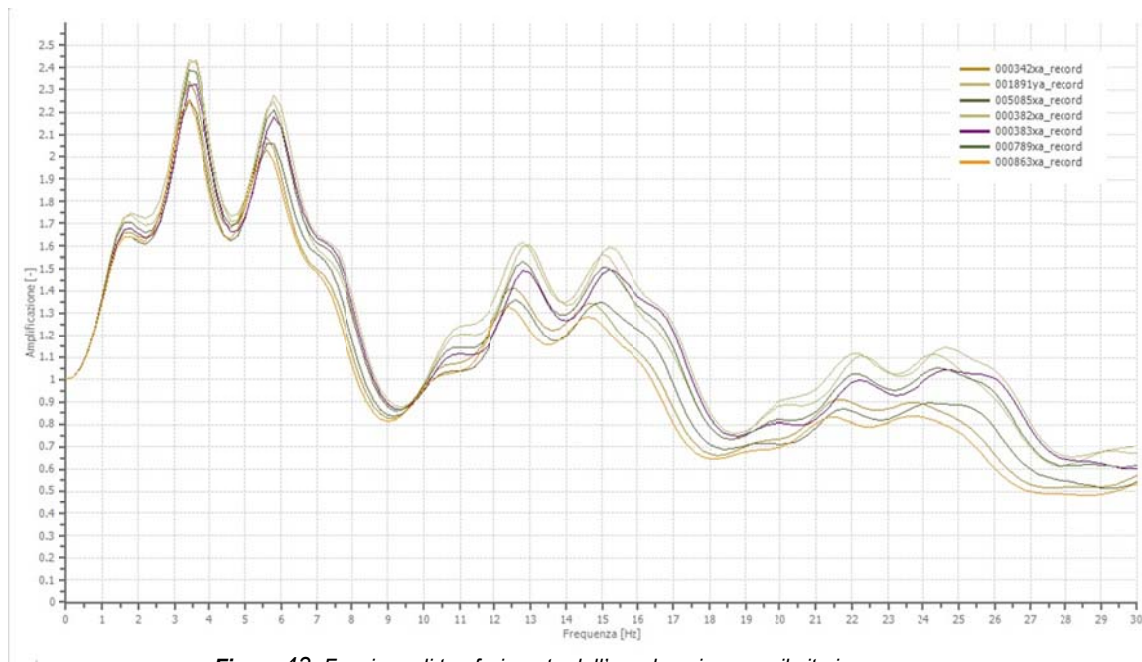
Si nota, ricordando i limiti intrinseci alla modellazione di risposta sismica locale, che lo spettro medio di progetto per gli SLV è più alto rispetto sia a quello di Categoria B, che nei confronti di quello di Categoria C. In via preliminare si può considerare attendibile lo spettro di RSL per i calcoli sulle strutture del ponte ai fini dell'adeguamento sismico per gli SLV. (Ordinanza n. 3519/2006).



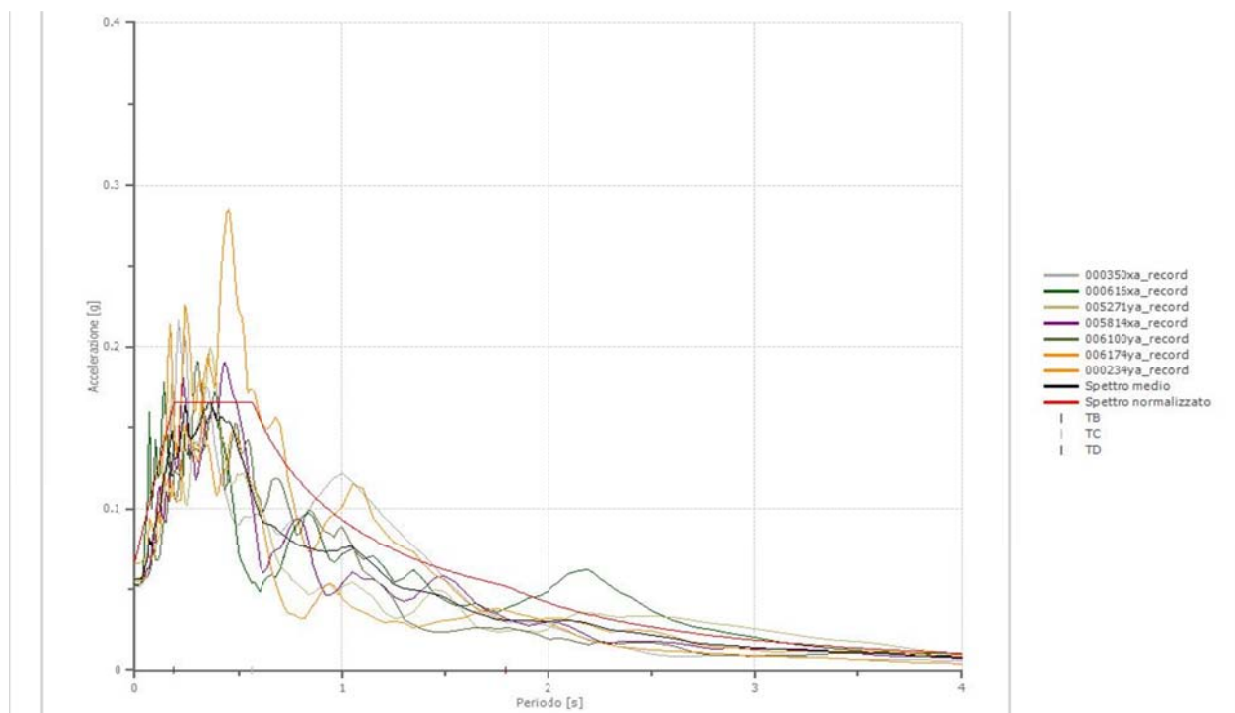
*Figura 42: Spettro di risposta medio ricavato dallo Studio di Risposta Sismica Locale sovrapposto agli spettri di normativa per categorie B, T1 e C, T1. Stato limite di riferimento SLV*

#### 6.4.2 STATO LIMITE DI DANNO (SLD)

Dall'analisi della funzione di trasferimento dell'accelerazione per lo stato limite di riferimento SLD si nota come siano eccitate circa le stesse frequenze (esse dipendono dagli accelerogrammi di input e dalla stratigrafia) che per gli SLV ovvero quelle comprese tra 2 e 6 Hz. La freq. di 1.0 Hz e 2.0 Hz (come enunciato al capitolo 7) sono a tutti gli effetti interferenti positivamente con strutture delle dimensioni paragonabili a quelle del cavalcavia superiore nella sua porzione più elevata (altezza di 30 metri fuori terra). L'amplificazione sismica provoca un aumento pari a circa 1.3 volte dell'accelerazione sismica di base di 0.049g per gli SLD alle basse frequenze.



**Figura 43:** Funzione di trasferimento dell'accelerazione per il sito in esame

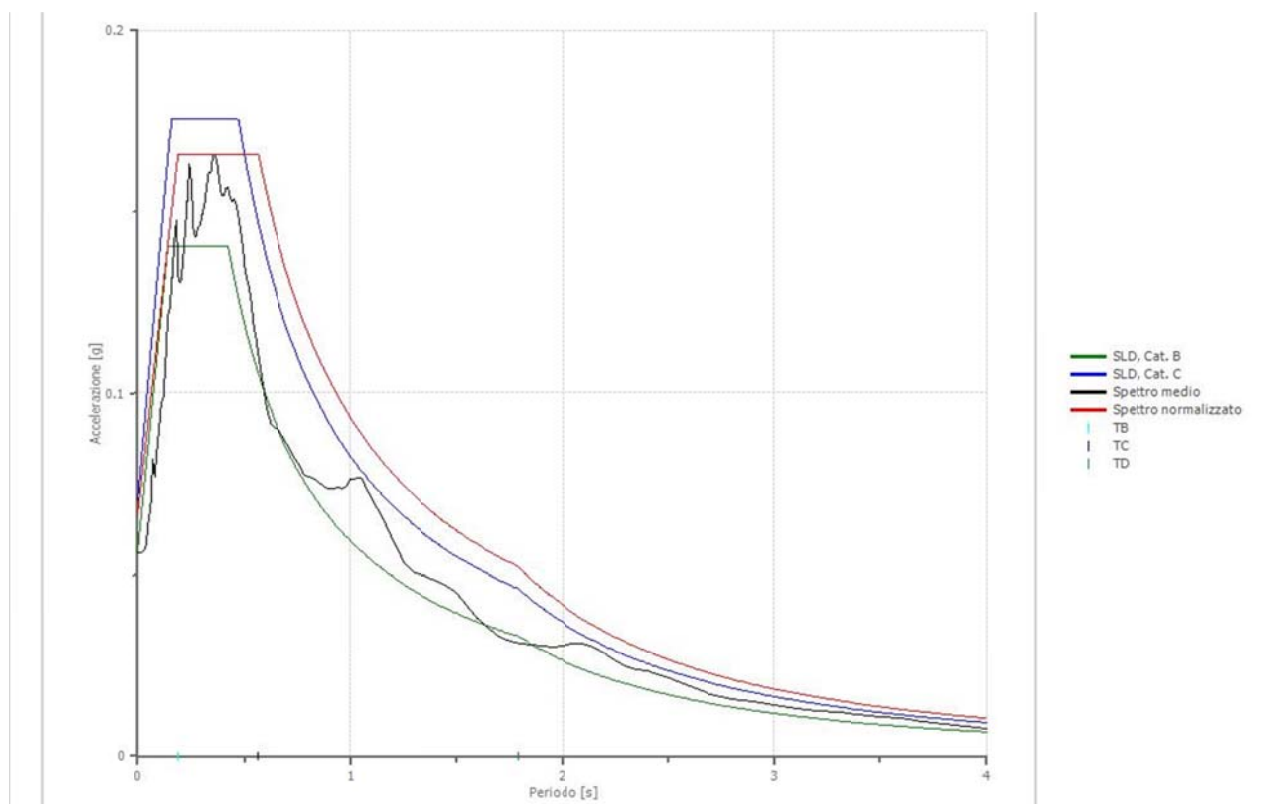


**Figura 44:** Spettro di risposta medio ricavato dallo Studio di Risposta Sismica Locale. Stato limite di riferimento SLD In sostanza lo spettro ci dice su quali frequenze di vibrazione la sollecitazione sulle strutture risulta massima e sono possibili fenomeni di risonanza, che potrebbero determinarne il collasso.

La precedente **Figura 42** riporta lo **spettro medio di accelerazione di output** in sovrapposizione agli spettri di input utilizzati, ovvero 7 accelerogrammi estratti dal software Rexel 3.5

Al fine poi di **confrontare lo spettro medio di risposta sismica locale** con quello risultante dalle indagini eseguite (approccio semplificato), ovvero **con gli spettri di normativa**, si è realizzato il grafico di **Figura 43**.

Si nota, ricordando i limiti intrinseci alla modellazione di risposta sismica locale, che lo spettro medio di progetto per gli SLD è più alto rispetto a quello di Categoria B, e leggermente più basso di quello di Categoria C. In via preliminare si può considerare attendibile lo spettro di RSL per i calcoli sulle strutture del ponte ai fini dell'adeguamento sismico per gli SLD. (Ordinanza n. 3519/2006).



*Figura 45: Spettro di risposta medio ricavato dallo Studio di Risposta Sismica Locale sovrapposto agli spettri di normativa per categorie B, T1 e C, T1. Stato limite di riferimento SLD*

Ricordando che i risultati delle indagini sismiche avevano attestato delle velocità delle onde sismiche piuttosto basse nei primi 30 metri dal p.c. (con  $180 \text{ m/s} > V_{s30} < 360 \text{ m/s}$  per il sito d'indagine) e che quindi si fosse dichiarata in via preliminare (Cap. 4.2.2) una categoria di sottosuolo C, in conclusione per il sito in esame, si può considerare per i calcoli strutturali in fase di Analisi di Vulnerabilità Sismica e successive (Progettazione ed esecuzione dell'Adeguamento sismico) lo spettro di Risposta Sismica Locale, sia in riferimento agli SLV che agli SLD. Esso, infatti, risulta paragonabile allo spettro di normativa per Categoria C di sottosuolo, ha un valore di accelerazione di picco leggermente più alto ma comunque lo scarto tra il valore di picco dello spettro locale e di normativa cat. C è inferiore al 20% e dunque vi sono tutti i presupposti per il suo impiego a livello progettuale (come da prescrizione NTC 2018 al capitolo §3.2.3.6). Lo spettro di categoria B risulta, invece, più basso ed il suo utilizzo implicherebbe un'inadeguata sistemazione sismica del calvalcavia, andando a gravare sulla sicurezza. Per quanto riguarda la Categoria Topografica, essa è definitivamente individuata nella Categoria T1.

## 6.5 AZIONE SISMICA TERREMOTO 2012 AL PONTE DI DOSOLO-GUASTALLA

Dalla lettura di Ervolino M. et al (Università degli studi di Napoli , 2013) si evince che , in occasione dell'evento sismico denominato "Terremoto dell'Emilia" del 20 maggio 2012, l'accelerazione sismica di picco all'epicentro registrata presso la stazione sismica MRN di Mirandola (MO) è stata di 0,261-0.265 g, con valore di ordinata spettrale che raggiunge valori fino ad 1,000 g (Figura 46)

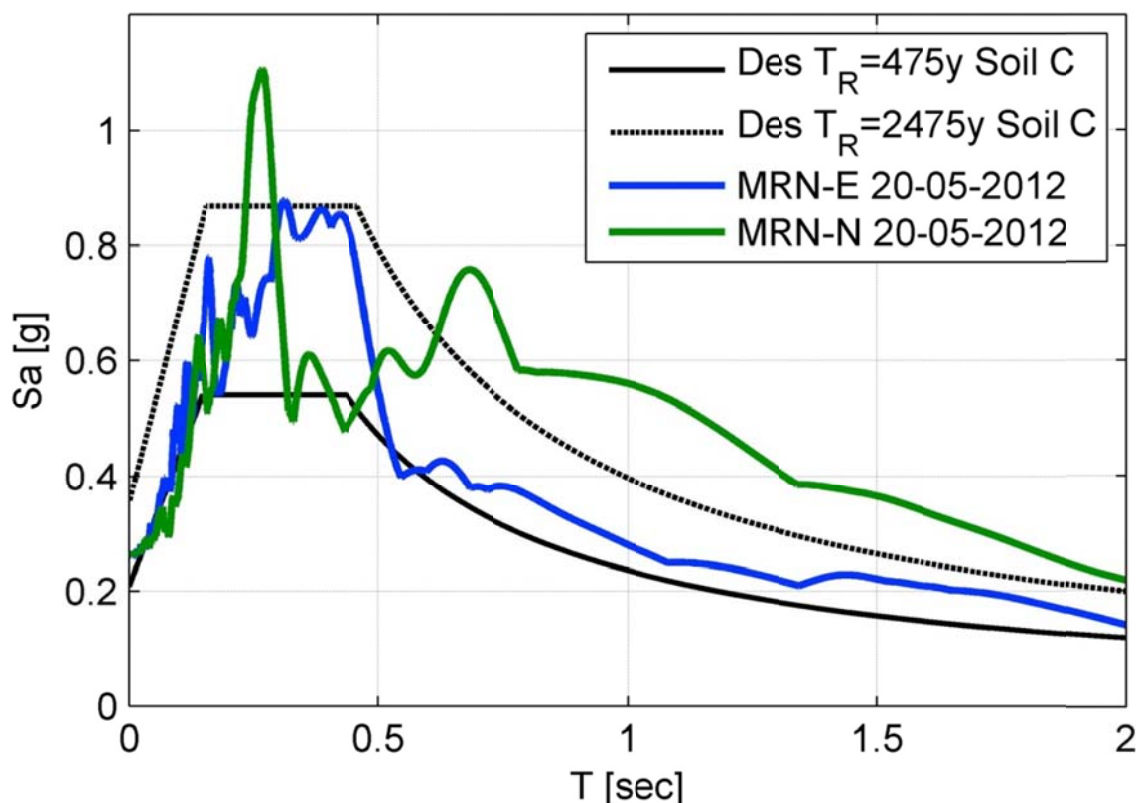
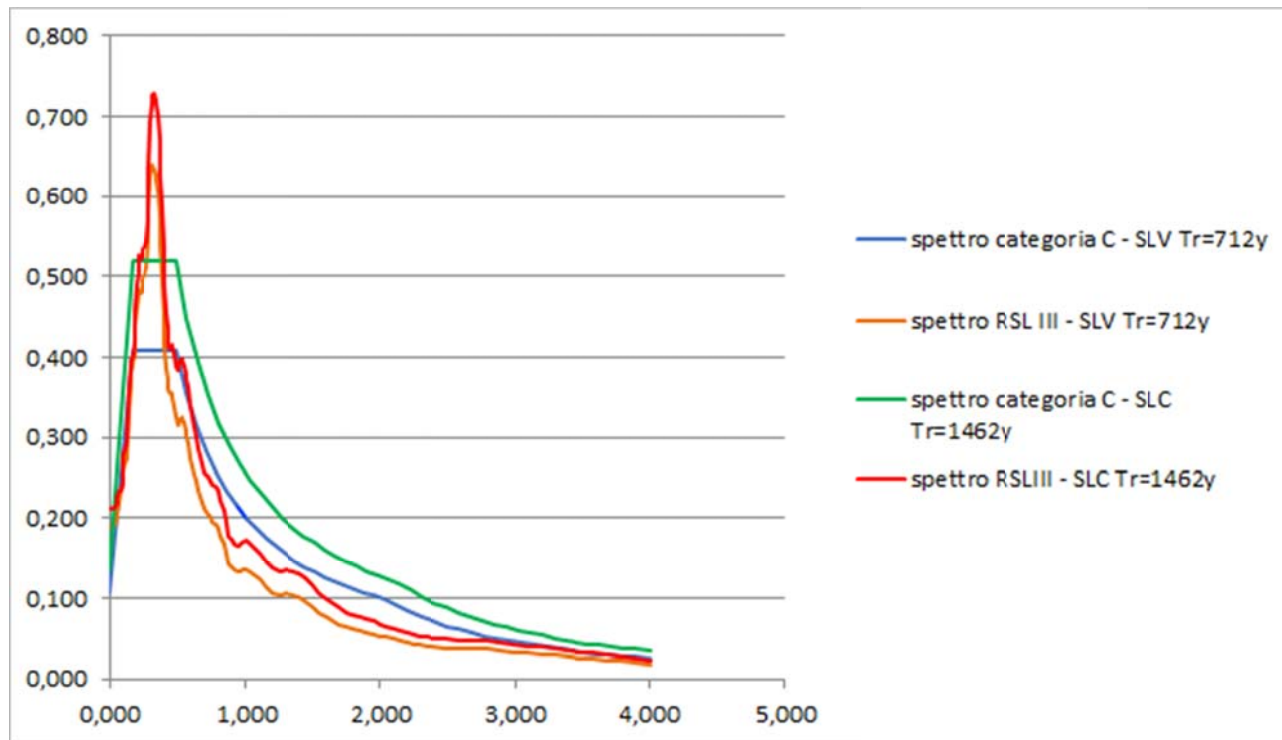


Figura 46: Spettri di risposta elastici registrati il 20 maggio 2012 a Mirandola, componente NS (verde) e componente EW (blu), confrontati con gli spettri di risposta elastici per periodo di ritorno pari a 475 anni (nero) e 2475 anni (nero tratteggiato) previsti dalla normativa vigente (DM 14/01/2008) per suolo di classe C e classe topografica T1. (Ervolino et al, 2013)

Considerando ora gli spettri di progetto calcolati in corrispondenza del Ponte oggetto d'intervento attraverso l'analisi di Risposta sismica locale di liv. III precedentemente descritta , si ricorda che questi erano stati calcolati a partire da analisi di disaggregazione (Figure 3-6) da cui si era ricavato che gli eventi con tempo di ritorno elevato (stati limite SLV e SLC) hanno distanza epicentrale compresa tra 20 e 40 km e Magnitudo compresa tra 4.5 e 6.5 , e si erano dunque presi in considerazione 7 accelerogrammi con queste caratteristiche (Figura 38 – SLV).

Dato che il Terremoto dell'Emilia all'epicentro di Mirandola fece registrare una Magnitudo di 5.8 e che esso si trova a distanza di circa 40 km verso Est dal Ponte di Gaustalla-Dosolo, si può considerare plausibile che , durante l'evento sismico del 2012, si registrarono presso il Ponte accelerazioni al suolo del tutto paragonabili a quelle utilizzate per il calcolo degli spettri di RSL III, e che dunque il terremoto del 2012 corrisponda all'evento più pericoloso che possa accadere nella zona con tempi di ritorno elevati (compresi tra 500 anni e 2500 anni).

In particolare ora, prendendo in esame gli Spettri di RSL III per i tempi di ritorno di 712 anni e 1462 anni (rispettivamente stati limite SLV e SLC) e confronto questi con gli spettri di normativa vigente NTC 2018 per Classe d'Uso III, Categoria di sottosuolo C e Categoria topografica T1, si ottiene il grafico di Figura 47.



*Figura 47: Spettri di risposta elastici per il ponte tra Dosolo e Guastalla, componente orizzontale SLV (arancio) e SLC (rosso), confrontati con gli spettri di risposta elastici per periodo di ritorno pari a 712anni (blu) e 1462 anni (verde) previsti dalla normativa vigente (DM 14/01/2008) per suolo di classe C e classe topografica T1 in Classe d'uso III.*

Tale grafico di Figura 47 può oggettivamente corrispondere, dunque, a quello registrato durante eventi paragonabili a quello dell'Emilia del 2012. Si nota che l'accelerazione sismica di picco rispetto che si ha al suolo presso il Ponte di Dosolo-Guastalla durante evento con Magnitudo compresa tra 4.5 e 6.5 ed epicentro a distanza circa 30 km registrata) è stata di 0,191-0.210 g, con valore di ordinata spettrale che raggiunge valori fino ad 0,7g (Figura 47)

Dal confronto tra i due grafici delle Figure 46 e 47, si può concludere che la PGA al suolo presso il Ponte di Dosolo Guastalla durante il Terremoto dell'Emilia del 2012 fosse compresa tra 0.190 e 0.210 g con valore di ordinata spettrale di 0.7 g, e che tale evento fu tra i più pericolosi che possano accadere nell'area indagata a tempi di ritorno elevati (tra 500 e 2500 anni).

## 7 EFFETTI DI DOPPIA RISONANZA SUOLO STRUTTURA

Nel caso di sollecitazione prolungata nel tempo, essa può diventare particolarmente pericolosa per l'edificio, progettato come elastico, se il terreno trasmette una componente del segnale sismico con la stessa frequenza di oscillazione della struttura:

- Frequenza di oscillazione del terreno minore della frequenza naturale di oscillazione della struttura – > i danni sono limitati
- Frequenza di oscillazione del terreno uguale alla frequenza naturale di oscillazione della struttura → i danni sono “illimitati”

Dovrà pertanto essere verificato per il sito che le frequenze di oscillazione caratteristiche ricavate dei vari corpi strutturali non si sovrappongano alle seguenti per un intervallo indicativo pari al 10%:

| ID Indagine  | Freq.Fondamentale terreno<br>F0 [Hz] | Freq. secondaria<br>F1 [Hz] | Ampiezza A0 |
|--|--------------------------------------|-----------------------------|-------------|
| Ponte Sul Po' –<br>tra Dosolo (MN) e<br>Guastalla (RE) | 1.0 ± 0.25 Hz                        | 4.0 ± 0.25 Hz               | 3.00        |

Tabella 10 Frequenza fondamentale del sito d'indagine

Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. Es. Pratt):

$$\text{freq. Naturale edificio} \approx 10 \text{ Hz} / \text{numero piani} \\ \text{(vedi Figura 44)}$$

È quindi la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura ad essere particolarmente pericolosa, poiché dà luogo alla massima amplificazione e deve quindi essere oggetto di studi approfonditi. In generale maggiore è l'altezza del fabbricato, minore è la frequenza di vibrazione (cioè più lungo il periodo di vibrazione); in realtà occorre considerare anche la forma e le modalità costruttive.

Considerando, dunque, l'altezza del complesso strutturale in questione dal p.viario fino al piano campagna, ovvero nella sua posizione centrale al di sopra il letto del Fiume Po', si ottiene un'altezza di 19 m totali corrispondente a 6 piani di altezza fuori terra (circa 3.2 metri per piano), da cui:

$$\text{freq. Naturale cavalcavia superiore} \approx 10 \text{ Hz} / 6 \text{ piani} \approx 1.6 \text{ Hz}$$

Questo valore risulta perciò vicino a quelli della vibrazione primaria (1.2-1.5 Hz) che va in risonanza con edifici di circa 20 metri. Si possono ammettere, dunque, in via preliminare, alcuni problemi di doppia risonanza.

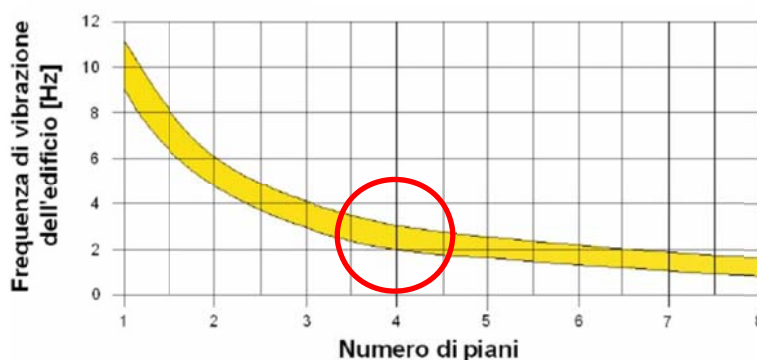


Figura 48– Frequenze di vibrazione di edifici, secondo l'altezza nel numero di piani.

Va inoltre tenuto conto che il ponte sul Po' presenta **fondazioni con pali impostati alla profondità di circa 50 metri dal p.c.**, il che fa ipoteticamente **aumentare l'altezza dell'edificio fino a 70 metri, ed abbassando la frequenza di risonanza a 0.5 Hz gli effetti di doppi risonanza diminuiscono drasticamente.**

## 8 VERIFICA DELLA SUSCETTIVITA' ALLA LIQUEFAZIONE DEI TERRENI

La verifica della liquefazione è stata svolta come indicato nel §7.11.3.4.2 NTC08 e aggiornamento NTC18.

Per liquefazione di un terreno s'intende il quasi totale annullamento della sua resistenza al taglio con l'assunzione del comportamento meccanico caratteristico dei liquidi. I fenomeni di liquefazione interessano in genere depositi sabbiosi saturi e dipendono principalmente da:

proprietà geotecniche dei terreni, caratteristiche delle vibrazioni sismiche e loro durata, genesi e storia geologica dei terreni.

La verifica a liquefazione può essere omessa quando si manifesti almeno una delle seguenti circostanze:

- 1 eventi sismici attesi di magnitudo  $M$  inferiore a 5;
- 2 accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0,1g;
- 3 profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
- 4 depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata  $(N1)_{60} > 30$  oppure  $qc_{1N} > 180$  dove  $(N1)_{60}$  è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (Standard Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e  $qc_{1N}$  è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;
- 5 distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nella figura 47(a) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità  $U_c < 3,5$  ed in figura 47 (b) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità  $U_c > 3,5$ .

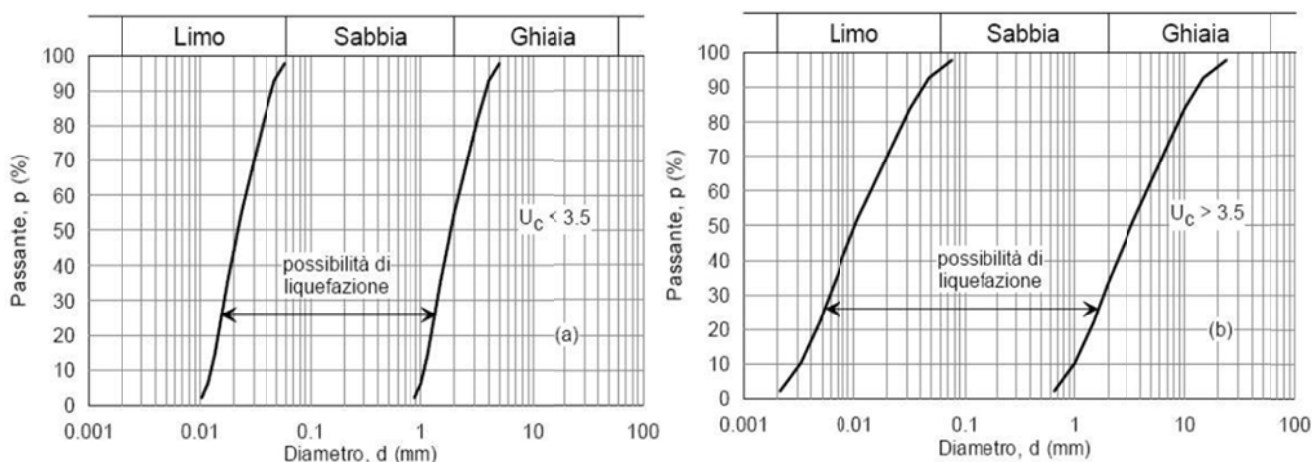


Figura 49– intervallo granulometrico di suscettività alla liquefazione

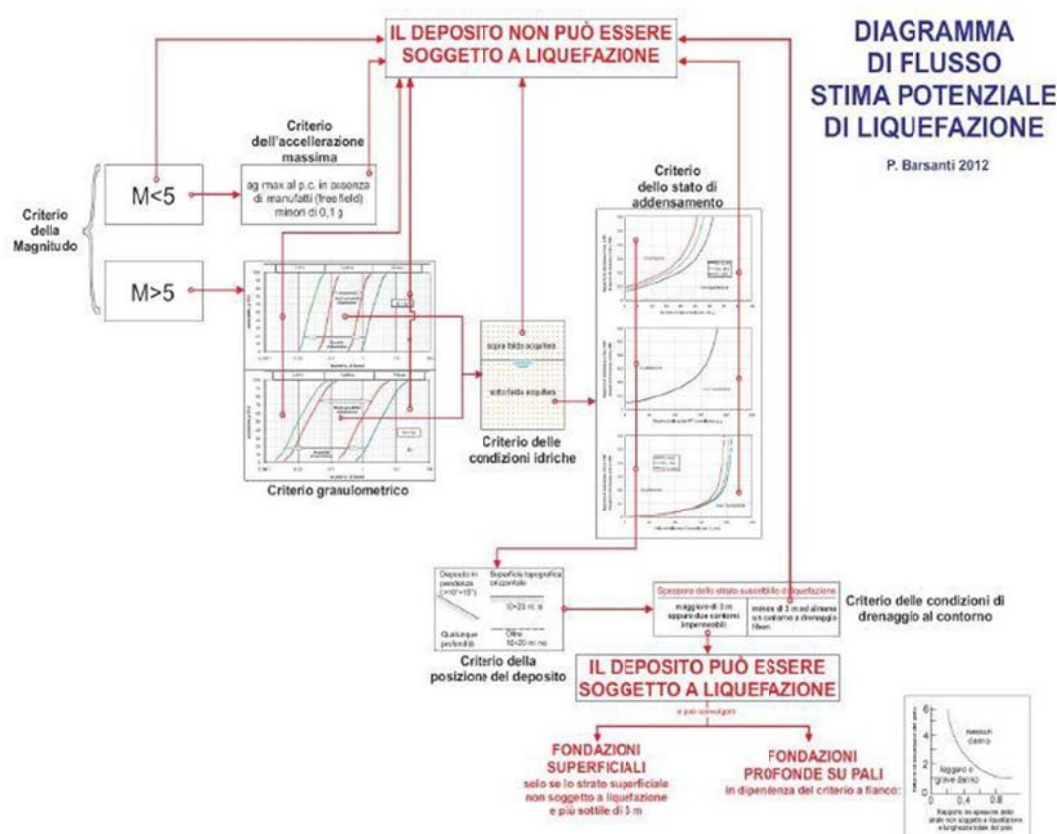


Figura 50– Diagramma di flusso per la stima del potenziale di liquefazione

Ora, analizziamo la situazione nel complesso:

- L'accelerazione massima attesa al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) per gli SLV è di 0,107g dunque di spochissimo superiore al limite di 0,107 g. considerando poi i risultati dell'analisi RSL III, per gli SLV l'accelerazione di base di sito è pari a 0.204 g.
- Magnitudo attesa NON è inferiore a 5: Il sito ricade a circa 27.5 chilometri dall'epicentro di terremoto più probabile, a cui è assegnata (secondo il volume indirizzi e criteri per la microzonazione sismica) una magnitudo massima attesa al sito che metta a rischio la Salvaguardia della Vita di 5.12 (vedi Figura 4).

Tabella 2.8-1 – Valori di  $M_{max}$  per le zone sismogenetiche di ZS9 (estratto da Gruppo di Lavoro, 2004)

| Nome ZS  | Numero ZS   | $M_{max}$ |
|--|---|-----------|
| Colli Albani, Etna   | 922, 936  | 5.45      |
| Ischia-Vesuvio   | 928   | 5.91      |
| Altre zone   | 901, 902, 903, 904, 907, 908, 909, 911, 912, 913, 914, 915, 917, 920, 921, 926, 932, 933, 934 | 6.14      |
| Medio-Marchigiana/Abruzzese, Appennino Umbro, Nizza Sanremo                  | 918, 919, 910   | 6.37      |
| Friuli-Veneto Orientale, Garda-Veronese, Garfagnana-Mugello, Calabria Jonica | 905, 906, 915, 930  | 6.60      |
| Molise-Gargano, Ofanto, Canale d'Otranto                                     | 924, 925, 931   | 6.83      |

Figura 51: Valori massimo di Magnitudo per le zone sismogenetiche di ZS9 .

- Profondità media stagionale della falda superiore nel caso in esame la falda è superficiale a circa 2 metri dal p.c.

- **La distribuzione granulometrica per i terreni compresi tra le profondità di 5.0 e 48.0 m dal p.c.circa (si veda "Report sulle indagini Geognostiche" all'interno del presente progetto) è interna alle zone indicate nella figura 47**
- Lo strato non liquefacibile superficiale ha uno spessore maggiore di 3 m, ovvero di circa 5.0 metr i nelle zone golenali

Data la situazione nel suo complesso, è stata effettuata dunque una verifica alla liquefazione sugli strati compresi tra le profondità di 5.0 e 48.0 m circa dal p.c. come da prove CPTU e SPT

Si considera liquefazione assente per  $F_s \geq 1,25$ , possibile per  $F_s=1,0-1,25$  e molto probabile per  $F_s < 1,0$ , dove  $F_s$  = Fattore di sicurezza (ovvero il rapporto tra resistenza alla liquefazione CRR e tensione tangenziale ciclica indotta dal sisma CSR, che sono state ricavate indirettamente dai dati di resistenza forniti dalle prove cptu e dai dati regionali sulla sismicità. Secondo le normative europea e italiana è suscettibile di liquefazione un terreno in cui lo sforzo di taglio generato dal terremoto supera l'80% dello sforzo critico che ha provocato liquefazione durante terremoti passati e quindi deve essere  $F_s \geq 1,25$ .)

Attraverso l'utilizzo del Software Static Probing di Geostru, si è applicato il metodo semplificato e la procedura originaria (Robertson & Wride, 1997) per i risultati delle prove da cui risulta Fattore di Sicurezza sempre  $>1,25$  e pari a circa a 1.20.

La probabilità di liquefazione PL, invece, è data dall'espressione di Juang et al. (2001):

$$P_L = \frac{1}{1 + \left( \frac{F_s}{0,72} \right)^{3,1}}$$

#### Cptu 1

|                 | Prof. Strato (m) | Qc (mpa)        | Fs (mpa)       | Fattore di sicurezza a liquefazione (Robertson & Wride 1997) | Probabilità Liquefazione (Juang et al. 2001): |
|-----------------|------------------|-----------------|----------------|--|---|
| <b>Strato 3</b> | <b>15,80</b>     | <b>11,06491</b> | <b>0,00963</b> | <b>1,482</b>   | <b>9.36864E-14</b>                            |
| Strato 4        | 16,20            | 6,296719        | 0,020101       | 1,62   | 0.074890596                                   |
| Strato 5        | 20,80            | 10,46401        | 0,018501       | 9,481  | 1.69622E-13                                   |
| Strato 6        | 21,80            | 18,04908        | 0,068335       | 61,184   | 5.23785E-16                                   |
| Strato 7        | 30,00            | 15,24586        | 0,056728       | 30,742   | 4.42345E-15                                   |

#### Cptu 2

|                 | Prof. Strato (m) | Qc (mpa)        | Fs (mpa)        | Fattore di sicurezza a liquefazione (Robertson & Wride 1997) | Probabilità Liquefazione (Juang et al. 2001): |
|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|--|---|
| Strato 1        | 1,00             | 3,38535         | 0,022396        | 3,27   | 0.009092137                                   |
| Strato 2        | 3,90             | 3,870161        | 0,001771        | 2,001  | 0.040361957                                   |
| <b>Strato 3</b> | <b>14,30</b>     | <b>8,030121</b> | <b>0,003613</b> | <b>2,541</b>   | <b>0.001785793</b>                            |
| Strato 4        | 22,00            | 12,45911        | 0,030661        | 7,127  | 5.41122E-05                                   |
| Strato 5        | 30,00            | 18,08102        | 0,045717        | 56,903   | 1.30861E-06                                   |

### Cptu 3

|                 | Prof. Strato<br>(m) | Qc<br>(mpa)     | Fs<br>(mpa)     | Fattore di sicurezza a<br>liquefazione<br>(Robertson & wride<br>1997) | Probabilità<br>Liquefazione (Juang<br>et al. 2001): |
|-----------------|---------------------|-----------------|-----------------|---|---|
| Strato 1        | 1,00                | 3,374583        | 0,055293        | 2,146   | 0.000812423   |
| <b>Strato 3</b> | <b>8,00</b>         | <b>5,685176</b> | <b>0,009878</b> | <b>2,768</b>  | <b>0.015149084</b>                                  |
| Strato 4        | 11,40               | 10,19827        | 0,023819        | 9,301   | 0.000359032   |
| Strato 5        | 13,00               | 5,748208        | 0,008709        | 1,288   | 0.141493126   |
| Strato 6        | 24,50               | 12,02672        | 0,035724        | 13,435  | 0.000114853   |
| Strato 7        | 30,00               | 18,39732        | 0,073143        | 56,491  | 1.33843E-06   |

### Cptu 4

|                 | Prof. Strato<br>(m) | Qc<br>(mpa)     | Fs<br>(mpa)     | Fattore di sicurezza a<br>liquefazione<br>(Robertson & wride<br>1997) | Probabilità<br>Liquefazione (Juang<br>et al. 2001): |
|-----------------|---------------------|-----------------|-----------------|---|---|
| <b>Strato 2</b> | <b>13,00</b>        | <b>6,077371</b> | <b>0,020914</b> | <b>3,477</b>  | <b>0.0075286</b>                                    |
| Strato 4        | 20,00               | 12,01306        | 0,036283        | 15,554  | 7.29438E-05   |
| Strato 6        | 30,00               | 17,7877         | 0,071744        | 57,374  | 1.2756E-06  |

*Tabella 11 liquefazione da correlazione con dati da prova cptu 1-4 .*

Attraverso l'utilizzo del Software Static Probing di Geostru. Si è applicato il metodo semplificato e la procedura originaria (Robertson & Wride, 1997) per i risultati della prove da cui risulta Fattore di Sicurezza sempre >1.25 e pari a circa a 1.20. (Secondo le normative europea e italiana è suscettibile di liquefazione un terreno in cui lo sforzo di taglio generato dal terremoto supera l'80% dello sforzo critico che ha provocato liquefazione durante terremoti passati e quindi deve essere FS >= 1,25.)

#### Liquefazione SPT Sondaggio 1

|                                | NSPT     | Prof. Strato<br>(m) | Nspt corretto per<br>presenza falda | Correlazione                    | Fs<br>Liquefazione |
|--------------------------------|----------|---------------------|-------------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| <b>[2] - limo<br/>sabbioso</b> | <b>7</b> | <b>14.00</b>        | <b>7</b>                            | <b>Seed e Idriss<br/>(1971)</b> | <b>1.026</b>       |
| [4] - sabbia                   | 19.7     | 45.00               | 17.35                               | Seed e Idriss<br>(1971)         | 1.581              |
| [6] - sabbia e limo            | 19       | 60.00               | 17                                  | Seed e Idriss<br>(1971)         | 5.492              |

#### Liquefazione SPT Sondaggio 2

|                               | NSPT        | Prof. Strato<br>(m) | Nspt corretto per<br>presenza falda | Correlazione                    | Fs<br>Liquefazione |
|-------------------------------|-------------|---------------------|-------------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| <b>[2] - SABBIA<br/>MEDIA</b> | <b>1.13</b> | <b>10.00</b>        | <b>1.13</b>                         | <b>Seed e Idriss<br/>(1971)</b> | <b>0.839</b>       |
| [3] - SABBIA<br>LIMOSA        | 1.93        | 20.00               | 1.93                                | Seed e Idriss<br>(1971)         | 1.32               |
| [4] - SABBIA                  | 4.69        | 48.00               | 4.69                                | Seed e Idriss<br>(1971)         | 1.87               |
| [6] - SABBIA<br>FINE          | 3.68        | 60.00               | 3.68                                | Seed e Idriss<br>(1971)         | 2.558              |

*Tabella 12 liquefazione da correlazione con dati da prova SPT 1-2 .*

Per ogni verticale si è valutato anche l'indice del potenziale di liquefazione  $IL$  di seguito definito.

Se è:

- $0 < IL \leq 5$  il rischio di liquefazione è basso
- $5 < IL \leq 15$  il rischio di liquefazione è elevato
- $IL > 15$  il rischio di liquefazione è estremamente elevato

Considerando lo Strato [2] - SABBIA MEDIA, NSPT 1.13, profondità tra 5.0/7.0 m da p.c. a 12.0/15.0 m da p.c. si è utilizzato una correlazione tra  $F_s$  liquefazione e  $IL$ .

| <b>Prova</b> | <b>Strato</b> | <b>Profondità</b>        | <b>Rischio di Liquefazione</b> | <b><math>IL</math></b> |
|--------------|---------------|--------------------------|--------------------------------|------------------------|
| <i>SPT1</i>  | 2             | 4.5-14.5 m da p.c.       | 1,03                           | $5 < IL \leq 15$       |
| <i>SPT2</i>  | 2             | 5.3-10.0 m da p.c.       | 0,84                           | $5 < IL \leq 15$       |
| <i>CPTU1</i> | 3             | Da 13.8 a 16.4 m da p.c. | 1,48                           | $0 < IL \leq 5$        |
| <i>CPTU2</i> | 3             | Da 3.5 a 14.3 m da p.c.  | 2,54                           | $0 < IL \leq 5$        |
| <i>CPTU3</i> | 3             | Da 3.0 a 8.0 m da p.c.   | 2,77                           | $0 < IL \leq 5$        |
| <i>CPTU4</i> | 2             | Da 2.5 a 13.0 m da p.c.  | 3,48                           | $0 < IL \leq 5$        |

Tabella 13: indice del potenziale a liquefazione liquefazione da correlazione con dati da prove SPT e CPTU

Riepilogando, il potenziale a liquefazione indica un rischio Elevato nei pressi delle golene (SPT1-2) mentre risulta Basso nelle zone golenale più estreme all'asse del fiume (CPTU1-4).

Si ricorda, infine, che la liquefazione ha effetti significativi sulle fondazioni profonde in dipendenza del criterio desumibile dallo schema di Figura 50, ovvero i possibili danni significativi si hanno quando il  $F_{spalo}$  è attorno a 1 – 2 e il rapporto di ordinata pari a 0.2 – 0.4 (ovvero lung. Strato non liquefacibile minore di metà della lunghezza del palo).

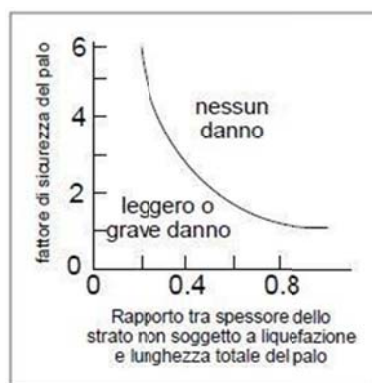


Figura 52: schema comprendente in ascissa il rapporto tra spessore dello strato non soggetto a liquefazione e lunghezza del palo totale, e in ordinata il Fattore di Sicurezza del palo.

## 9 CONCLUSIONI

In base a quanto esposto all'interno della Relazione Geologica relativa al presente progetto, i terreni sono di tipo limoso-argilloso fino a profondità variabile di 3.5-13.0 m circa, con elevate capacità coesive e buone proprietà geotecniche, passanti a sabbie con limo fino a 16.0-20.0 m dal p.c. passanti a sabbie medie compatte fino a circa 48 m da p.c. (corpo sabbioso del sistema alluvionale del Po') aventi buone capacità geotecniche. Infine, livelli argillosi 48,0 e i 58,0 m circa seguiti da un nuovo complesso di sabbie prevalenti con ghiaia fino a 60 m da p.c. e oltre.

In base ai risultati congiunti delle Analisi HVSR e MASW, il calcolo della Velocità equivalente delle onde sismiche nei primi 30 m ha dato risultato di circa 190-200 m/s e dunque si sono identificati i terreni dell'area d'indagine come appartenenti alla Categoria C.

Attraverso l'analisi HVSR, inoltre, si sono dedotte le frequenze fondamentali di vibrazione del terreno, ed è stato accertato che il terreno delle golene Mantovane ed Emiliane si presenta come un filtro che risuona alle frequenze caratteristiche di 1.2-1.5 Hz e di 2.5-4.0 Hz circa. Si è proceduto alla verifica del fenomeno di doppia risonanza terreno-struttura, confrontando queste frequenze del terreno, con le frequenze di naturale vibrazione dell'edificio. Considerando le altezze fuori terra di 19 metri nella porzione più elevata del cavalcavia, assimilabile ad un edificio di 6 piani fuori terra, la frequenza di naturale vibrazione del cavalcavia è di circa 1.6 Hz ovvero piuttosto vicina a quelle di naturale vibrazione del terreno. Va però tenuto conto che il ponte sul Po' presenta fondazioni con pali impostati alla profondità di circa 50 metri dal p.c., il che fa ipoteticamente aumentare l'altezza dell'edificio fino a 70 metri, ed abbassando la frequenza di risonanza a 0.5 Hz gli effetti di doppi risonanza diminuiscono drasticamente.

Per poter delineare l'entità delle opere di adeguamento sismico, è necessario conoscere lo spettro di accelerazione sismica di progetto, attraverso analisi di Risposta Sismica locale di 3° livello. Si è calcolato dunque lo spettro di RSL attraverso analisi monodimensionale con metodo lineare equivalente utilizzando accelerogrammi di input e i dati della stratigrafia da prove CPTU. Questo è stato poi sovrapposto agli spettri di normativa per categorie B, T1 e C, T1: da questo confronto si è dimostrata l'affinità con lo spettro di Categoria sismica C, sia nel caso degli SLV che degli SLD, a differenza di quello della Categoria B, il quale, invece, è risultato troppo poco cautelativo per la zona d'indagine. Lo spettro di Categoria C presenta un valore di picco dell'accelerazione leggermente più alto rispetto al valore di picco dello spettro di Categoria C (per SLV e per SLD), ma comunque lo scarto tra i due risulta inferiore al 20%. Dunque, per soddisfare le prescrizioni delle NTC al capitolo §3.2.3.6, si può considerare entrambi gli spettri attendibili per i calcoli sulle strutture in relazione all'adeguamento sismico del cavalcavia, con preferenza dello spettro di Risposta Sismica Locale.

Infine, è stata verificata la possibilità di liquefazione dei depositi sabbiosi presenti tra 3.50/13.0 e 16.0-20.0 m circa dal p.c.. Considerata la massima magnitudo attesa per la zona d'indagine 5.12 per gli SLV (secondo i dati di disaggregazione della pericolosità sismica di riferimento), la possibilità di liquefazione è elevata nei pressi delle sponde del Fiume Po', mentre il rischio è Basso allontanandosi da letto Fluviale. In ogni caso, la liquefazione dei terreni è mitigata dallo spessore superficiale di suolo argilloso con spessore > 3.0 metri, e dalla Magnitudo del sito di 5.12 Mw vicina al limite di non liquefazione 5 Mw, essere un evento estremamente raro e con qualche possibilità di accadimento in concomitanza con il terremoto più catastrofico che possa avvenire nel territorio, corrispondente ad un tempo di ritorno millenario.

In conclusione, l'area viene giudicata idonea per il proseguo delle opere dell'intervento in progetto, a condizione del rispetto delle prescrizioni indicate nella presente relazione in cui si è palesata la necessità di aumentare opportunamente la sicurezza dell'impalcato del ponte dal punto di vista sismico.



Dott. Geol. Nicola Saviane

Allegati:

*Atlante Fotografico*

## ATLANTE FOTOGRAFICO



*Foto 1 indagine sismica HVSR 1 – sponda Mantovana*



*Foto 2 strumentazione per sismica HVSR*



*Foto 3 indagine sismica MASW 1 – sponda Mantovana*



*Foto 4 strumentazione per sismica MASW*



*Foto 1 indagine sismica HVSR 2 – sponda Emiliana*



*Foto 5 indagine sismica MASW 2 – sponda Emiliana*