



Area Lavori Pubblici Mobilità e Trasporti
Settore Progetti Strategici ed attuazione PNRR
Servizio Ponti e Viadotti

IL DIRETTORE

ing. Simone Agrondi

IL RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO

ing. Guido Andriolo Stagno

PROGETTO

PIANO NAZIONALE DI RIPRESA E RESILIENZA (PNRR) - MISSIONE 2 COMPONENTE 4
INVESTIMENTO 2.2 INTERVENTI PER LA RESILIENZA, LA VALORIZZAZIONE DEL
TERRITORIO E L'EFFICIENZA ENERGETICA DEI COMUNI (M2C4I2.2).
C.I. 14417-ADEGUAMENTO NORMATIVO E CONSOLIDAMENTO NUOVO CAVALCAVIA
SUPERIORE DI MARGHERA - 2° E 3° STRALCIO - CUP F77H18000830004

FASE

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

**MANDANTI****Milano Serravalle Engineering**

Via del Bosco Rinnovato 4/B
 Assago (MI)

TITOLO

GENERALE
RELAZIONE GEOLOGICA

ELABORATO

17_E 2 RE 02

REVISIONE	DATA:	OGGETTO:	REDATTO:	VERIFICATO:	APPROVATO:	SCALA:
						-
rev_00	14.11.2022	prima emissione	SI	ADP	MT	NOME FILE: 1.17_E2_RE02_rel geol.pdf

COMUNE DI VENEZIA

Settore Viabilità Terraferma e Mobilità - Direzione Lavori Pubblici

**PROGETTO DI ADEGUAMENTO SISMICO
DEL CAVALCAVIA SUPERIORE DI MARGHERA -
(PISTA A) - 2° e 3° STRALCIO**

RELAZIONE GEOLOGICA E SISMICA

Pieve di Soligo, 31.08.2020

A handwritten signature in black ink, which appears to read "Nicola Saviane", is written over a circular blue stamp. The stamp contains the text "ORDINE DEI GEOLOGI" at the top, "Dott. Geol. Nicola SAVIANE" in the center, and "REGIONE DEL VENETO" at the bottom. A number "1852" is also visible within the stamp.

Dott. Geol. Nicola Saviane

Indice:

1.	PREMESSA.....	3
2.	INQUADRAMENTO GEOLOGICO	4
2.1	Riferimenti geografici e vincoli.....	4
2.2	Modello geologico.....	8
2.3	IDROGRAFIA ED IDROGEOLOGIA	14
3.	PROGETTAZIONE SISMICA.....	21
3.1	Parametri sismici di base.....	23
3.2	Storicità sismica dell'area	24
3.3	Faglie capaci	27
3.4	Caratterizzazione sismogenetica	28
4.	INDAGINI.....	34
4.1	Indagine sismica MASW.....	35
4.2	Indagine sismica H/V	37
4.3	Prova penetrometrica statica con piezocono (CPTU)	39
5.	RISULTATI DELLE INDAGINI.....	40
5.1	Indagine sismica attiva	40
5.2	Indagine sismica passiva a stazione singola.....	45
5.3	Conclusioni indagini MASW - HVSR	50
5.4	Prove penetrometriche statiche (CPTU)	51
6.	ASPETTI GEOLOGICO-TECNICI.....	57
6.1	Stima parametri geotecnici	57
6.2	prova CPTU 1	58
6.3	Prova CPTU 2	59
6.4	Interpretazione geotecnica	60
7.	RISPOSTA SISMICA LOCALE	62
7.1	Definizione delle scelte progettuali.....	62
7.2	Modello sismostratigrafico	62
7.3	Procedura di analisi	63
7.4	Risultati analisi di risposta sismica locale.....	67
7.5	Stato limite di Salvaguardia della Vita (SLV)	67
7.6	Stato limite di Danno (SLD).....	69
8.	VERIFICA DELLA SUSCETTIVITA' ALLA LIQUEFAZIONE DEI TERRENI	72
9.	CONCLUSIONI.....	75

1. PREMESSA

La presente relazione rientra nell'ambito del PROGETTO DI ADEGUAMENTO SISMICO DEL CAVALCAVIA SUPERIORE DI MARGHERA - (PISTA A) - 2° e 3° STRALCIO.

in particolare si vuole valutare:

- l'effetto della risposta sismica locale mediante specifiche indagini (§ 7.11.3 delle NTC 18);
- gli aspetti geologici e geotecnici, ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto ai fini dell'adeguamento strutturale del cavalcavia.

A seguito di un attento studio "a tavolino", nell'area in esame e nei suoi intorno è stato effettuato un rilievo geologico di dettaglio, compresa l'individuazione degli elementi morfologici ed idrogeologici, e sono state effettuate le seguenti indagini geognostiche-geofisiche:

- n.2 analisi multicanale delle onde di superficie (MASW) con distanza intergeofonica di 3 m e scoppio esterno allo stendimento, per la valutazione del profilo verticale delle velocità delle onde di taglio (calcolo Vs30);
- n.2 analisi dei rapporti spettrali (HVSr) per valutazione delle caratteristiche dinamiche del sito dal punto di vista sismico (calcolo frequenza di risonanza del sito).
- n.2 prove penetrometriche statiche con piezocono, per la parametrizzazione geotecnica del sottosuolo, spinta fino alla profondità di 30,00 m circa dal p.c. (CPTU1 e CPTU2).

La principale normativa di riferimento è la seguente:

- Decreto del Ministero delle Infrastrutture del 17 gennaio 2018 ("Aggiornamento delle nuove norme tecniche per le costruzioni")
- Circ. n.7 del 21/01/2019 "Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»» di cui al decreto mini-steriale 17 gennaio 2018".
- Circ. Reg. 05.04.2000 n.9 "Indirizzi in materia di prescrizioni tecniche da osservare per la realizzazione di opere pubbliche e private".
- Circ. Min. LL.PP. 24/09/88 n. 30483 - "Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione";
- Eurocodice 8 (1998);
- D.Lgs. n.163/2006 "Codice dei contratti pubblici relativi a lavori, servizi e forniture in attuazione delle direttive 2004/17/CE e 2004/18/CE";
- D.P.R. n.207/2010 "Regolamento di esecuzione ed attuazione del D.Lgs. n.163/2006".

2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

2.1 Riferimenti geografici e vincoli

La zona oggetto di studio comprende l'area pertinente i pilastri del Cavalcavia Superiore di Marghera, siti in Via della Pila, nel Comune di Venezia (VE).

Riferimenti geografici punto mediano del cavalcavia presso Via della Pila

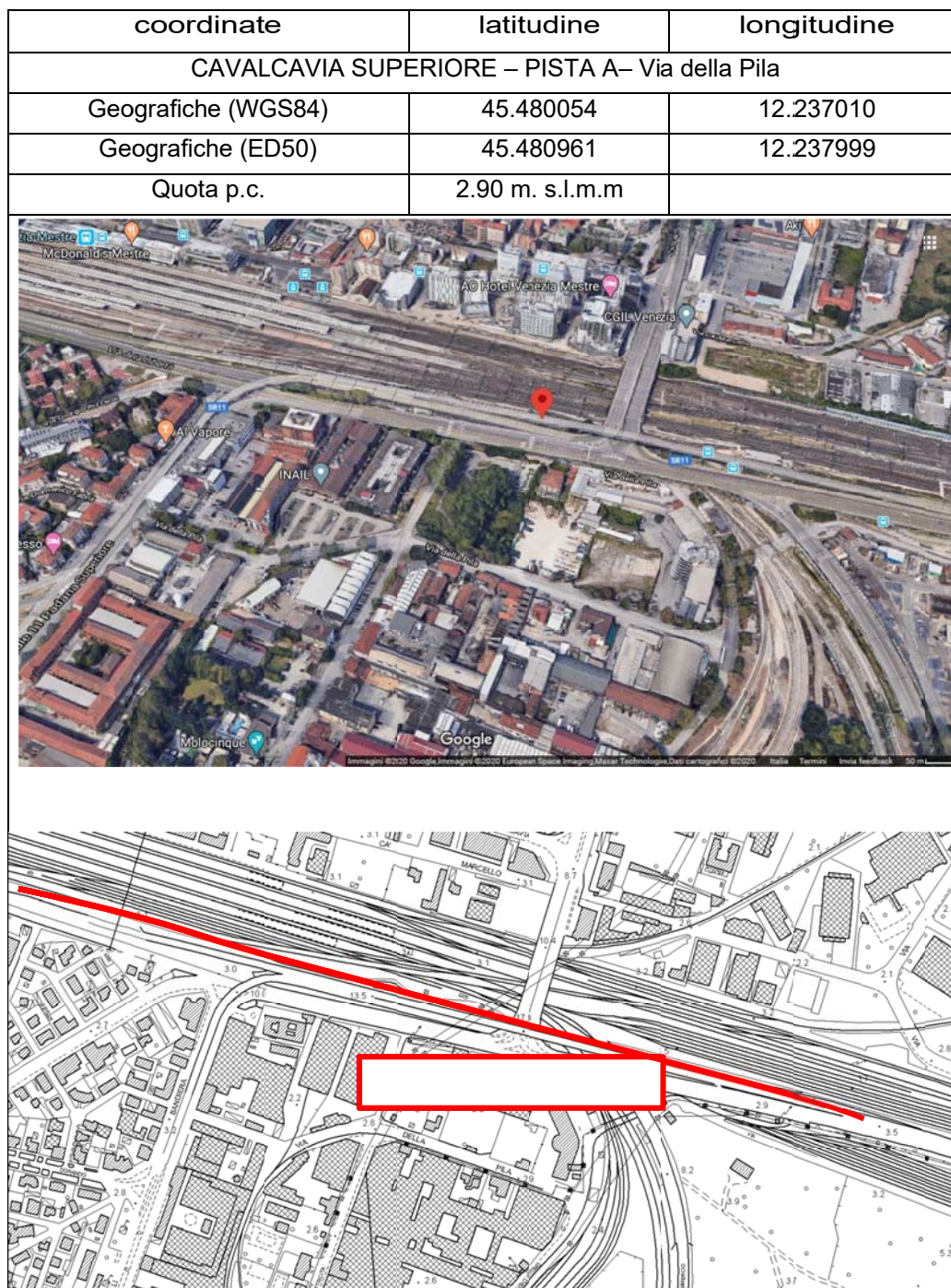


Tabella 1: inquadramento geografico del sito d'indagine

L'area di interesse, secondo la cartografia del PAI¹ risulta inclusa nelle aree a pericolosità idraulica moderata (area soggetta a scolo meccanico). Inoltre, il terreno di fondazione, al di sotto dell'impalcato è parte delle Aree allagate durante gli eventi alluvionali del 26 settembre 2007 (Figura 1).

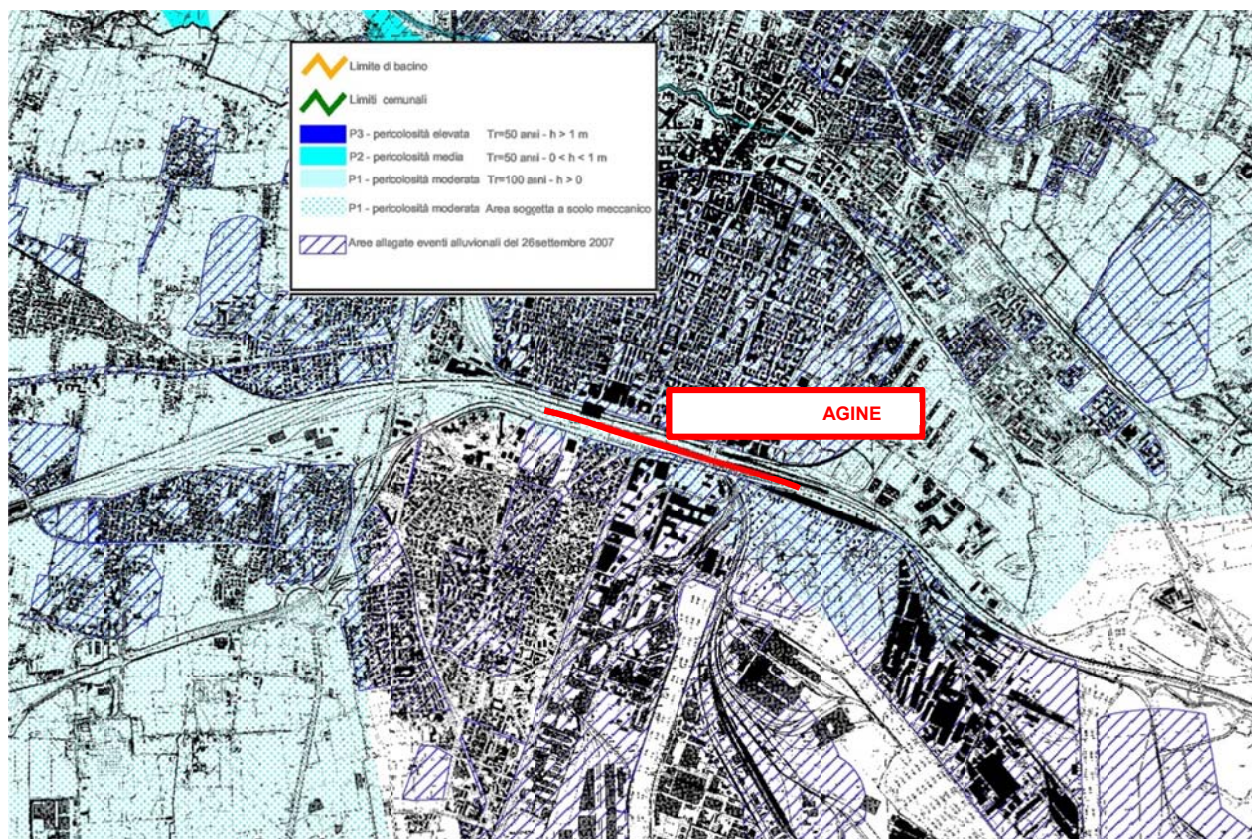


Figura 1 – Estratto fuori scala della Carta del PAI del Bacino Scolante in Laguna di Venezia 2014 (Regione Veneto – Tavola 48 di 80)

L'area d'indagine risulta esclusa da Vincoli, ad eccezione delle Fasce di rispetto stradale e del Vincolo sismico presenti sul territorio (Figura 2), mentre dal punto di vista delle Fragilità, il cavalcavia superiore si trova in zona Idonea per quasi tutto il suo percorso, eccezion fatta per una parte della porzione Est della Rampa A giacente in Area idonea a condizione A, che si trova in zona di Interesse Nazionale e Aeroportuale ed una parte della porzione ovest che si trova in Area idonea condizione G perchè (Figura 3), facente parte delle Aree con corpi idrici recettori in trasformazione (Progetto Moranzani).

Inoltre, è presente falda con profondità minore di 4 m dal p.c con possibili fenomeni di esondazione, pericolosità idraulica moderata (Figura 1). L'area fu coinvolta nei fenomeni alluvionali del 2007.

¹PAI - Progetto di Piano Stralcio per l'assetto idrogeologico del bacino scolante in laguna di Venezia, Comitato Istituzionale del 10/09/2012 – D.P.C.M. del 21/09/2013 – G.U. n. 97 del 28/04/2014.

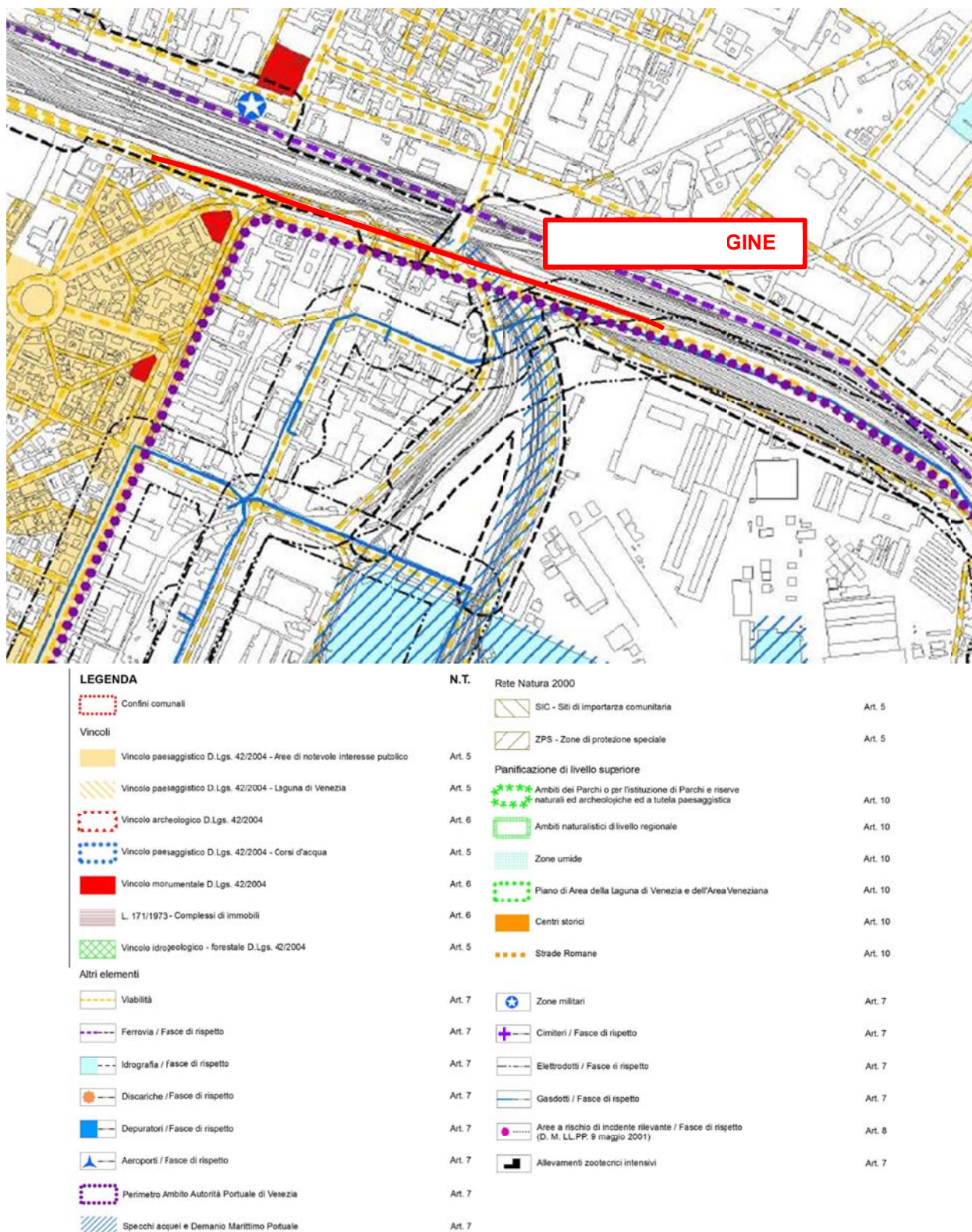
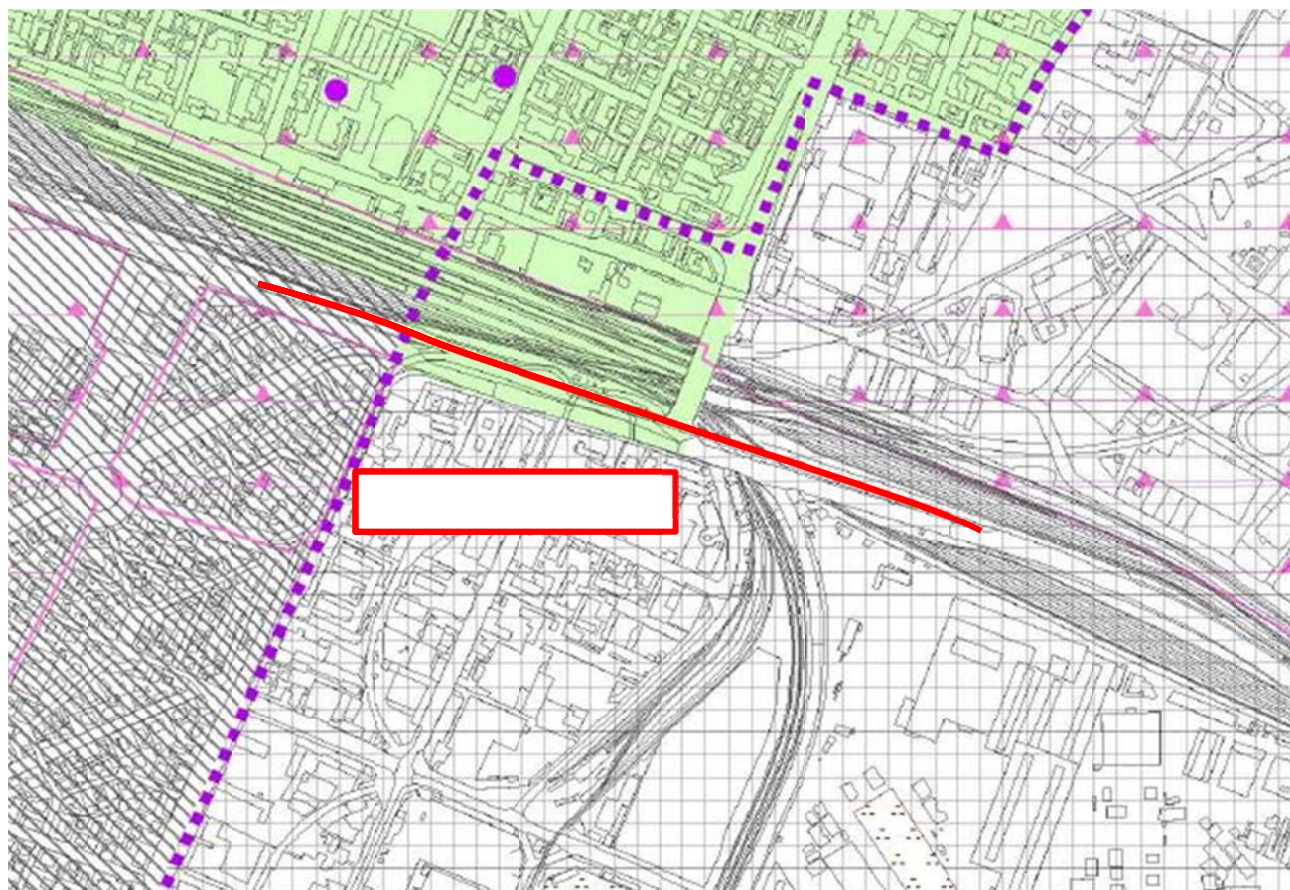


Figura 2 – Estratto fuori scala della Tavola 1 - Carta dei Vincoli del PAT del Comune di Venezia – scala originale 1:10000



LEGENDA

Compatibilità geologica

- Aree idonee
- Aree idonee a condizione A
(Sito di Interesse Nazionale e Aeroporto)
- Aree idonee a condizione B
(Centro storico e Isole della Laguna)
- Aree idonee a condizione C
(Aree lagunare sommersa comprese barene, velme, canali lagunari)
- Aree idonee a condizione D
(Aree litorali e isole emerse)
- Aree idonee a condizione E
(Aree con caratteristiche geotecniche scadenti)
- Aree idonee a condizione F
(Aree con corpi idrici ricettori a rischio idraulico)
- Aree idonee a condizione G
(Aree con corpi idrici ricettori in trasformazione - Progetto Moranzani -)
- Aree idonee a condizione H
(Aree di discarica non attiva)
- Aree non idonee
(Aree di discarica attiva)
- Confine comunale

N.T.

Aree a dissesto idrogeologico

- Aree esondabili o a ristagno idrico
(per insufficienza della rete strutturale fognaria e di bonifica) Art. 16
- Aree esondabili o a ristagno idrico
(durante eventi di mareggiata) Art. 16
- Aree esondabili o a ristagno idrico
(durante eventi di marea) Art. 16
- Altre componenti
- Corsi d'acqua Art. 17
- Arenili Art. 17
- Aree umide mirori Art. 12, 17
- Laguna Art. 17
- Stabilimenti a rischio rilevante Art. 8, 17
- Siti inquinati (Fonte: Direzione Ambiente e Sicurezza del Territorio
Servizio Suolo e Verde Pubblico - Ufficio Suolo e Rifiuti, 1° semestre 2008) Art. 17
- Siti inquinati di interesse Nazionale Art. 17
- Aree per il rispetto dell'ambiente naturale, della flora e della fauna Art. 17

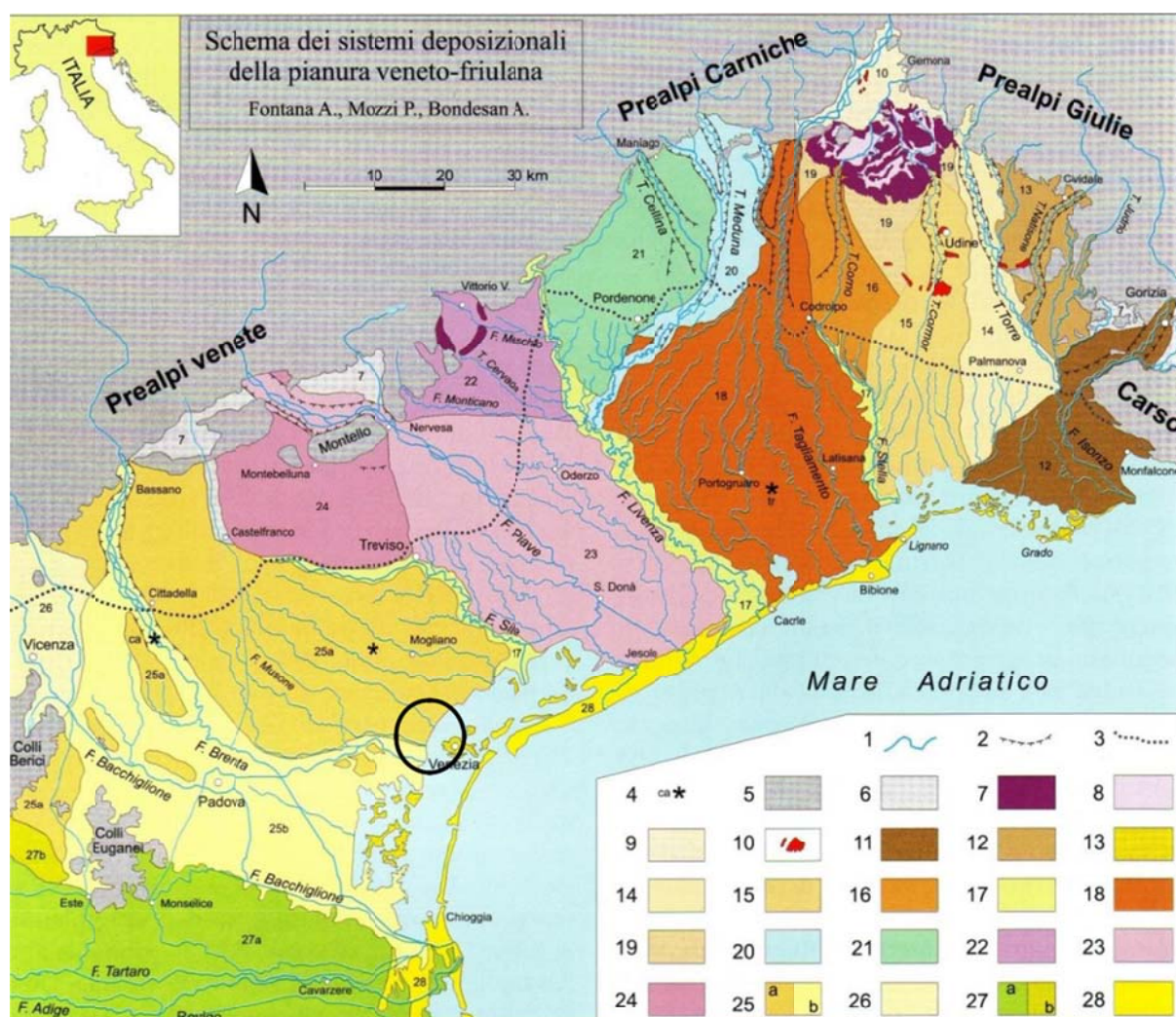
Figura 3 – Estratto fuori scala della Tavola 3 - Carta delle fragilità del PAT del Comune di Venezia
– scala originale 1:10000

2.2 Modello geologico

L'area in esame è collocata ai margini tra Mestre e Marghera (VE), al di sotto del Cavalcavia superiore lungo Via della Pila, in una zona pianeggiante, con quote attorno ai 3 m.s.l.m.

• Inquadramento geologico

L'area in oggetto si colloca nella bassa pianura costiera situata a ridosso della Laguna di Venezia, dove affiorano sedimenti prevalentemente medi o fini (sabbie, limi ed argille), riferibili alla porzione distale del megafan pleistocenico del Brenta (Figura 4).



Legenda: 1) idrografia; 2) orlo delle principali scarpate fluviali; 3) limite superiore delle risorgive; 4) ubicazione delle sezioni stratigrafiche citate nel testo: figg. 3.6a, 3.6b e 3.10; 5) Prealpi, Colli Euganei e Berici; 6) aree alluvionali di corsi d'acqua prealpini; 7) cordoni morenici degli anfiteatri di Piave e Tagliamento; 8) depressioni intermoreniche; 9) piana di Osoppo; 10) terrazzi tettonici dell'alta pianura friulana; 11) megafan dell'Isonzo-Torre; 12) conoide del Natisone-Judrio; 13) isole lagunari; 14) megafan del Torre; 15) megafan del Cormor; 16) megafan del Corno di San Daniele; 17) sistemi dei principali fiumi di risorgiva (Stella, Livenza e Sile), localmente incisi; 18) megafan del Tagliamento; 19) aree interposte tra megafan, appartenenti al sandur del Tagliamento; 20) megafan del Meduna; 21) conoide del Cellina; 22) conoidi dei fiumi Monticano, Cervada e Meschio, e degli scaricatori glaciali di Vittorio Veneto; 23) megafan del Piave di Nervesa; 24) megafan del Piave di Montebelluna; 25) sistema del Brenta: a) settore pleistocenico (megafan di Bassano), b) pianura olocenica del Brenta con apporti del Bacchiglione; 26) conoide dell'Astico; 27) sistema dell'Adige: a) pianura olocenica con apporti del Po; b) pianura pleistocenica; 28) sistemi costieri e deltizi.

Figura 4: Schema dei sistemi deposizionali della pianura veneto-friulana (da Bondesan et al., Geomorfologia della Provincia di Venezia, 2004)

La genesi di tale ambiente deposizionale è inizialmente da riferire all'abbassamento del livello marino durante l'ultimo periodo glaciale pleistocenico (massimo glaciale 22.000 anni b.p.), che portò all'emersione di una vasta porzione dell'Adriatico settentrionale, con la linea di costa settentrionale attestata alla latitudine di Ancona.

La successiva fase climatica verificatasi nell'Olocene fu caratterizzata da un innalzamento della temperatura, con il conseguente arretramento dei ghiacciai.

Durante tale fase il livello del mare raggiunse un livello prossimo a quello attuale, innalzando il livello di base dei fiumi e favorendo la deposizione della fascia di sedimenti olocenici litorali e fluvio-palustri che formano la bassa pianura costiera.

Il primo segno dell'instaurarsi di un ambiente lagunare risale a circa 6.000 anni fa, con la deposizione di sedimenti prevalentemente sabbioso-limosi. La sedimentazione olocenica è stata particolarmente attiva nella bassa pianura, nella quale i sedimenti di ambiente palustre e lagunare oggi ricoprono, con spessori talora rilevanti, anche strati archeologici di età romana.

Tuttavia in alcune zone del settore centrale del retroterra lagunare, dalla zona di Mestre fino in prossimità della Piave Vecchia, la sedimentazione durante le fasi finali del Tardoglaciale e durante l'Olocene è stata scarsa o nulla.

Dal punto di vista stratigrafico è quindi possibile suddividere il sottosuolo dell'area veneziana in due complessi deposizionali diversi:

- a) quello lagunare-litoraneo olocenico prevalentemente sabbioso-limoso con presenza di resti di conchiglie che testimoniano l'ingressione marina;
- b) quello, sottostante al primo, continentale pleistocenico, rappresentato da alternanze di orizzonti argilloso-limosi, subordinatamente sabbiosi, con frequenti intercalazioni torbose, le cui caratteristiche tessiturali e paleontologiche rivelano il carattere continentale.

I due complessi, continentale del pleistocene superiore e lagunare-costiero dell'olocene, sono ben separati tra loro da un orizzonte di argilla, che per la prolungata emersione ha subito un processo di sovraconsolidazione e ossidazione subaerea. Tale orizzonte è conosciuto con il termine locale di "caranto", litologicamente rappresentato da un'argilla grigio-giallastra, generalmente molto compatta.

Nell'ambito del comprensorio lagunare la giacitura e lo spessore del caranto sono molto variabili, anche fino a scomparire del tutto. Da Figura 3 si può notare che lo strato di caranto tende ad affiorare in terraferma e si affossa verso i litorali (verso il settore sud orientale) con un'immersione verso Est Sud-Est. Nell'area in esame non è stata rilevata la presenza diretta di Caranto. E' possibile che esso, nella zona d'indagine, originariamente affiorasse in corrispondenza della superficie (1-2 m.s.l.m.m, vedi Figura 5), e che sia stato rimosso durante le operazioni di posa della pavimentazione stradale, che si estende nei primi 2.0-2.5 m di profondità dal p.c. come attestato dall'esecuzione delle prove CPTU (Capitolo 4.2.3) che hanno richiesto l'esecuzione di un preforo con carotatrice per poterla oltrepassare e dopodiché si è incontrato direttamente uno strato sabbioso (vedi seguenti paragrafi).

In generale, le caratteristiche litostratigrafiche dell'area d'indagine possono rifarsi a quelle dell'area di Porto Marghera, che sono state descritte in occasione della ricostruzione del Modello geologico e idrogeologico nel Master Plan per la bonifica dei siti inquinati di Porto Marghera (Master Plan per la bonifica dei siti inquinati di Porto Marghera, 2004), in seguito raffinato con l'indagine idrogeologica (Indagine idrogeologica sull'area di Porto Marghera – seconda fase – 2009) sviluppata dalla Direzione Progetto Venezia e della Provincia di Venezia.

Si riporta a seguire (Figura 6) la stratigrafia lungo un profilo EW passante poco a nord tratto oggetto d'indagine.

Dunque , per il sito d'indagine ci si può aspettare una litostratigrafia comprendente:

- Da 0.0 a 1.0-2.0 fino a 3.0 metri dal p.c. :Terreno impermeabile ("caranto") e/o Riporto
- Da 1.0-2.0 m a 8.0-10.0 metri dal p.c.: Prevalentemente permeabili (sabbioso)
- Da 8.0-10.0 m a 30.0 metri dal p.c. Prevalentemente impermeabili (argille) con intercalazioni permeabili (sabbie, sabbie-limose, limi-sabbiosi);

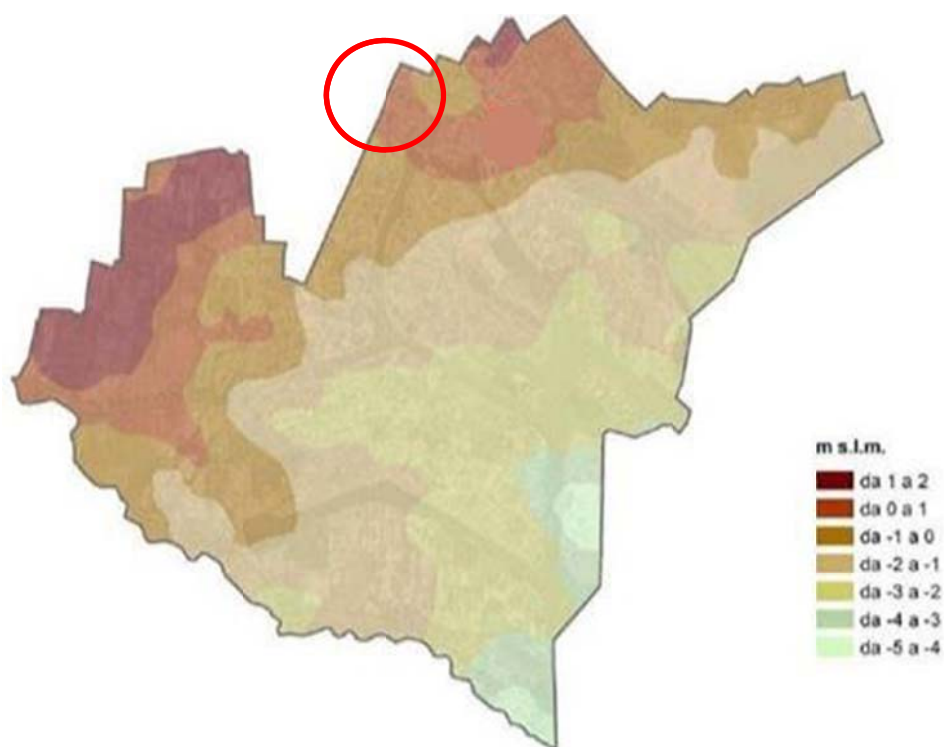


Figura 5 Quota del tetto del caranto ottenuta per interpolazione (fonte : "Indagine idrogeologica sull'area di Porto Marghera").

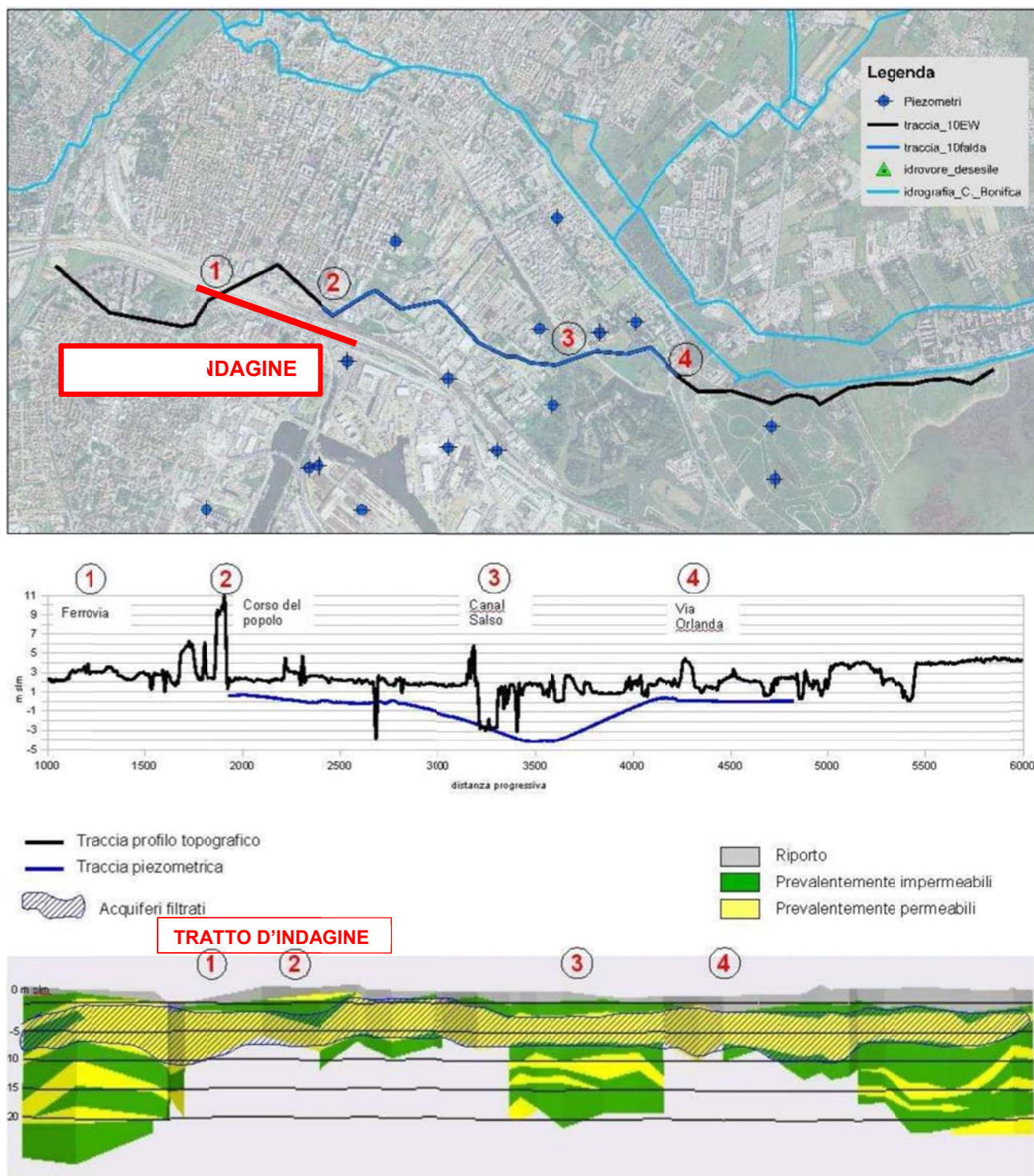
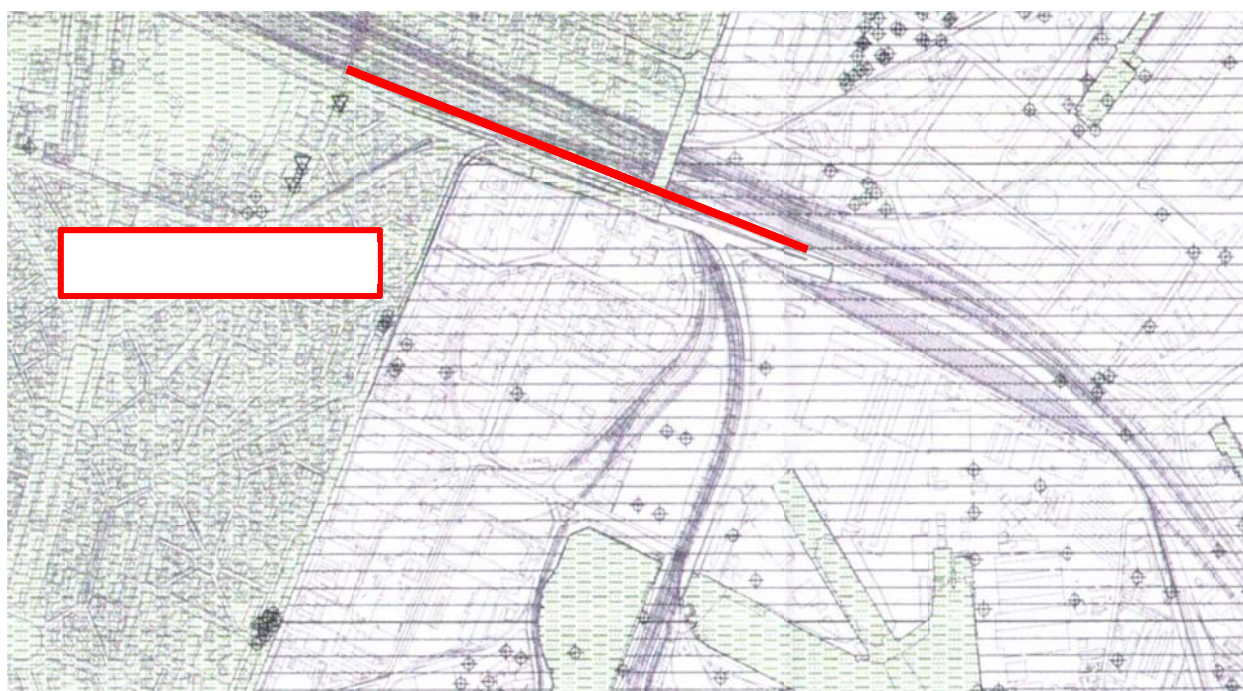


Figura 6: profilo WE10 passante poco a nord del tratto d'indagine (fonte : "Indagine idrogeologica sull'area di Porto Marghera").

Secondo la Carta Litologica del PAT del Comune di Venezia (**Figura 7**) I terreni attraversati dalla fondazioni del tracciato della rampa A in esame, ricadono quasi totalmente all'interno dei Materiali alluvionali a tessitura prevalentemente limo-argillosa. Soltanto la porzione est del ponte si trova all'interno delle aree imbonite della Laguna, che presentano un ampio strato di materiali eterogenei di natura frequentemente antropica (terreno di riporto , anch'esso a granulometria prevalentemente fine poco permeabile) in superficie nei primi 2-5 metri dal p.c. Si segnala, dunque, che il tratto del Cavalcavia superiore, nella sua porzione più ad est ricade all'interno delle aree imbonite e presenta terreno di riporto in superficie (texture a linee orizzontali in Figura 7).



Materiali alluvionali, morenici, fluviogiaciali, lacustri, palustri e litorali





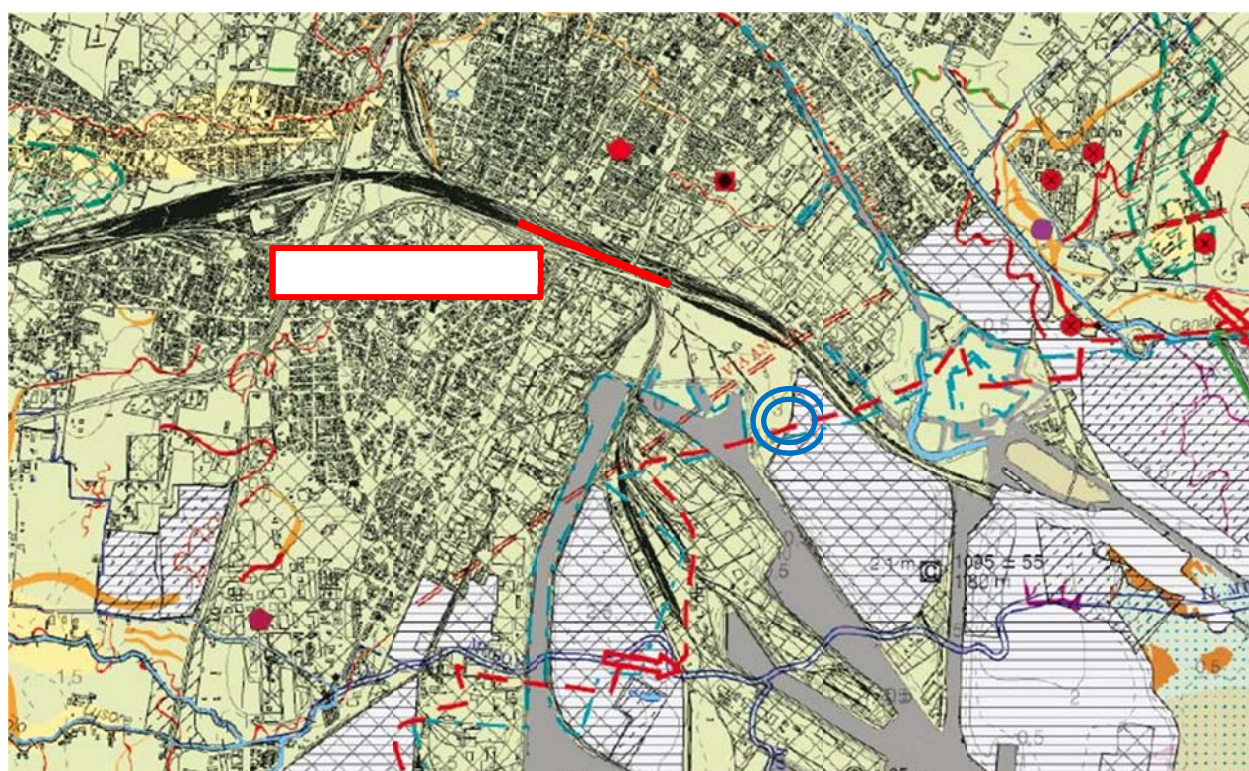
-  Materiali alluvionali, fluviogiaciali, morenici o lacustri a tessitura prevalentemente limo-argillosa
-  Materiali alluvionali, fluviogiaciali, morenici o lacustri a tessitura prevalentemente sabbiosa
-  Materiali di deposito palustre a tessitura fine e torbiere
-  Materiali di riporto

Figura 7: Estratto della Carta Litologica del PAT del Comune di Venezia

• **Inquadramento geomorfologico**

Il calalcavia superiore rettilineo e la rampa discendente sono parte dell'intensa area d'urbanizzazione di Mestre e Marghera. Tuttavia le caratteristiche geomorfologiche dei terreni nel caso del sito in esame si possono considerare del tutto simili a quelle originarie, caratterizzate, ovvero, da una coltre di materiali limo-sabbiosi alluvionali con gradazione verso sud-est. L'aspetto principalmente importante nell'assetto geomorfologico attuale dell'area di Marghera-Porto Marghera, è dovuta alle imponenti opere di colmo eseguite nel secolo XIX, che resero elevate aree precedentemente soggette a periodici allagamenti dovuti alle escursioni di marea attraverso la messa in opera di una coltre di materiali di riporto. La zona d'indagine risulta all'interno quasi totalmente dei materiali alluvionali facenti parte dell'entroterra continentale e solo nella sua porzione più ad Est risulta all'interno dell'area ex-laguna bonificata.



Traccia di corso fluviale estinto a livello della pianura o leggermente incassato:



Dosso fluviale:



Margine lagunare desunto da cartografia storica (1763)

Area urbanizzata

VIA ANNA strada romana

Sabbia

Limo

Argilla

Terrapieno

Figura 8 – Estratto fuori scala della “Carta geologica della Provincia di Venezia”, versione cartacea (PTCP, 2012)

2.3 IDROGRAFIA ED IDROGEOLOGIA

- **Inquadramento idrografico**

L'assetto idrografico attuale della terraferma veneziana è il prodotto dell'opera plurisecolare dell'uomo, iniziata a partire dal 1500. Tale opera è consistita dapprima nella deviazione dei principali corsi d'acqua (Piave, Sile, Brenta, Bacchiglione) che, sfociando in Laguna, ne mettevano a rischio la navigabilità, e di conseguenza le attività della città lagunare a causa del trasporto solido.

Successivamente, ma in particolare a partire dal 1850, fu avviata una fase di bonifica meccanica, grazie a macchinari per il sollevamento delle acque, delle valli e delle aree in cui si verificavano frequenti allagamenti e ristagni delle acque.

La città di Mestre è attraversata dal fiume Marzenego, che nasce da una risorgiva situata nei pressi di Resana (TV). In prossimità del centro abitato di Mestre, il Marzenego si biforca in due rami (Ramo delle Beccherie o San Lorenzo a nord e Ramo Campana o delle Muneghe a sud) che proseguono in due canali artificiali, il Canale Osellino ed il Canal Salso (Figura 9). Questi ultimi sfociano in laguna rispettivamente presso Tessera (a causa di una diversione operata nel 1502 allo scopo di allontanare la foce da Venezia) e presso San Giuliano.

La sicurezza idraulica della gran parte della città, compresa quella di interesse, è affidata ad un complesso sistema di idrovore che consentono l'allontanamento delle acque meteoriche dall'abitato.

Per quanto riguarda l'area d'indagine, sono assenti corsi d'acqua di qualunque origine nel raggio di circa 650 metri. A questa distanza in direzione sud vi è l'inizio del canale artificiale denominato Canale Industriale Nord. A maggiore distanza in direzione Nord-est vi è il passaggio del sopraccitato Canale Salso. Il Fiume Marzenego si trova ad una distanza di 1.9 km a nord dal sito d'indagine.



Figura 9 – mappa con i principali corsi d'acqua dell'area d'indagine.

• **Inquadramento idrogeologico**

All'interno dei sedimenti sabbiosi, sottostanti la copertura superficiale, è presente una prima falda freatica la cui direzione di deflusso è diretta Sud-Ovest Nord-Est. A maggiore profondità sono presenti numerosi acquiferi sovrapposti ed intervallati da livelli impermeabili (acquitardi).

La pubblicazione “Sistemi idrogeologici della Provincia di Venezia”, che individua i più significativi acquiferi superficiali dell'intero territorio provinciale, inserisce l'area d'indagine nel “Sistema idrogeologico centrale”, costituito da acquiferi sabbiosi riferibili a corpi di canale interconnessi legati al percorso pleistocenico del fiume Brenta. Tale acquifero presenta spessore variabile tra 5 e 30 m e larghezza media di 2000 – 3000 m. (Figura 10). Nella zona in esame la profondità del corpo sabbioso è attorno ai 3 m dal p.c. ed il suo spessore di 8-10 m .

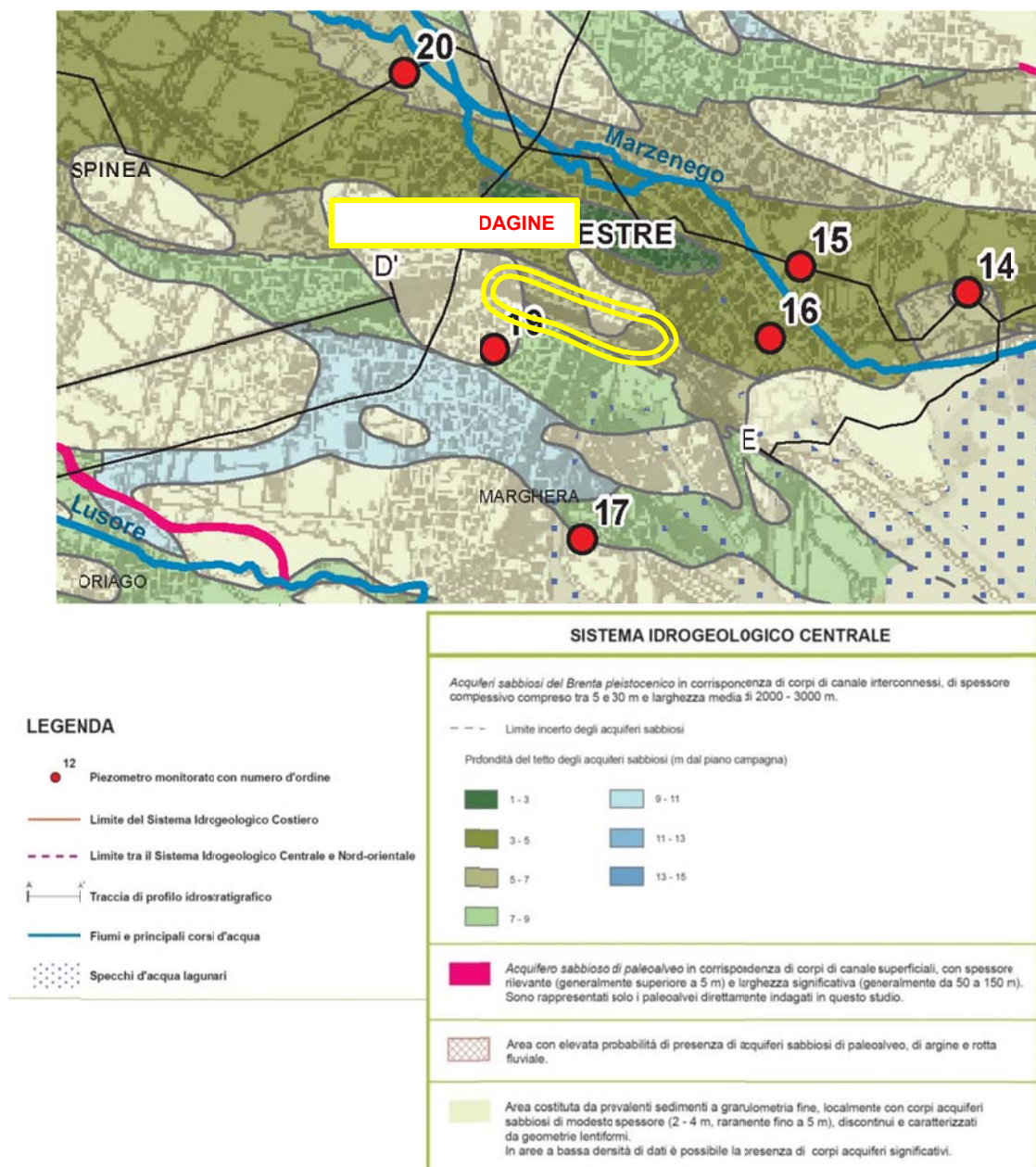


Figura 10: Estratto della Carta dei Sistemi idrogeologici della Provincia di Venezia

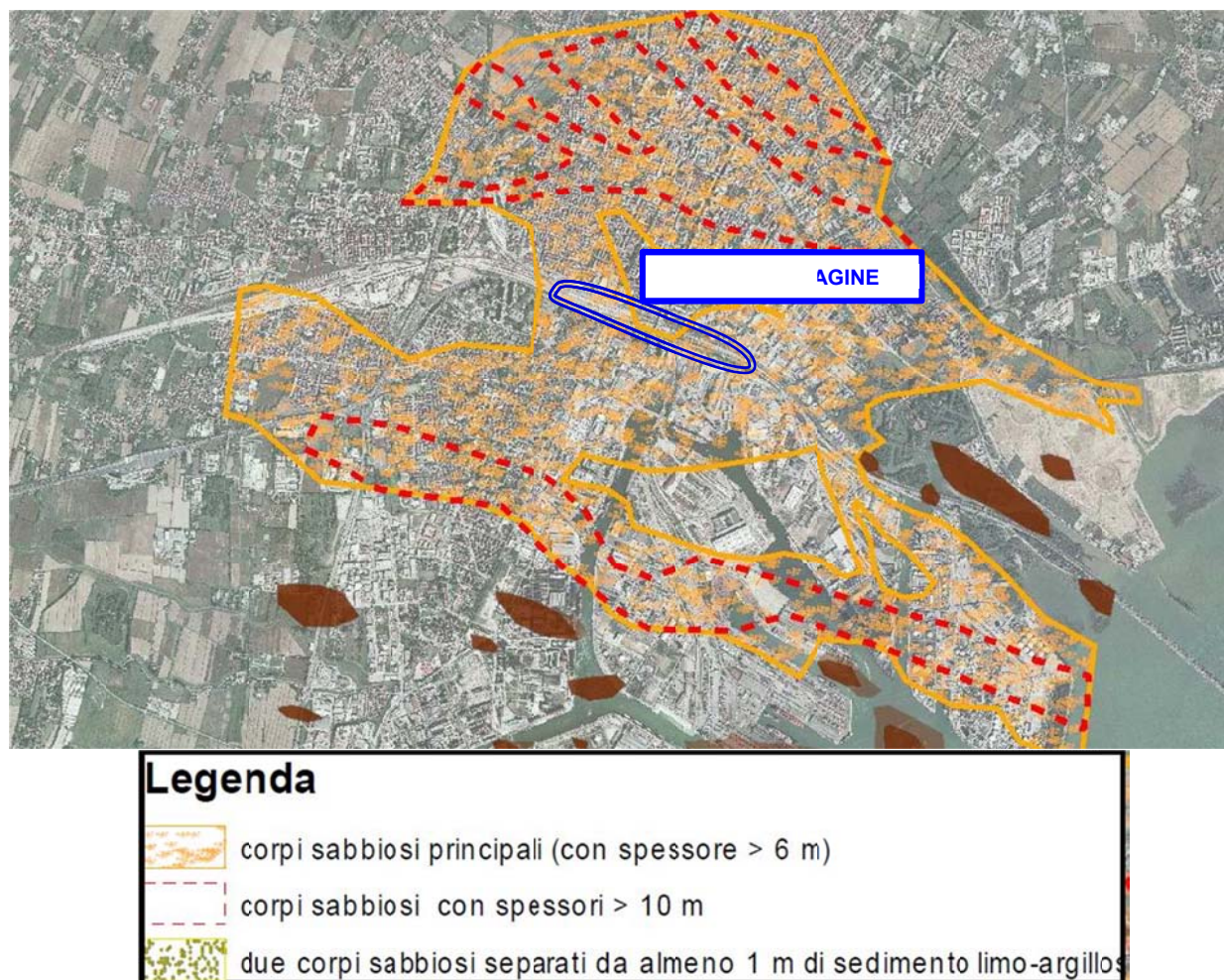


Figura 11: Principali corpi sabbiosi (fonte: Indagine idrogeologica sull'area di Porto Marghera, seconda fase, marzo 2009, provincia di Venezia)

Secondo lo studio sopracitato, condotto sull'area di Porto Marghera, sulla base dei dati stratigrafici contenuti nella banca dati del Servizio Geologico Provinciale sono stati identificati in totale n. 4 corpi sabbiosi (Figura 11) allungati da Ovest verso Est, in parte idrogeologicamente connessi tra loro, caratterizzati da spessori continui fino a oltre 10-20 metri di sabbia, con collegamenti con strutture analoghe a monte. In Figura 12 vien riportato il quadro idrogeologico, che rappresenta una semplificazione della complessa idrogeologia dell'area, dovuta all'elevata variabilità delle litologie presenti.

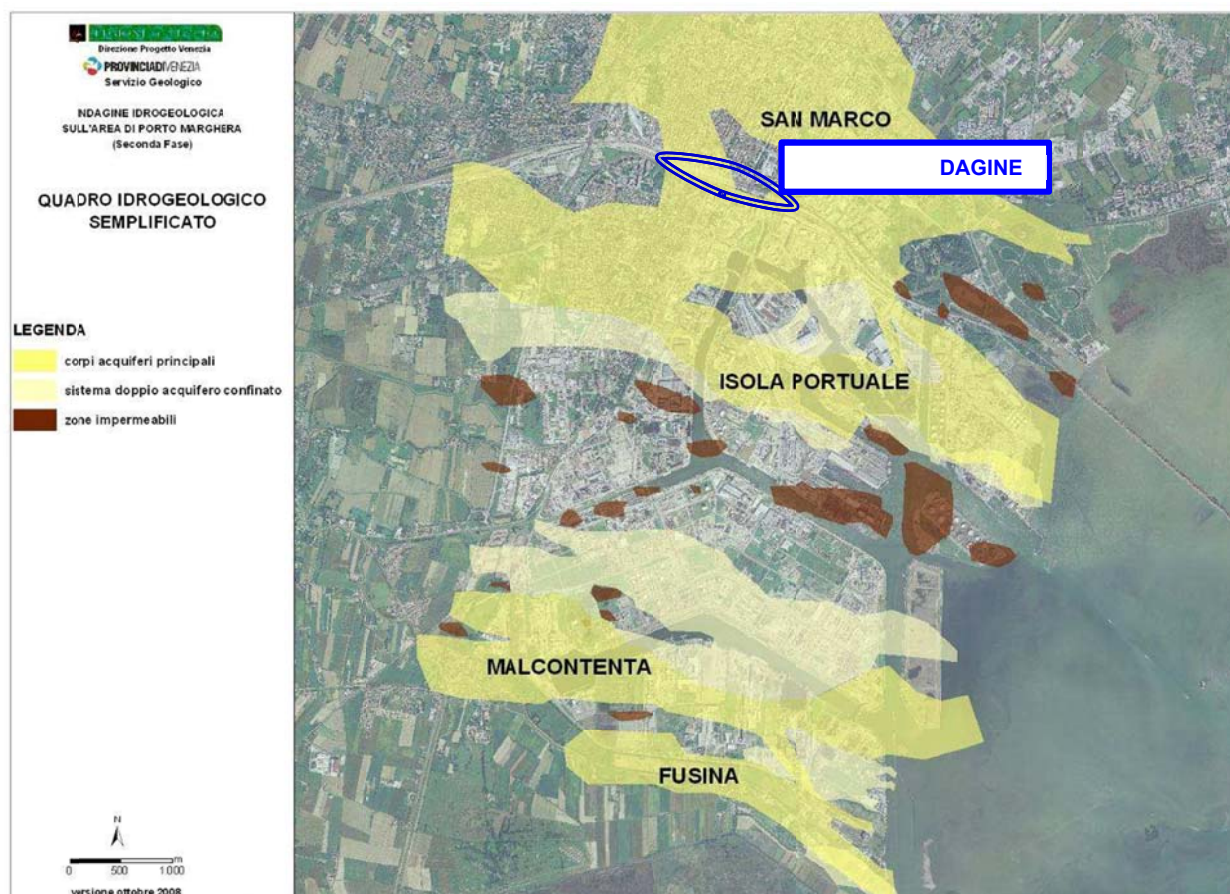


Figura 12: Quadro idrogeologico semplificato dell'area del SIN (fonte "Indagine idrogeologica sull'area di Porto Marghera – seconda fase – 2009")

Procedendo da sud verso nord si incontrano in ordine:

1. **corpo sabbioso di Fusina** – situato proprio in corrispondenza del Naviglio Brenta, e un corpo piuttosto tabulare con spessori massimi compresi fra –2 e –13 m s.l.m. e larghezza incerta poiché il limite sud risulta non definito;
2. **corpo sabbioso di Malcontenta** - posizionato nel sottosuolo della darsena sud dell'area industriale di Porto Marghera, è una successione di corpi sabbiosi sovrapposti di larghezza totale attorno a 800 m, con una parte profonda compresa circa fra –10 e almeno -30 m s.l.m
3. **corpo sabbioso dell'area portuale** – situato in corrispondenza dell'area ferroviaria del porto commerciale, e un corpo sabbioso largo circa 400 m e di spessore compreso fra –3 e –18 m s.l.m.;
4. **corpo sabbioso di viale San Marco** – situato in corrispondenza dell'area sud-orientale di Mestre attraversata da Via Forte Marghera e Viale San Marco.

Il corpo sabbioso che interessa il sito in esame è quello dell'area portuale. I corpi sabbiosi a granulometria prevalente fine si presentano qui compatti, con poche intercalazioni di materiali fini, con spessore medio di circa 11 m, tetto a quota compresa fra -0 e –1 m e letto a circa - 8 m s.l.m.

Si evidenzia la presenza di uno strato argilloso limoso semi-continuo, al tetto del corpo sabbioso, che determina quindi un acquifero confinato. Il quadro idrogeologico è il frutto della contrapposizione di aree con "acquiferi" ed "aquicludi" a trasmissività nettamente differenziata.

Dallo studio dell'andamento della prima falda acquifera, questa si attesta attorno a 1 m.s.l.m.m nell'area d'indagine. Considerando la quota del piano campagna pari a 3 s.l.m.m., la soggiacenza dell'acquifero presente all'interno del corpo sabbioso è di circa 2 m dal p.c.

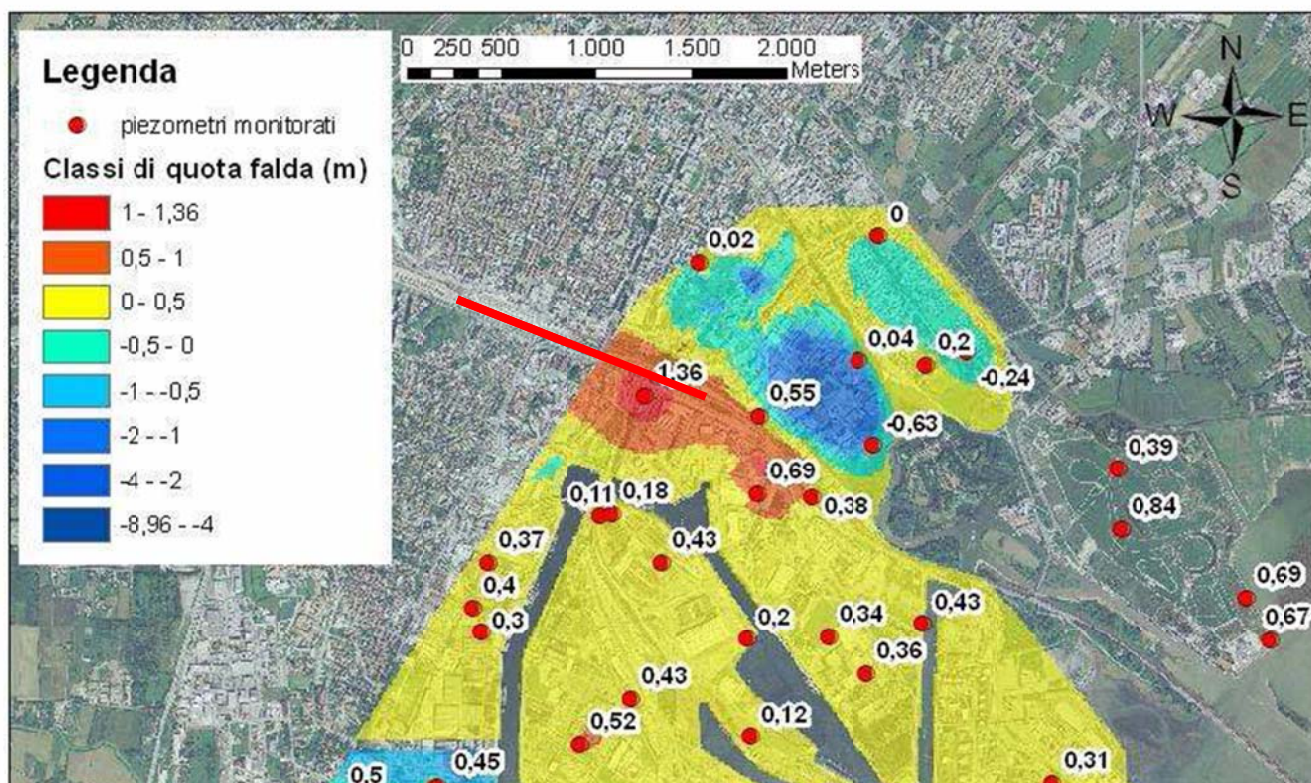


Figura 13 :Quadro idrogeologico semplificato dell'area del cavalcavia superiore di Marghera (VE) (fonte "Indagine idrogeologica sull'area di Porto Marghera – seconda fase – 2009")

La trasmissività dei principali corpi acquiferi ha valori (mediani) tipici compresi tra $3 \cdot 10^{-5}$ e 10^{-4} m/s, mentre, per quanto riguarda la permeabilità media dei terreni, la Carta delle Permeabilità dei suoli TAV. 6 (primo metro) del Piano di Emergenza della Provincia di Venezia indica tale zona con permeabilità moderatamente basse pari a $1 \cdot 10^{-7}$ - $1 \cdot 10^{-6}$ m/s (Figura 14). Un tale valore, non proprio dei terreni del corpo sabbioso di cui al precedente paragrafo, è probabilmente da riferire alla presenza di litologie prevalentemente limoso argillose ("caranto" e "barena") nei primi 1-2 metri di successione rispetto alle sabbie di prima falda (vedi Capitolo 2.2).



Classe	Molto bassa	Bassa	Moderatamente bassa	Mod. alta	Alta	Molto alta
Ksat ($\mu\text{m/s}$)	<0,01	0,01-0,1	0,1-1	1-10	10-100	>100
Ksat (cm/h)	<0,0035	0,0035-0,035	0,035-0,35	0,35-3,5	3,5-35	>35

Figura 14: Estratto della Carta delle permeabilità della Provincia di Venezia.

Infine, secondo la Carta Idrogeologica del PAT del Comune di Venezia (Figura 15), la zona d'indagine non rientra all'interno di aree con Pericolosità idraulica.

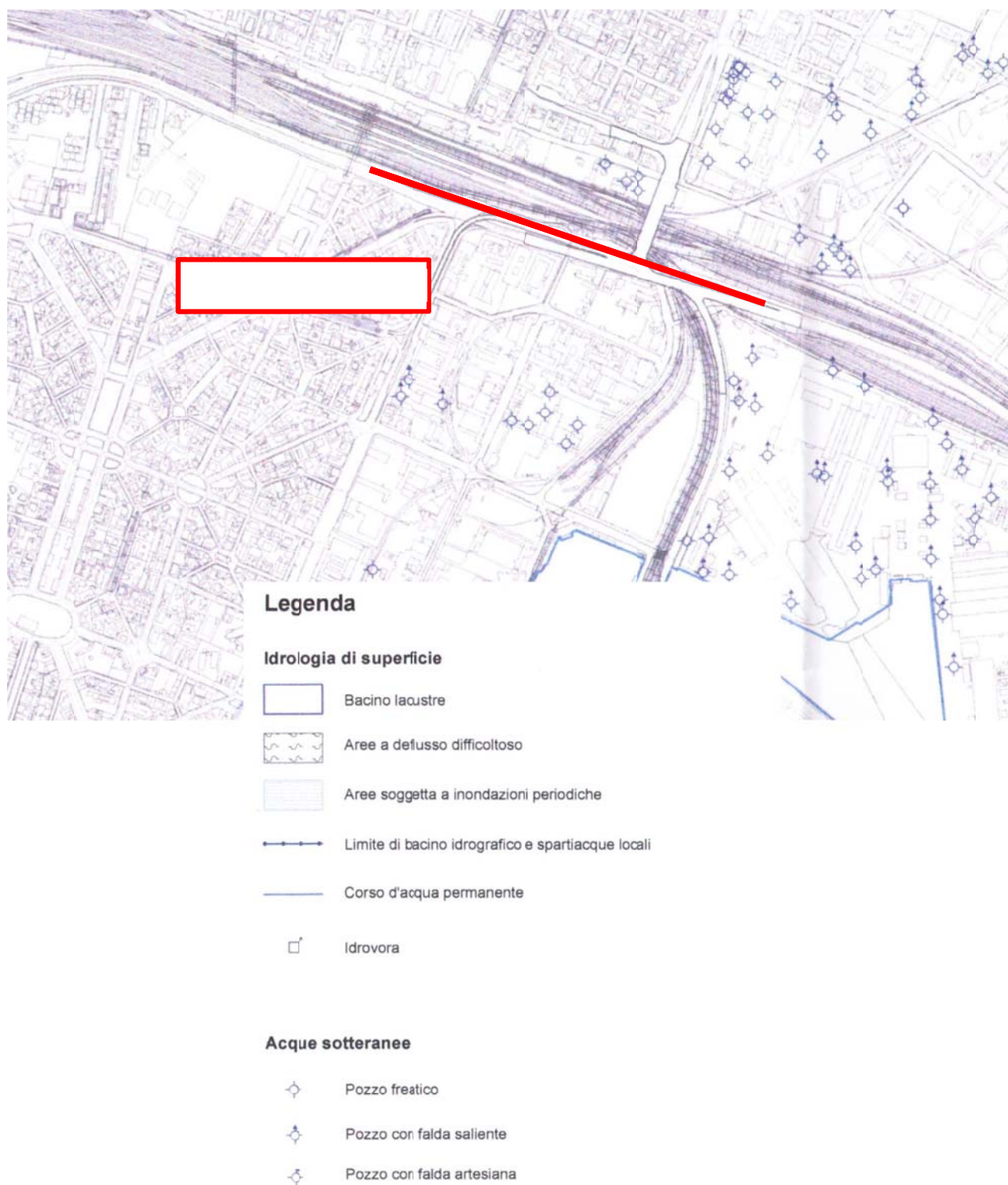


Figura 15: Carta Idrogeologica del PAT del Comune di Venezia.

3. PROGETTAZIONE SISMICA

La nuova normativa in materia di classificazione sismica del territorio nazionale e il recepimento a livello regionale (DGR 845/2010) includono il Comune di Venezia nella zona 4 (Figura 16), a sismicità bassa ($0.050 \leq a_g \leq 0.150$).

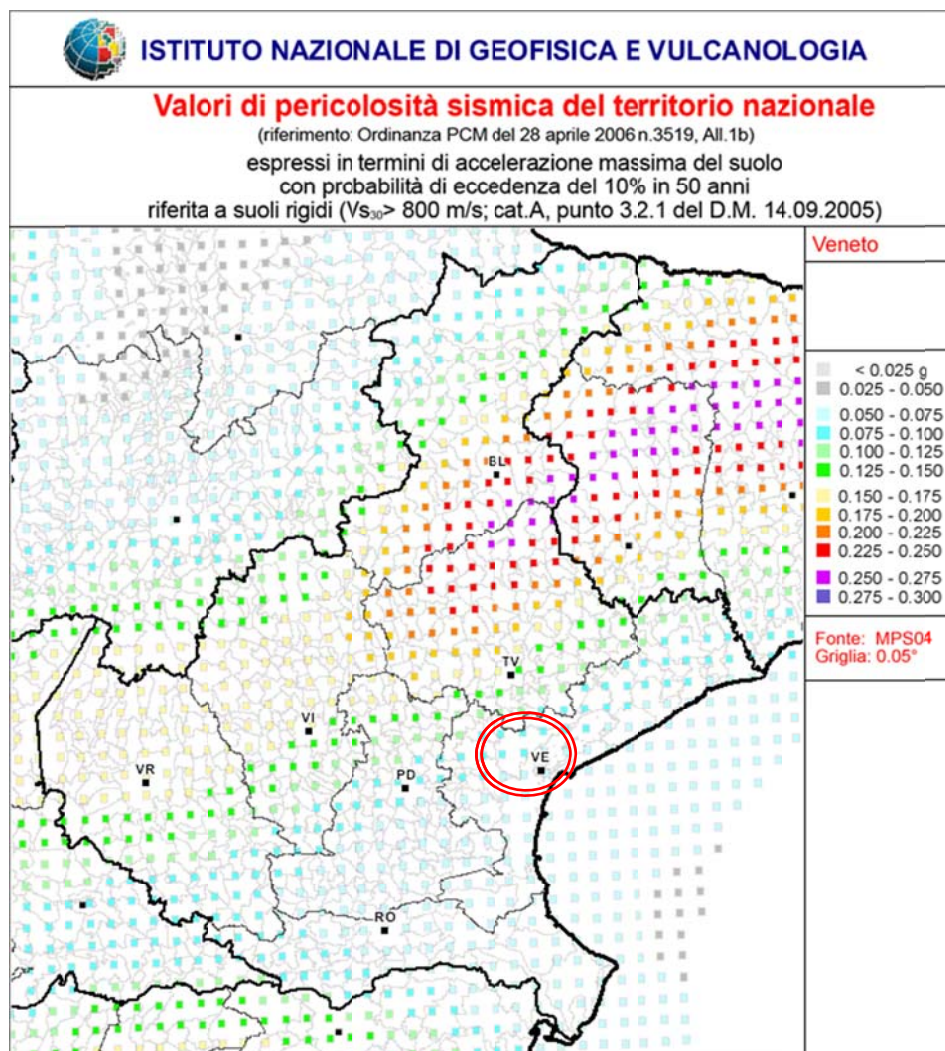


Figura 16- Estratto (fuori scala) della Classificazione sismica del territorio del Friuli Venezia Giulia (da Allegato alla Delibera della Giunta Regionale n.845 del 6 maggio 2010, B.U.R. n. 20 del 19 maggio 2010).

L'associazione granulometrica presente, è in prevalenza argillosa nella porzione più profonda dei depositi, tra -9.0 e -30 m dal p.c.) mentre è prevalentemente limo-sabbiosa nella porzione superficiale fino a circa 9 metri dal p.c. dunque in questo caso ricade all'interno del fuso normalmente interessato da liquefazione. Si ritiene assai improbabile che fenomeni di questo tipo possano comunque verificarsi (vedi capitolo 8).

In merito all'Ordinanza n. 3519/2006² la località oggetto di interesse risulta compresa tra punti con accelerazione con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni (riferita a suoli rigidi caratterizzati da $V_{s30} > 800$ m/s) di $a_g = 0.075 - 0.100$ g (cod. ID 8540, 8541, 8319 e 8318) (Figura 17).

² Ordinanza n. 3519 del 28.04.2006 della Presidenza del Consiglio dei Ministri (Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone)

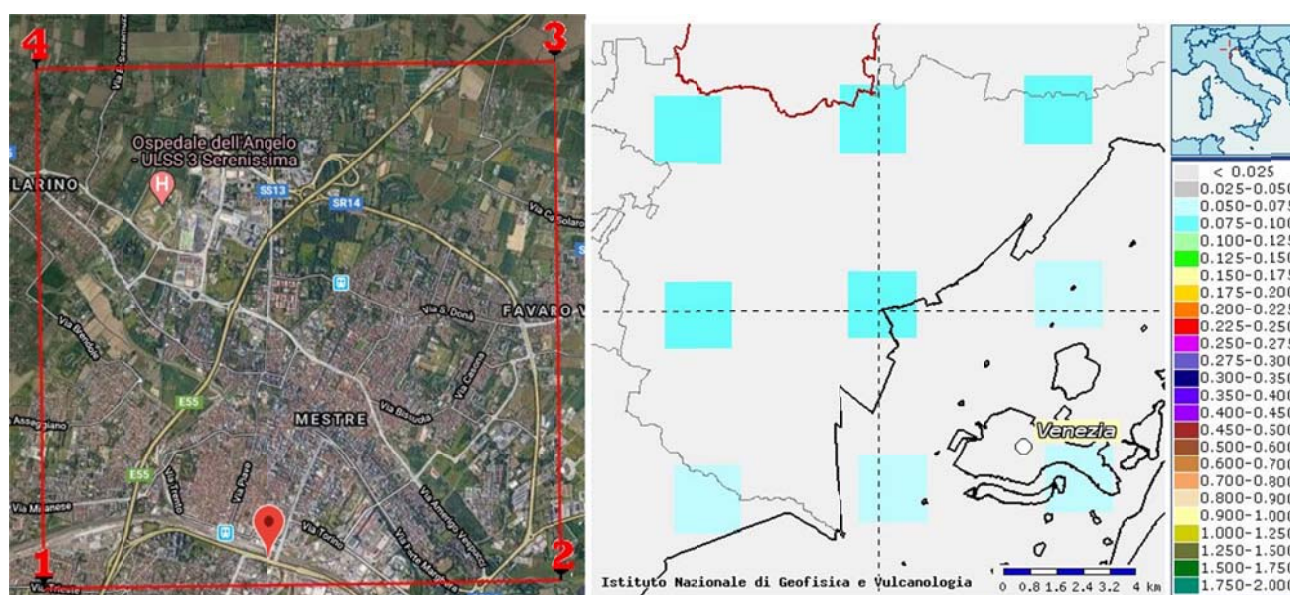


Figura 17- Vertici della maglia di appartenenza (Ag) in riferimento all'Ordinanza n. 3519/2006.

In ottemperanza alla nuova normativa (DM 14/01/2008) e sulla base dei risultati delle indagini sismiche eseguite ed esposte a seguire, e visto le informazioni bibliografiche analizzate (studio geologico del PAT comunale in primis), i terreni di fondazione vengono inseriti nella **Categoria di Sottosuolo C** (*Depositi di terreni a grana grossa mediamenti 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*) e, per quanto riguarda le condizioni topografiche, nella categoria **T1** (*superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i < 15^\circ$*).

Categoria di sottosuolo	C
Categoria topografica	T1

Tabella 2: categoria stratigrafica e topografica per la zona d'indagine.

I risultati delle Indagini sismiche eseguite hanno permesso, dunque, di stabilire la categoria di sottosuolo (vedi capitolo 4) ed, inoltre, di sviluppare il più adeguato spettro di risposta elastico per il progetto (capitolo 6).

3.1 Parametri sismici di base

Di seguito vengono riportati gli stati limite, parametri e coefficienti sismici riferiti a costruzioni di **Classe IV: Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità. Industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente. Reti viarie di tipo A o B, di cui al DM 5/11/2001, n. 6792, "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade", e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non altresì serviti da strade di tipo A o B. Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico. Dighe connesse al funzionamento di acquedotti e a impianti di produzione di energia elettrica.. [...]. e di Vita nominale pari a 50 anni**, come definiti dalle NTC 2008. La Vita nominale deve comunque essere stabilita in fase progettuale (≥ 50 anni secondo le NTC 2008) (p.to C.2.4.1 della Circolare n.617/09). (**Tabella 3**)..

Sito in esame (coordinate ED50):		Siti di riferimento (coordinate ED50):			
latitudine:	45,480937	Sito 1	ID: 12525 Lat: 45,4781	Lon: 12,2080	Distanza: 2427,366
longitudine:	12,238864	Sito 2	ID: 12526 Lat: 45,4788	Lon: 12,2792	Distanza: 3154,471
Classe:	4	Sito 3	ID: 12304 Lat: 45,5288	Lon: 12,2782	Distanza: 6142,618
Vita nominale:	50	Sito 4	ID: 12303 Lat: 45,5281	Lon: 12,2070	Distanza: 5799,468

Parametri sismici:			Coefficienti sismici:		
Categoria sottosuolo: C			SLO:		
Categoria topografica: T1			Ss:	1,500	
Periodo di riferimento: 100anni			Cc:	1,640	
Coefficiente cu: 2			St:	1,000	
Operatività (SLO):			Kh:	0,012	
Probabilità di superamento: 81 %			Kv:	0,006	
Tr: 60 [anni]			Amax:	0,566	
ag: 0,038 g			Beta:	0,200	
Fo: 2,554			SLD:		
Tc*: 0,260 [s]			Ss:	1,500	
Danno (SLD):			Cc:	1,560	
Probabilità di superamento: 63 %			St:	1,000	
Tr: 101 [anni]			Kh:	0,014	
ag: 0,047 g			Kv:	0,007	
Fo: 2,492			Amax:	0,695	
Tc*: 0,301 [s]			Beta:	0,200	
Salvaguardia della vita (SLV):			SLV:		
Probabilità di superamento: 10 %			Ss:	1,500	
Tr: 949 [anni]			Cc:	1,450	
ag: 0,109 g			St:	1,000	
Fo: 2,608			Kh:	0,039	
Tc*: 0,375 [s]			Kv:	0,020	
Prevenzione dal collasso (SLC):			Amax:	1,601	
Probabilità di superamento: 5 %			Beta:	0,240	
Tr: 1950 [anni]			SLC:		
ag: 0,139 g			Ss:	1,480	
Fo: 2,609			Cc:	1,430	
Tc*: 0,395 [s]			St:	1,000	
			Kh:	0,050	
			Kv:	0,025	
			Amax:	2,024	
			Beta:	0,240	

Tabella 3: parametri sismici di base dell'area di studio (estratto da app Geostru PS)

3.2 Storicità sismica dell'area

La provincia di Venezia occupa un'area dell'estensione approssimativa di 2500 kmq dei quali circa 2000 kmq sono rappresentati da territorio di pianura e circa 500 kmq da superfici lagunare.

La sismicità nella fascia di media e bassa pianura ed in quella dei settori alpini risulta decisamente modesta. Altre zone attive sono la fascia di confine con la regione della Carinzia (Austria) e soprattutto la zona di confine con la Slovenia.

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 18 e 19).

Nel caso di Mestre vengono evidenziati 16 eventi di riferimento, in un periodo compreso tra il 1511 e il 2016. La maggior parte dei terremoti di magnitudine 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 ≥ 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/>.

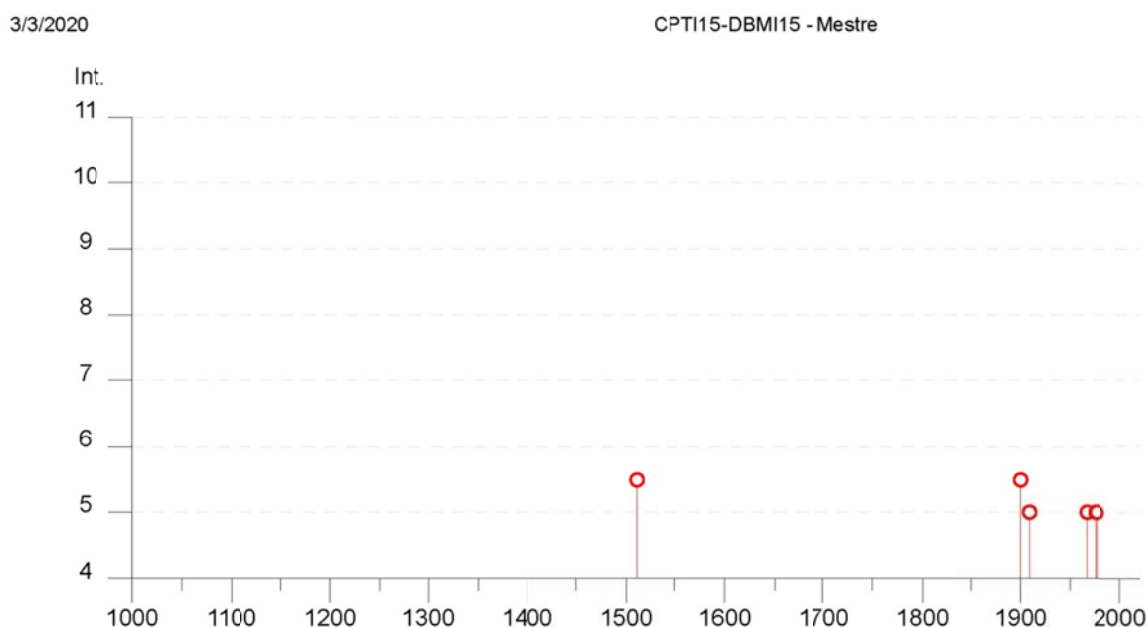


Figura 18- rappresentazione grafica degli eventi sismici con Magnitudo > 5 registrati nel territorio di Mestre (<http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>).

Mestre

PlaceID	IT_28411
Coordinate (lat, lon)	45.493, 12.242
Comune (ISTAT 2015)	Venezia
Provincia	Venezia
Regione	Veneto
Numero di eventi riportati	16

Effetti		In occasione del terremoto del									
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw	
5-6	1511	03	26	15	30		Friuli-Slovenia	120	9	6.32	
NF	1898	01	16	13	10		Romagna settentrionale	110	6	4.59	
5-6	1900	03	04	16	55		Asolano	98	6-7	5.05	
3-4	1904	03	10	04	23	0	Slovenia nord-occidentale	57			
2	1907	04	25	04	52		Veronese	122	6	4.79	
2	1908	07	10	02	13	3	Carnia	119	7-8	5.31	
5	1909	01	13	00	45		Emilia Romagna orientale	867	6-7	5.36	
3	1943	07	24	01	44		Feltrino	29	7	5.07	
5	1967	12	30	04	19		Emilia Romagna orientale	40	6	5.05	
2-3	1968	06	22	12	21	3	Val Lagarina	27	6-7	4.74	
3	1972	10	25	21	56	1	Appennino settentrionale	198	5	4.87	
5	1976	05	06	20	00	1	Friuli	770	9-10	6.45	
5	1977	09	16	23	48	0	Friuli	94	6-7	5.26	
3	1983	11	09	16	29	5	Parmense	850	6-7	5.04	
3	2008	12	23	15	24	2	Parmense	291	6-7	5.36	
3-4	2016	10	30	06	40	1	Valnerina	379		6.61	

Figura 19 Eventi sismici con Magnitudo>5 registrati nel territorio di Mestre (VE) (<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)
Spinea (Orgnano)	25	6
Mogliano Veneto	6	8
San Giorgio in Alga	1	9
Marcon	1	9
Martellago	5	9
Venezia	149	10
Murano	4	10

Figura 20- Eventi sismici con Magnitudo>5 registrata in località entro i 10 km dal territorio di Mestre (<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'Emilia Romagna orientale, Friuli-Carnia, Alpi-Cansiglio, Asolo, Colli Veronesi, ma anche zone più distanti tra l'Emilia Romagna e l'Abruzzo.

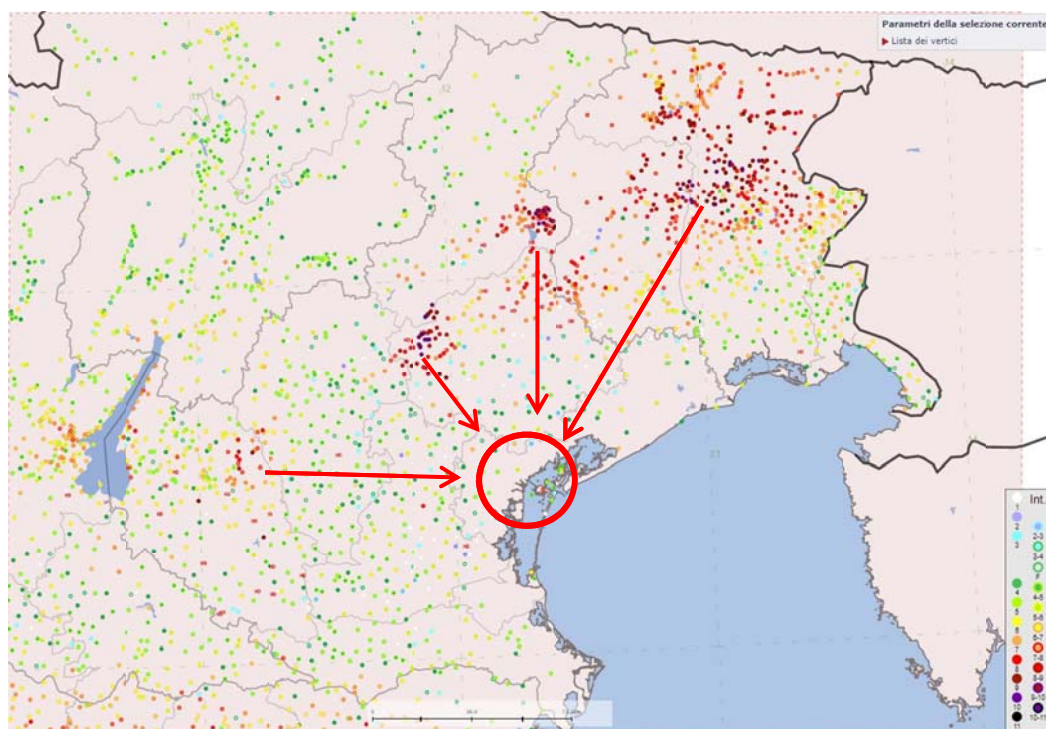


Figura 21 - Carta della sismicità storica per la zona di Mestre-Venezia (cerchiata in rosso) (da SLEJKO D., 2006).

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

NMDP	DATA	LAT N	LONG E	Mw
379 Marche	30/10/2016	42.830	13.109	6.61
770 Friuli	06/05/1976	46,241	13.119	6,45
120 Friuli-Slovenia Cansiglio	26/03/1511	46.209	13.216	6,32
867 Emilia Romagna Orientale	13/01/1909	44.579	11.688	5.36

Tabella 4: terremoti principali registrati nell'area d'indagine con magnitudo (M) $\geq 5,0$ con le coordinate geografiche degli ipocentri.

La magnitudo di momento sismico M_W è una scala di misura dell'energia sismica che utilizza il momento sismico M_0 . E' utilizzata soprattutto per i terremoti più forti. Il momento sismico è definito come:

$$M_0 = \mu F s \text{ con}$$

μ = rigidità della roccia.

F = estensione della superficie di faglia dove è avvenuto il movimento. S = entità dello spostamento lungo tale superficie.

La magnitudo di momento sismico MW si ottiene dalla relazione:

$$MW = 2/3 \log_{10} M_0 - 6.0$$

Questa formula è valida per i terremoti di cui si hanno misure strumentali. Per i terremoti storici la MW è stata stimata basandosi sui valori di intensità sismica (Scala Mercalli).

Per il sito in esame, i dati dell'INGV forniscono un valore medio di magnitudo M= 5.620 e distanza epicentrale d= 52.100 km (Figura 22) per gli Stati Limite di Salvaguardia della Vita (SLV).

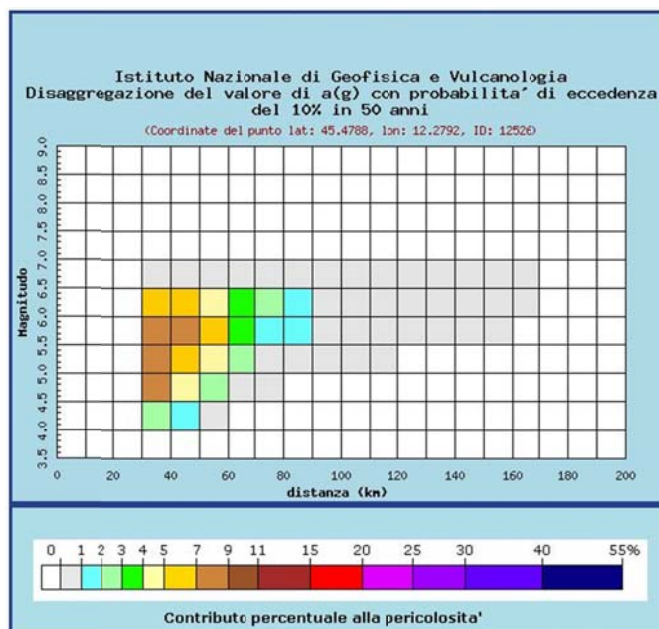


Figura 22: Dati di disaggregazione del valore di a(g) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni

3.3 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) non riporta faglie capaci. Va detto comunque che il catalogo ITHACA riporta la presenza sul territorio veneto di diverse faglie capaci, tra queste si segnalano quelle più prossime all'area di interesse: la faglia *Padova Est* e la faglia *Schio-Vicenza*, a oriente rispetto al sito d'indagine, la faglia *Montebelluna*, passante ad ovest in prossimità dell'aeroporto di Tesserà, la faglia *Sandriago-Barchisso 2* posizionata più a nord rispetto alla prima. Tutte queste faglie hanno direzione circa NW-SE e comportamento prevalentemente trascorrente. A nord, invece, prevalgono faglie inverse con direzione circa SE-NW ovvero parallele alle prealpi trevigiane e vicentine perpendicolari rispetto alle precedenti (Figura 23).

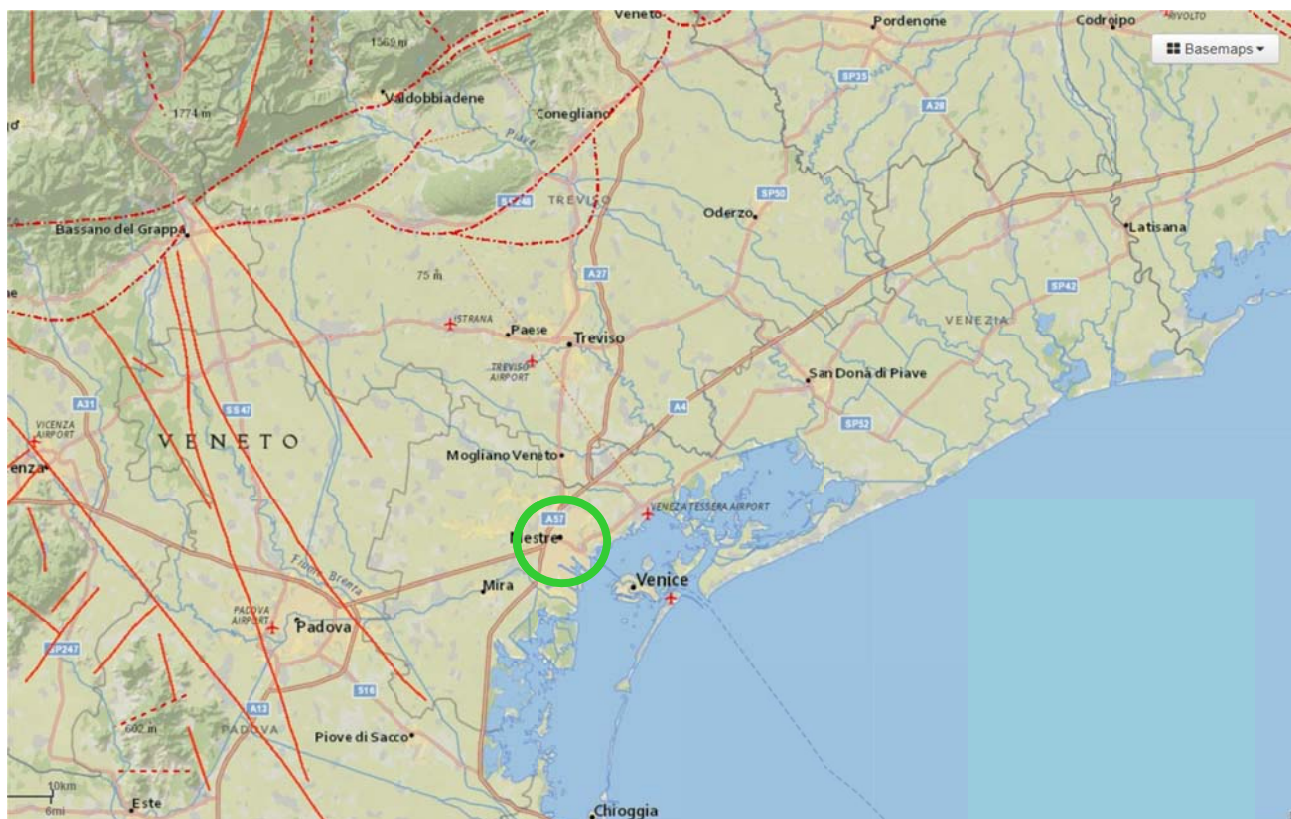


Figura 23 - ubicazione delle faglie capaci nella zona di Marghera: non sono presenti faglie capaci negli immediati dintorni dell'area di Marghera (da sito ISPRA – ITHACA: <http://www.isprambiente.gov.it/it/progetti/ithaca-catalogo-delle-faglie-capaci>).

3.4 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 24).

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 30 km a sud dalle Zone Sismogenetiche n° 906 – Garda e Veronese e n. 905 Friuli Veneto orientale (Figura 24 e Figura 25). La zona d'indagine si trova dunque fuori dalla zona ZS9, che coincide con il settore della catena alpina che ha subito il massimo raccorciamento nella collisione tra placca europea e microplacca adriatica a Sud, comprendente le Z905 e Z904.

La zona ZS905, in particolare, è strutturata in pieghe sud-vergenti del Sudalpino orientale e faglie inverse associate. Gli epicentri dei terremoti sono generalmente ricollegabili a queste superfici di sovrascorrimento. La zona 905 mostra un ampliamento verso S-E e verso Ovest includendo sorgenti

sismogenetiche potenzialmente responsabili di terremoti con $M > 6$ (massima magnitudo attesa 6.60 dunque pericolosità estesa ben al di fuori della zona sismogenetica fino a raggiungere centinaia di chilometri di distanza dall'epicentro), e con frequenza di terremoti nettamente superiore a quella delle zone adiacenti come riportato nel catalogo CPTI2 . Il meccanismo di fagliazione responsabile dei terremoti che avvengono nella ZS 906 è di tipo faglia inversa (Figura 26), con una profondità efficace compresa tra 5 e 8 km (figura 25)

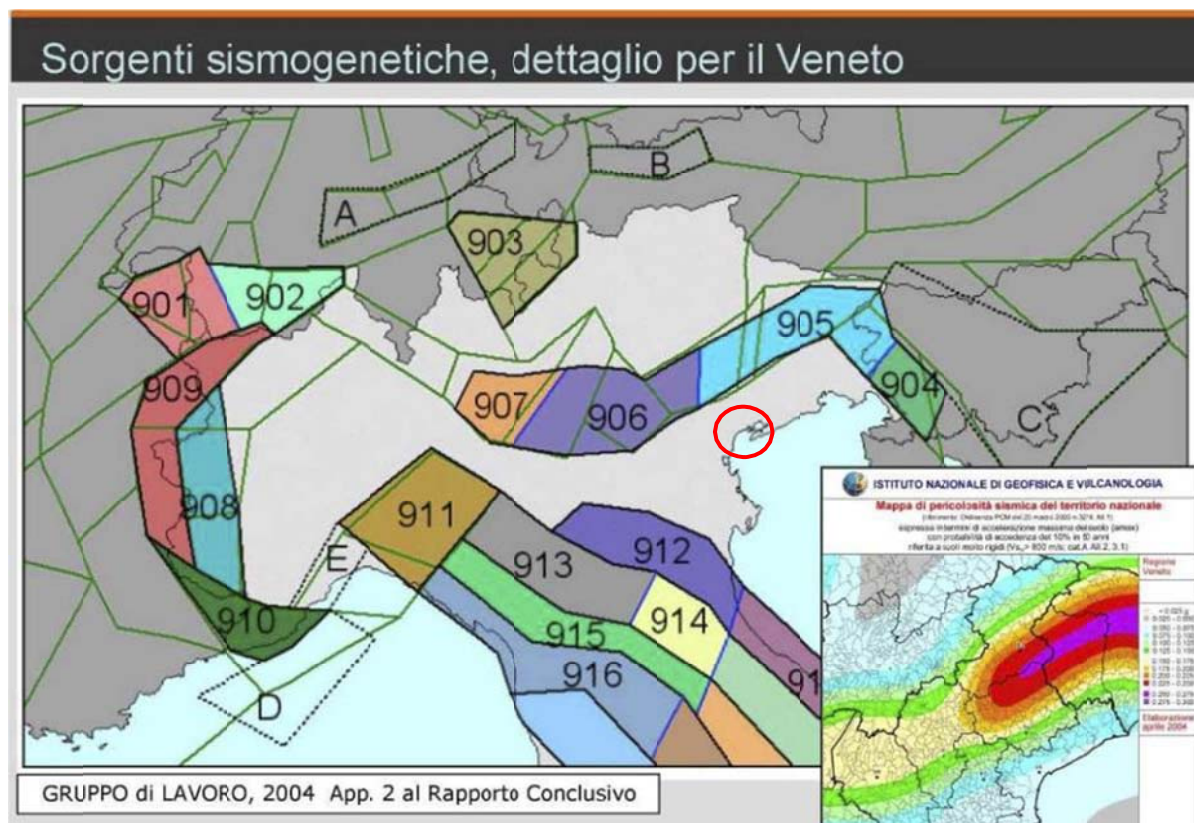


Figura 24- Dettaglio dell'estensione delle zone sismogenetiche del nord Italia. L'area d'indagine risulta vicina alla ZS 905 (rappresentata in AZZURRO).

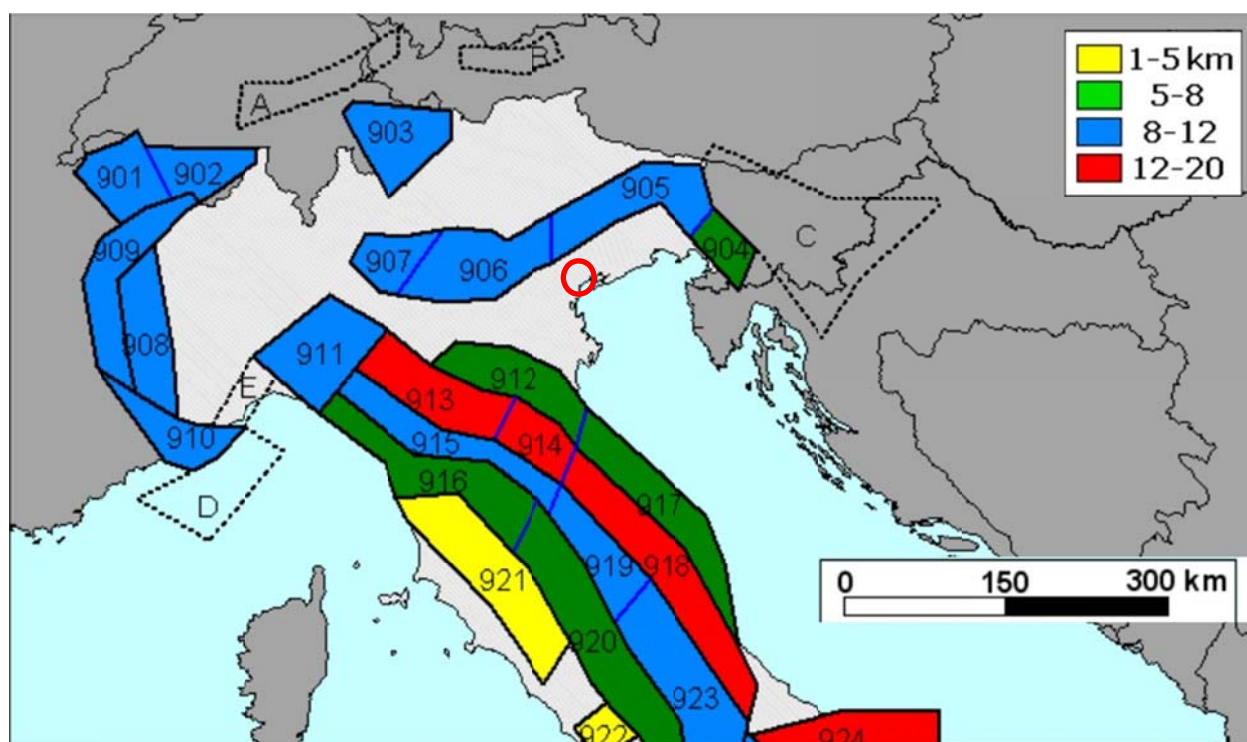


Figura 25- Zonazione sismogenetica dell'Italia settentrionale. I colori si riferiscono alla profondità ipocentrale media (Meletti C., Valensise G., 2004).

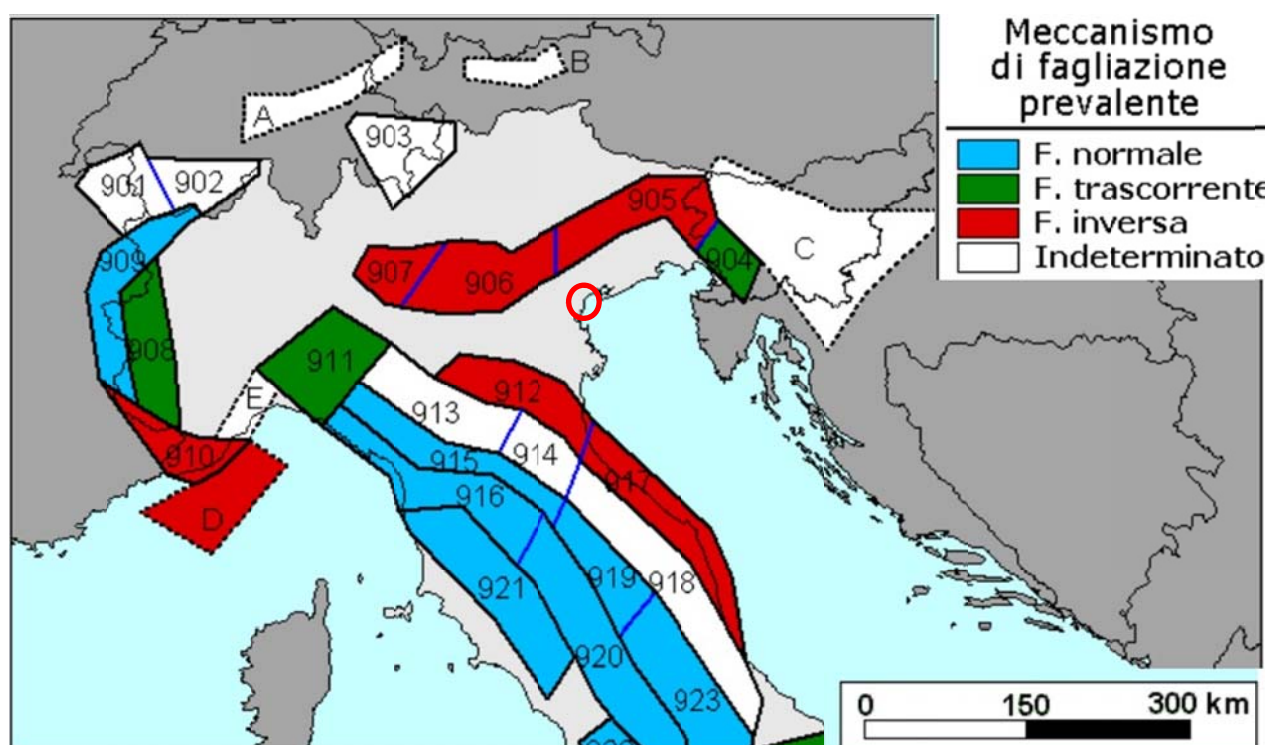


Figura 26 - Zonazione sismogenetica dell'Italia settentrionale. I colori si riferiscono al meccanismo di fagliazione (Meletti C., Valensise G., 2004).

Il settore è interessato dalla presenza ravvicinata delle sorgenti sismogenetiche seguenti (DISS, Database of Individual Seismogenic Sources):

- ITCS175 – Schio-Vicenza inserita nel DISS (Database of Individual Seismogenic Sources) (Figura 27).
- ITCS060 – Montebelluna –Montereale , comprendente la ITIS101 Montello;
- ITCS007 – Thiene –Cornuda, comprendente la ITIS 127 Thiene-Bassano e la ITIS102 Bassano-Cornuda;

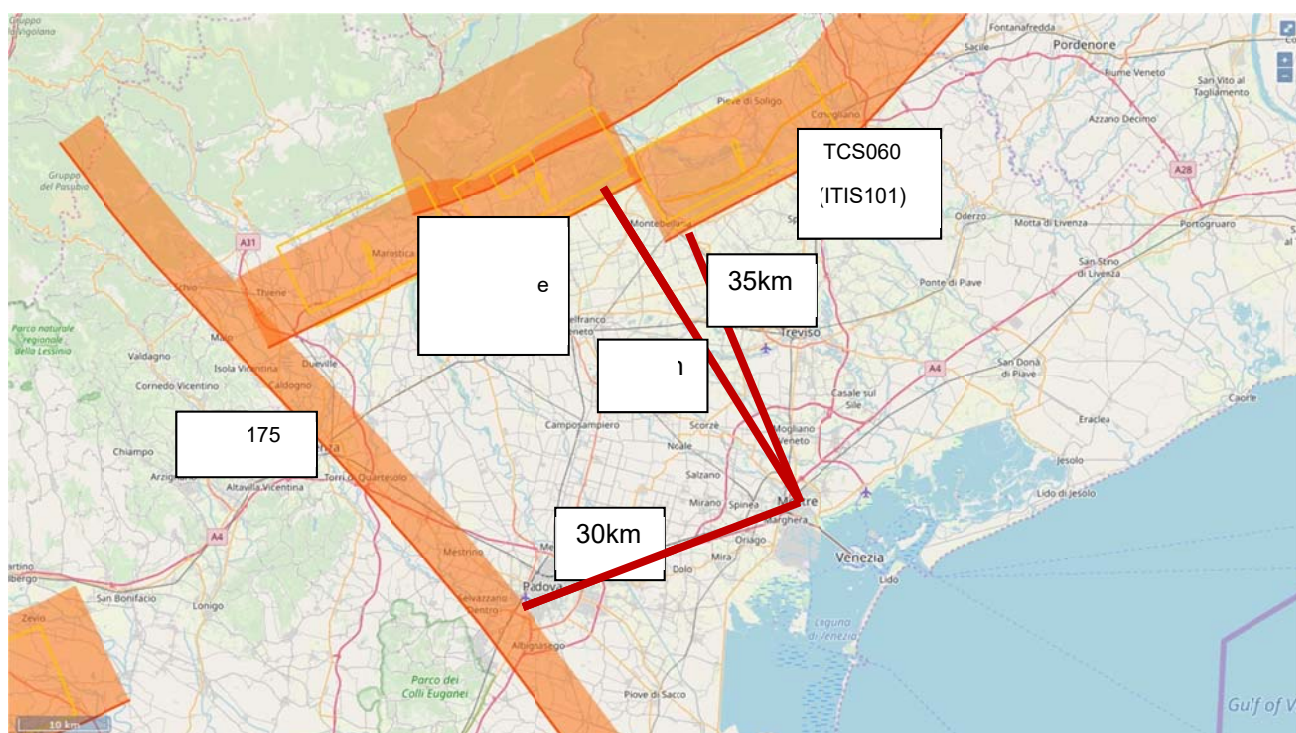


Figura 27 - Sorgenti sismogenetiche del DISS, tra cui ITCS175 – Schio-Vicenza; ITCS060 Montebelluna-Montereale e ITCS007 Thiene-cornuda, (immagine tratta dal WebGIS del DISS <http://diss.rm.ingv.it/dissmap/dissmap.html>).

Prendendo in esame la più vicina sorgente sismogenetica, ovvero la ITCS175 – Schio-Vicenza, questa fonte composita appartiene al sistema di faglie Schio-Vicenza, con direzione NW-SE, immergente a NE, un insieme di faglie ad alto angolo che abbassano ad est la successione sedimentaria della pianura veneta, ed è una struttura trasversale rispetto all'andamento generale del fronte di spinta delle Alpi orientali meridionali. La struttura principale di questo sistema di faglia è la cosiddetta linea Schio-Vicenza, una ripida faglia trascorrente con direzione NW-SE, 120 km di lunghezza.

La linea Schio-Vicenza è un importante lineamento geomorfologico attraverso le Alpi meridionali e la pianura padana veneta, confinante ad est con i Monti Lessini, Berici ed Euganei, un frammento della retroversione alpina. A sud-est, questo prominente lineamento tettonico continua nel sottosuolo della pianura veneta, dove è nota come la faglia di Conselve-Pomposa.

Il sistema di faglia Schio-Vicenza è stato attivo, con diverse fasi tettoniche di attività e con differenti meccanismi cinematici, almeno dal Mesozoico al Quaternario. Oggi la Linea Schio-Vicenza è un elemento strutturale ereditato e ben sviluppato con un'impronta significativa nel paesaggio, riattivato nell'attuale regime di stress. L'analisi dei profili longitudinali dei terrazzi fluviali nei pressi di Schio mostra un sollevamento differenziale del Pleistocene attraverso il sistema di faglie, con il blocco occidentale (footwall) della linea Schio-Vicenza sollevato rispetto alla pianura. D'altra parte, ad Isola Vicentina, ca. 10 km a sud est di Schio, i sedimenti del Miocene si abbassano di 50 ° in direzione nord-est, rappresentando il lembo di una piega del footwall.

Sfortunatamente, nel suo insieme non ci sono prove sufficienti per delimitare la recente attività della Linea Schio-Vicenza, e anche il suo ruolo nel quadro geodinamico delle Alpi meridionali è ancora oggetto di dibattito. Sebbene la cinematica sia ancora in gran parte sconosciuta, osserviamo che interrompe la continuità del fronte di spinta delle Alpi meridionali nel settore veneto (spinta Thiene-Cornuda), suggerendo che ha svolto un ruolo passivo nel controllo della geometria dei sistemi di faglie attive e distribuzione attuale di rilascio sismico.

Di fatto, la vera cinematica di questo sistema di faglie è ambigua. Considerazioni geodinamiche, indicano un ruolo per il sistema di faglia Schio-Vicenza simile a quello del sistema Dinarico, che attualmente si caratterizza per la cinematica di slittamento destrorso e che accoglie ad est la rientranza di Adria contro la catena alpina. Se è così, il sistema Schio-Vicenza, avendo lo stesso orientamento del sistema Dinarico, ma delimitando l'avantreno veneziano ad ovest, nel complesso dovrebbe avere una componente sinistrale del movimento. Nonostante la mancanza di prove sismologiche storiche e strumentali, suggeriamo che la Linea Schio-Vicenza possa ospitare significativi terremoti. Di fatto, non sembra che abbia generato terremoti uguali o superiori alla magnitudine 5.0. Cataloghi storici e strumentali mostrano solo una distribuzione sparsa di sismicità moderata lungo questa struttura. Inoltre, la fonte del terremoto di MI 4.7 del 13 settembre 1989, con una profondità di 40 km e una cinematica di attacco destrorso, si trova a nord

Come abbiamo visto dalla mappa del DISS (Figura 27) ad una distanza simile a quella tra Marghera e la linea Schio-Vicenza appena descritta, si trova la zona sismogenetica ITCS 060 "Montebelluna – Montereale" ed ITIS 101 "Montello".

La Zona ITCS 060 "Montebelluna – Montereale" schematizza un'area estesa contenente un numero non specificato di sorgenti minori allineate, che non sono ancora conosciute singolarmente e non sono associate ad uno specifico gruppo di terremoti storici.

Questa zona passa lungo la fascia pedemontana Veneto - Friulana, a metà strada tra le città di Belluno e Pordenone e appartiene al sistema di *thrust* della catena Sud - Alpina Orientale; si tratta di un sistema di faglie vergente verso Sud - Est, associato alla convergenza tra il continente africano (microplacca Adria) e quello europeo. I cataloghi storici mostrano una **sismicità media** associata a questa zona con eventi distruttivi concentrati nel settore orientale della faglia; tra questi si ricordano il terremoto di Pordenone del 1812 (Mw 5,7), quello dell'area Bellunese del 1873 (Mw 6,3) e quello del Bosco del Cansiglio del 1936 (Mw 6,1).

Minima profondità (km)	1
Massima profondità (km)	9
Direzione (°)	210 - 245
Inclinazione (°)	30 - 50
Rake (°)	60 -100
Velocità di movimento (mm/anno)	0,24 – 0,91
Magnitudo massima	6,5

Tabella 5: Sistema Schio -Vicenza

Invece, la zona ITIS 101 “Montello” propone una rappresentazione tridimensionale semplificata del piano di faglia ed esibisce caratteristiche definite di estensione, movimento e massima magnitudo attesa. La zona è caratterizzato dalla presenza del *thrust* di Montello – Conegliano, la più importante struttura della catena Sud - Alpina Orientale; i dati strutturali e le evidenze geologiche di superficie mostrano che il *thrust* del Montello – Conegliano continua ad Est con il *thrust* del Cansiglio. La direzione della faglia è circa parallela all’asse delle anticlinali del Montello e del Cansiglio e la magnitudo massima associata (M_w 6,5) è quella relativa al massimo evento rilevato.

Lunghezza (km)	22
Larghezza (km)	11,2
Minima profondità (km)	1
Massima profondità (km)	8,2
Direzione (°)	242
Inclinazione (°)	40
Rake (°)	80
Velocità di movimento (mm/anno)	0,47 – 1,56
Tempo di ritorno (anni)	513 – 1702
Magnitudo massima	6,5

Tabella 6: Sistema Montebelluna-Montereale

4. INDAGINI

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



Figura 28 - mappa di ubicazione delle indagini.

Per i parametri geotecnici e lo studio di risposta sismica locale si rimanda agli appositi capitoli. Le indagini sono state eseguite nell'immediato intorno delle opere di fondazione al molteplice

scopo di ricavare:

- Geometrie del sottosuolo
- I parametri geotecnici del sottosuolo;
- I parametri sismici utili per lo studio di risposta sismica locale;
- L'individuazione del modo di vibrare del sito in caso di sisma.

Per I parametri sismici, è stato possibile ricavare i dati ed i parametri necessari grazie all'elaborazione congiunta di indagini geognostiche e sismiche che dipendono da fonti differenti ma correlate: natura del terreno, onde S, onde di Rayleigh, microtremori. Il modello che deriva dall'elaborazione congiunta risulta quindi piuttosto vincolato e significativo.

INDAGINI ESEGUITE E METODOLOGIA

INDAGINE	DESCRIZIONE	PARAMETRI
MASW n.2 (84.0 m tot)	Prospezione geofisica col metodo sismico MASW per l'esecuzione di profili sismici con allineamenti unitari di 9 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 n.2 (40 min totali)	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
CPTU n. 2 (60.5 m tot)	Prova penetrometrica statica con piezocono	Angolo di Attrito (ϕ), Coesione (c), Modulo edometrico (Ed), Modulo di Young (E), Peso di volume (Y)

Tabella 7 :riepilogo dell'indagini geognostiche effettuate nel mese di Maggio 2019

4.1 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:

$$v = \lambda \times \nu$$

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 sedimi di fondazione delle strutture in esame.



Figura 29: Indagine MASW presso Via della Pila – Marghera (VE), al di sotto del cavalcavia superiore.

4.2 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 liscio 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_{equivalente}.

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: $f_r = V_{s1} / 4 h$ (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 30: Indagine HVSR sul marciapiede lungo Via della Libertà, nei pressi del calvalcavia superiore di Marghera (VE) – Pista A.

4.3 Prova penetrometrica statica con piezocono (CPTU)

Le prove penetrometriche sono state eseguite secondo quanto previsto dalla norma ASTM (D.3441) e dalle "Raccomandazioni" ISSFE, per la standardizzazione delle prove penetrometriche in Europa (1976), nonché dall' AGI, per l'esecuzione delle indagini geotecniche (1977).

Le prove penetrometriche sono state eseguite con un penetrometro autocarrato originale GOUDA da 200 kN, impiegando una punta elettrica (ENVI-MEMOCONE MKII), corredata di sistema analogico digitale di acquisizione dati. Tali prove hanno permesso la misura contemporanea e continua della resistenza alla punta q_c (MPa), della resistenza laterale locale f_s (MPa), della pressione interstiziale u (Kpa) e della inclinazione della punta rispetto alla verticale.

Il piezocono impiegato è costituito da un corpo cilindrico di acciaio ad alto limite di snervamento, dove l'elemento di misura della resistenza alla punta e della resistenza laterale si deforma proporzionalmente allo sforzo applicato.

Il cono impiegato presenta un diametro standard di 36 mm con angolo di apertura di 60° , un tip area factor $a = 0.68$ e uno sleeve area factor $b = 0.005$; la "Friction" (manicotto di attrito) ha una superficie laterale di 15000 mm^2 ed è situata dietro la punta e si muove indipendentemente da questa, immediatamente dietro alla parte conica della punta, è collocato il filtro a ridosso del quale un trasduttore di pressione permette la misura della pressione neutra.

I diagrammi penetrometrici sono riportati in funzione della profondità i valori della resistenza alla punta q_c (MPa) diagramma continuo nero, l'attrito laterale f_s (MPa) diagramma verde, alla rottura del terreno, il rapporto delle resistenze f_r ($f_s/q_c\%$) diagramma continuo rosso nonché la deviazione della verticale (in gradi).



Figura 31: esecuzione indagine penetrometrica CPTU con penetrometro –gouda da 200 kN, presso la porzione sottostante il cavalcavia superiore di Marghera (VE) lungo Via della Pila

5. RISULTATI DELLE INDAGINI

Per ricavare i parametri sismici (categoria sismica del sottosuolo e velocità media delle onde S nei primi 30 metri ovvero il parametro Vs30) 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"). 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 .

Per ricavare i parametri geotecnici, invece, si è fatto ricorso ai dati derivati dall'elaborazione delle prove penetrometriche eseguite.

5.1 Indagine sismica attiva

Per la prova MASW si sono eseguiti **nr. 2** stendimenti, l'uno con direzione nord-sud e posizionato al di sotto dei cavalcavia rampa A e rampa B, a livello dell'incrocio tra Via della Libertà e Via della Pila, e l'altro avente direzione est-ovest e posto a lato di Via della Libertà in prossimità della curva discendente della rampa B del cavalcavia, che porta verso il centro di Marghera ed è immediatamente adiacente alla rampa A. 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 die 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: 15/01/20 12:57:57

End recording: 15/01/20 13:11:35

Trace length: 0h13'37".

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-

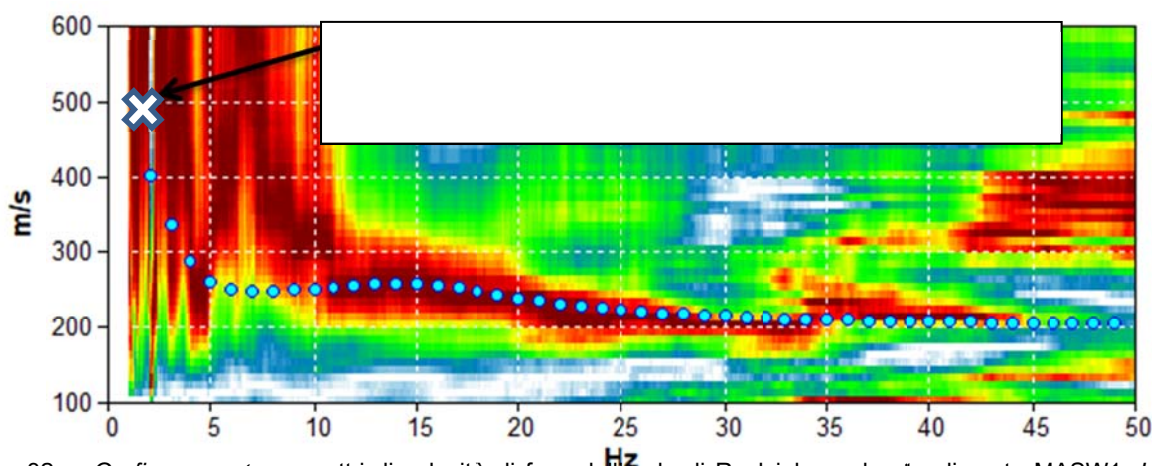


Figura 32 - *Grafico a contour*: spettri di velocità di fase dell'onda di Rayleigh per lo stendimento MASW1. *Linea azzurra*: primo modo della curva di dispersione teorica per il modello di sottosuolo proposto per il sito. Il modello di sottosuolo a frequenze minori (maggiori profondità) è derivato dal fit congiunto delle prove in array e delle prove H/V.

A partire dalla legge fisica $\lambda f = V$ (ove λ 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 35Hz ed indica la presenza di uno strato di spessore circa 9 metri ed avente velocità di circa 280 m/s;
- Un secondo cambio stratigrafico a circa 10.0 Hz legato al passaggio tra sabbie prevalenti (tra 1.5 e 9.5 m dal p.c.) e argille prevalenti (presenti tra 9.5 m da p.c. e 35.0 m dal p.c.). La curva in questo punto ha un picco negativo (depressione nel rapporto spettrale H/V), dovuta all'inversione di velocità tra Sabbie (circa 300 m/s) e Argille (circa 200 m/s)
- Grazie al fit congiunto con la prova H/V (inserita nel capitolo a seguire), si sono identificati altri due strati con risonanza rispettivamente di 2 Hz (strato compreso tra 35 e 100 m circa dal p.c. di matrice sabbiosa) e 1.0 Hz dovuto al contatto tra sabbie compatte prevalenti e primo substrato like bed-rock ovvero il contatto con le Ghiaie fluvioglaciali.

Ne risulta così che la Velocità media equivalente delle onde S nei primi 30 metri dal p.c. è di **circa 258 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
1.50	1.50	200	0.47
10.00	8.50	320	0.48
20.00	10.00	200	0.49
38.00	18.00	310	0.48
73.00	35.00	380	0.47
inf.	inf.	480	0.44

Tabella 8: sismostratigrafia da indagine MASW1

Da cui risulta : $V_{s_eq}(0.0-30.0)=258\text{m/s}$

VELOCITA' ONDE SISMICHE

SISMOSTRATIGRAFIA

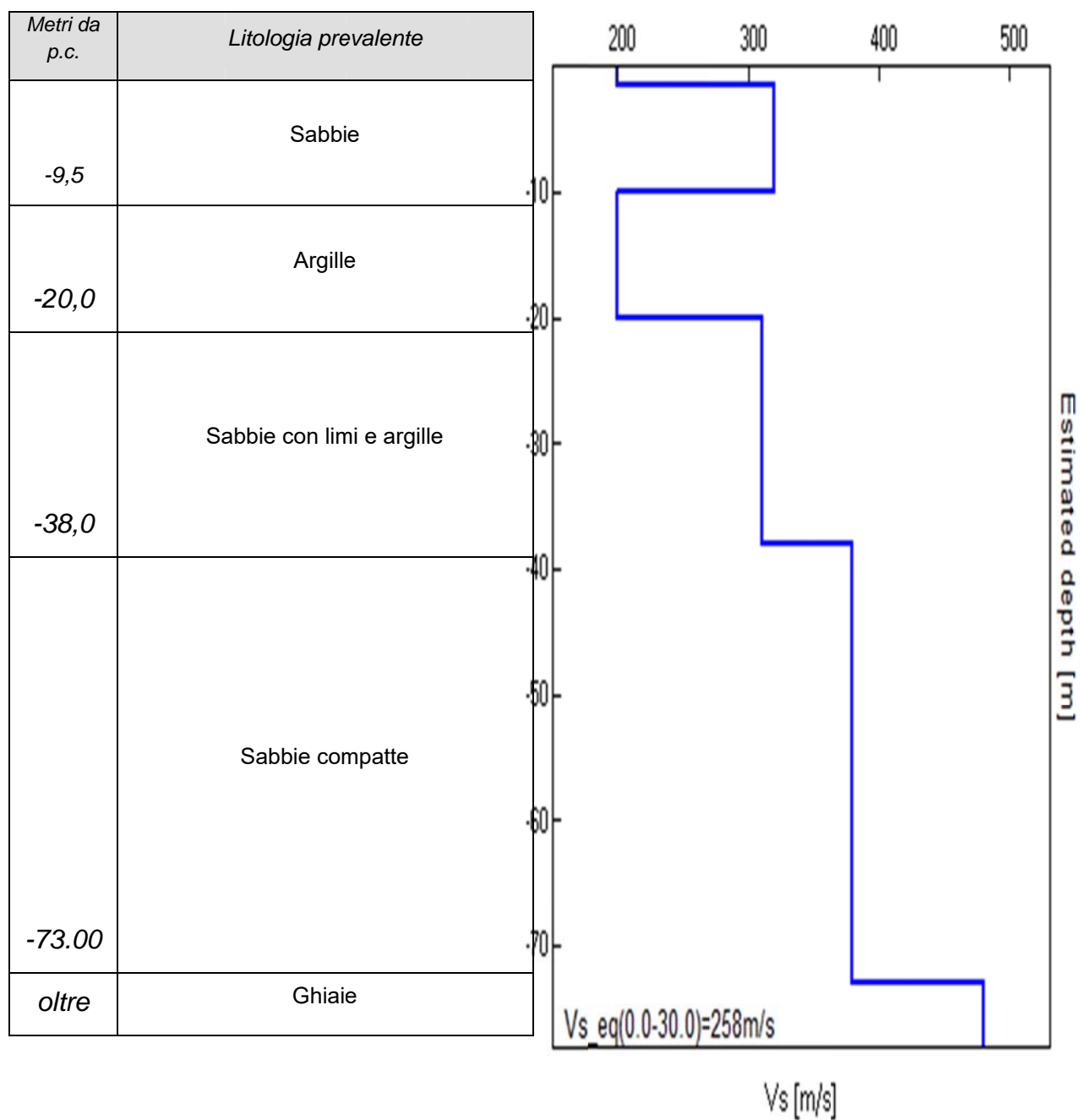


Figura 33: sismostratigrafia da indagine sismica MASW 1.

MASW 2

Start recording: 15/01/20 14:21:13 End recording: 15/01/20 14:41:13

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

Sampling rate: 128 Hz

Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Array geometry (x): 0.0 5.0 10.0 15.0 20.0 25.0 30.0 35.0 40.0 m.

Array geometry (x): 0.0 3.0 6.0 9.0 12.0 15.0 18.0 21.0 24.0m.

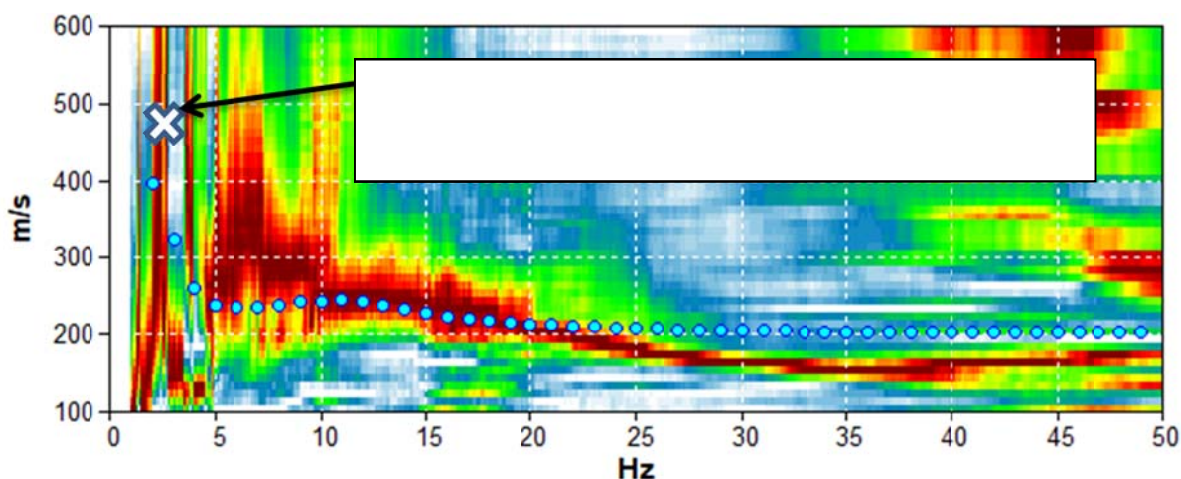


Figura 34 - *Grafico a contour*: spettri di velocità di fase dell'onda di Rayleigh per lo stendimento MASW. *Linea azzurra*: primo modo della curva di dispersione teorica per il modello di sottosuolo proposto per il sito. Il modello di sottosuolo a frequenze minori (maggiori profondità) è derivato dal fit congiunto delle prove in array e delle prove H/V.

In questo caso, a partire dalla legge fisica $\lambda f = V$ (ove λ 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 25Hz ed indica la presenza di uno strato di spessore circa 9 metri ed avente velocità di circa 320 m/s;
- Un secondo cambio stratigrafico a circa 10.0 Hz legato al passaggio tra sabbie prevalenti (tra 1.5 e 9.5 m dal p.c.) e argille prevalenti (presenti tra 9.5 m da p.c. e 25.0 m dal p.c.). La curva in questo punto ha un picco negativo (depressione nel rapporto spettrale H/V), dovuta all'inversione di velocità tra Sabbie (circa 300 m/s) e Argille (circa 200 m/s)
- Grazie al fit congiunto con la prova H/V (inserita nel capitolo a seguire), si sono identificati altri due strati con risonanza rispettivamente di 2.5 hz (strato compreso tra 25 e 950 m circa dal p.c. di matrice sabbiosa) e 1.2 Hz dovuto al contatto tra sabbie compatte prevalenti e primo substrato like bed-rock ovvero il contatto con le Ghiaie fluvioglaciali.

Ne risulta così che la Velocità media equivalente delle onde S nei primi 30 metri dal p.c. è di **circa 244 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
1.50	1.50	250	0.45
9.50	8.00	320	0.47
25.50	16.00	200	0.47
95.50	70.00	380	0.46
inf.	inf.	550	0.45

Tabella 9: sismostratigrafia da indagine MASW2

Da cui risulta: $V_{s_eq}(0.0-30.0)=244\text{m/s}$

VELOCITA' ONDE SISMICHE

Metri da p.c.	Litologia prevalente
-9,5	Sabbie
-25,5	Argille
-95,5	Sabbie con limi e argille
oltre	Ghiaie

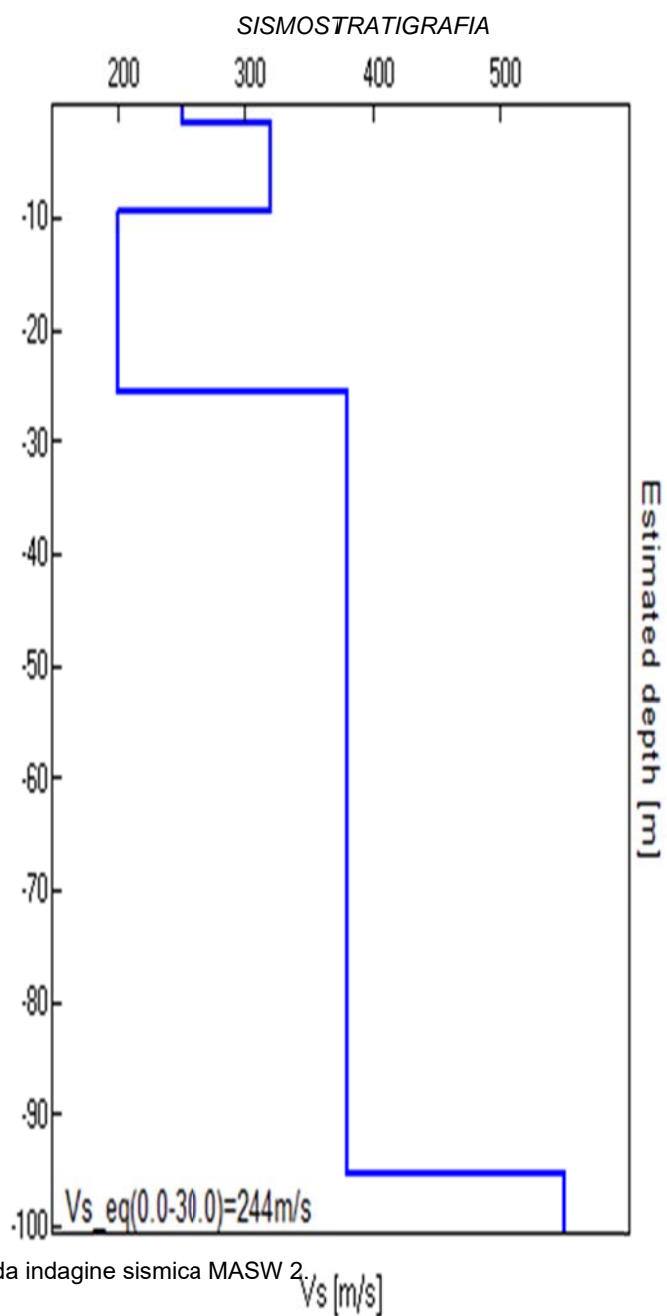


Figura 35: sismostratigrafia da indagine sismica MASW 2

5.2 Indagine 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 Vs 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

Instrument: TZ3-0079/02-19

Data format: 32 byte

Full scale [mV]: 51

Start recording: 15/01/20 11:49:41 End recording: 15/01/20 12:09:41

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: 20 s

Smoothing type: Triangular window

Smoothing: 10%

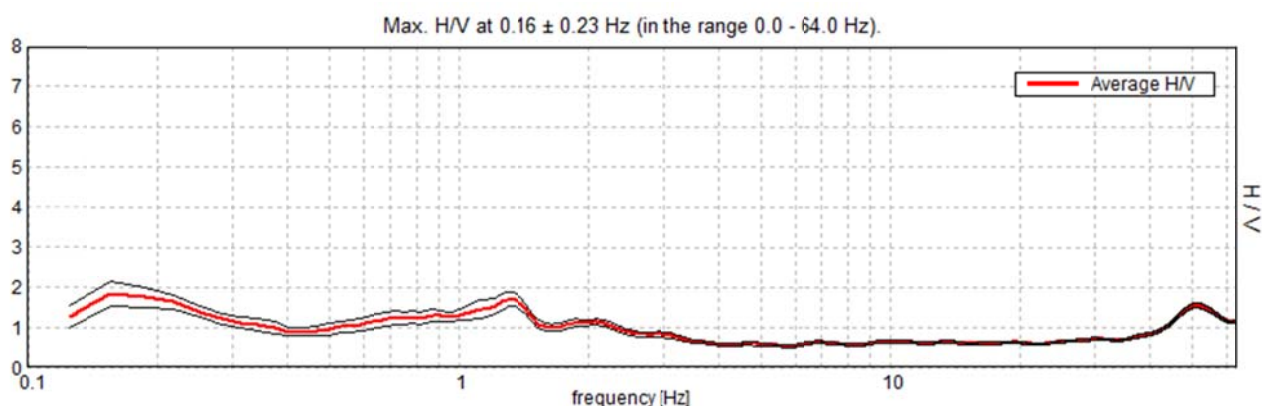


Figura 36 HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO (HVSr 1)

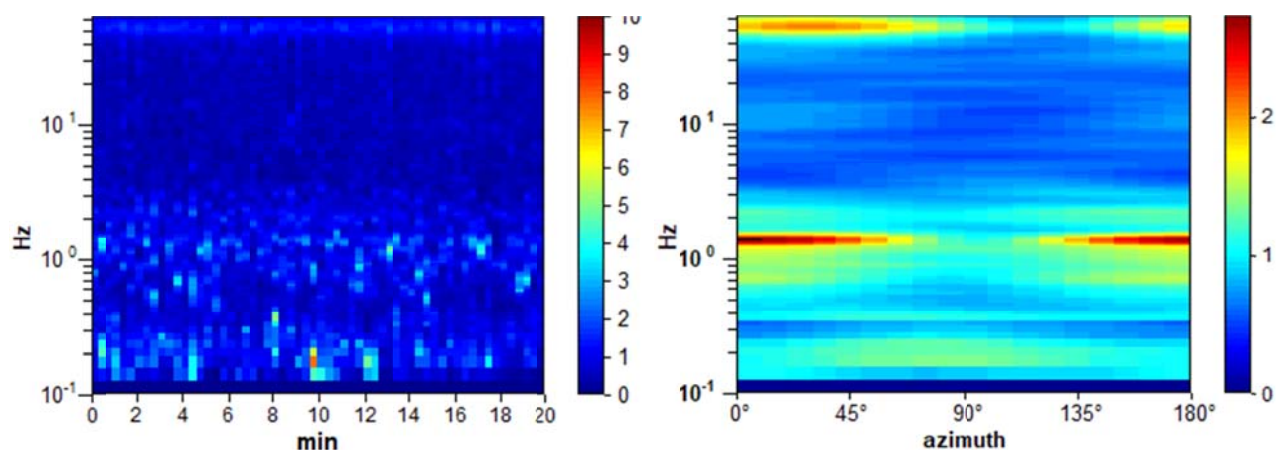


Figura 37 H/V TIME HISTORY(HVSr 1) e DIRECTIONAL H/V

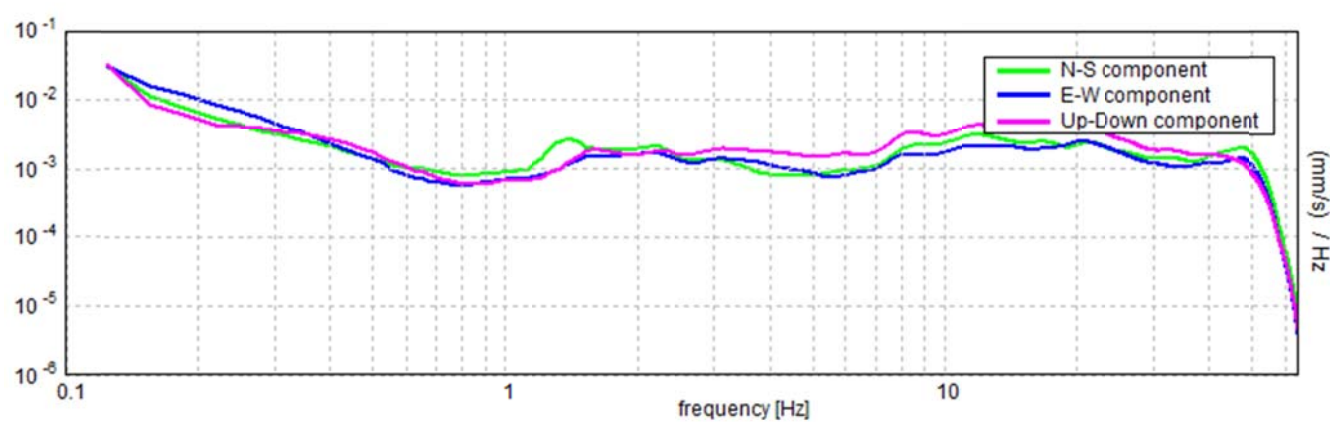


Figura 38 SINGLE COMPONENT SPECTRA (HVSr 1)

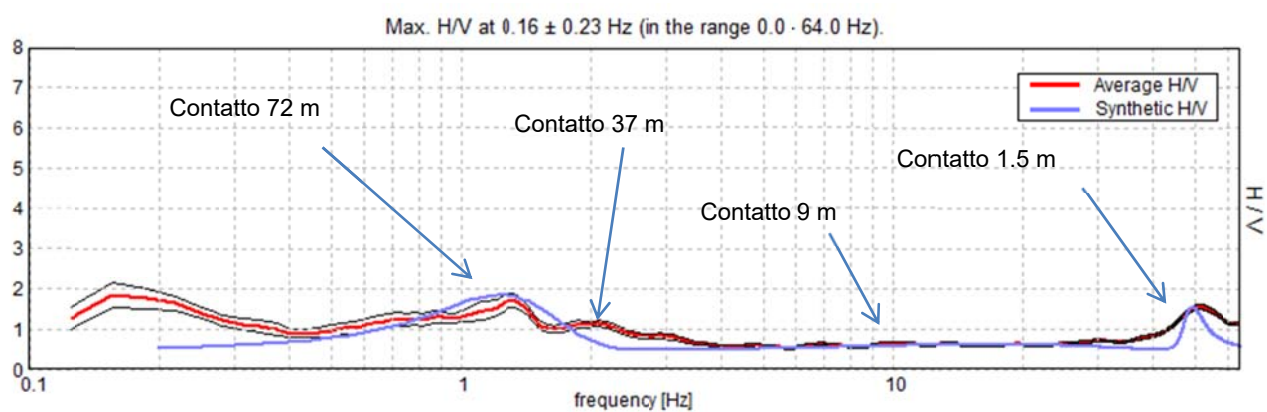


Figura 39 H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO (HVSr 1)

Depth at the bottom of the layer [m]	Thickness [m]	Vs [m/s]	Vs30 [m/s]
1.50	1.50	250	305
9.00	7.50	320	
19.00	10.00	290	
37.00	18.00	320	
72.00	35.00	380	
inf.	inf.	550	
FREQUENZE DI RISONANZA DEL TERRENO = f0 1.2 Hz ; f1 2.2 Hz ; f2 10 Hz; f3 45.0 Hz			
PERIODI PROPRIO DEL TERRENO = T0 0.85 s ; T1 0.45 s ; T2 0.1 s ; T3 0.022 Hz			
AMPLIFICAZIONE DEL TERRENO = fino a 2			
PROFONDITA' DEL SUOLO RIGIDO (ghiaie) = 72,0 m da p.c.			

Tabella 10: Riepilogo risultati Indagine Sismica HVSr 1

VELOCITA' ONDE SISMICHE

Metri da p.c.	Litologia prevalente
-9,5	Sabbie
-20,0	Argille
-38,0	Sabbie
-73.00	Sabbie compatte
oltre	Ghiaie

SISMOSTRATIGRAFIA

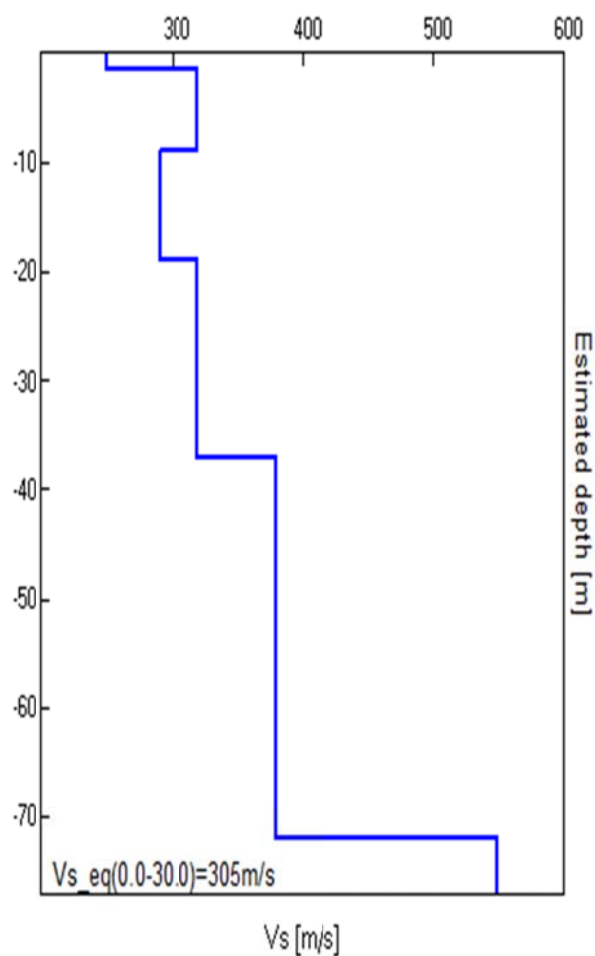


Figura 40: sismostratigrafia da indagine di sismica passive HVSr 1

HVSR 2

Instrument: TZ3-0079/02-19

Data format: 32 byte

Full scale [mV]: 51

Start recording: 15/01/20 14:21:13 End recording: 15/01/20 14:41:13

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: 20 s

Smoothing type: Triangular window

Smoothing:10%

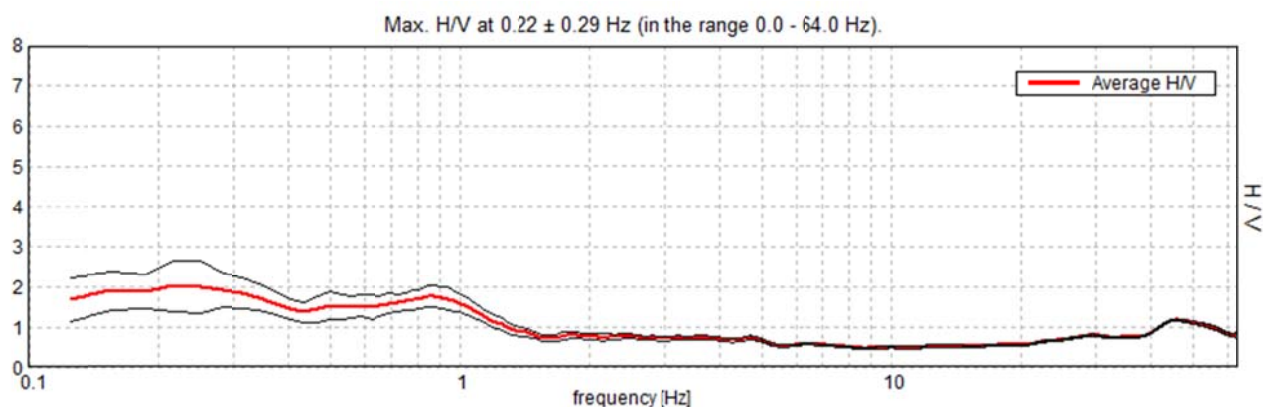


Figura 41 HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO (HVSR 2)

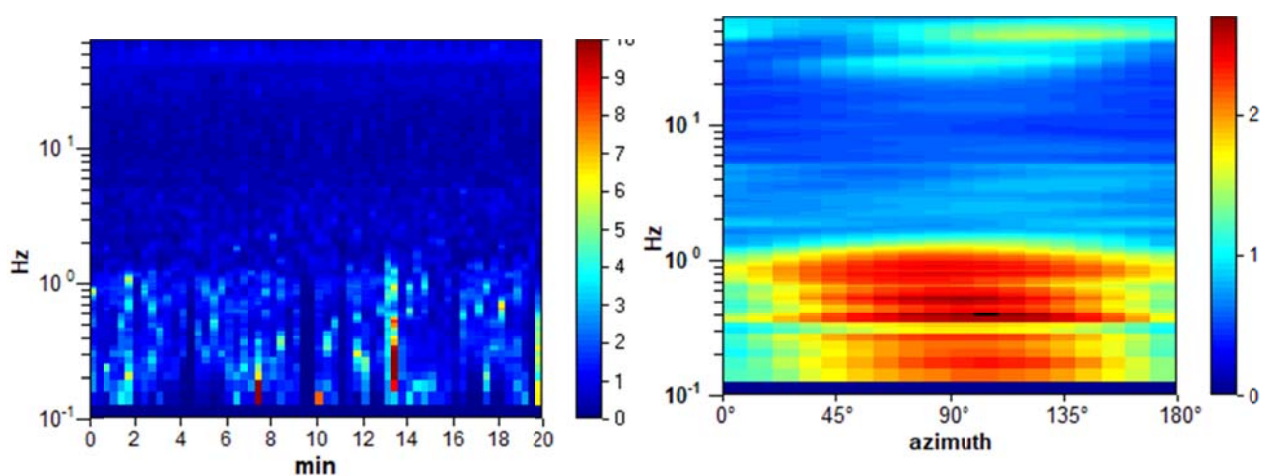


Figura 42 H/V TIME HISTORY (HVSR 2) e DIRECTIONAL H/V

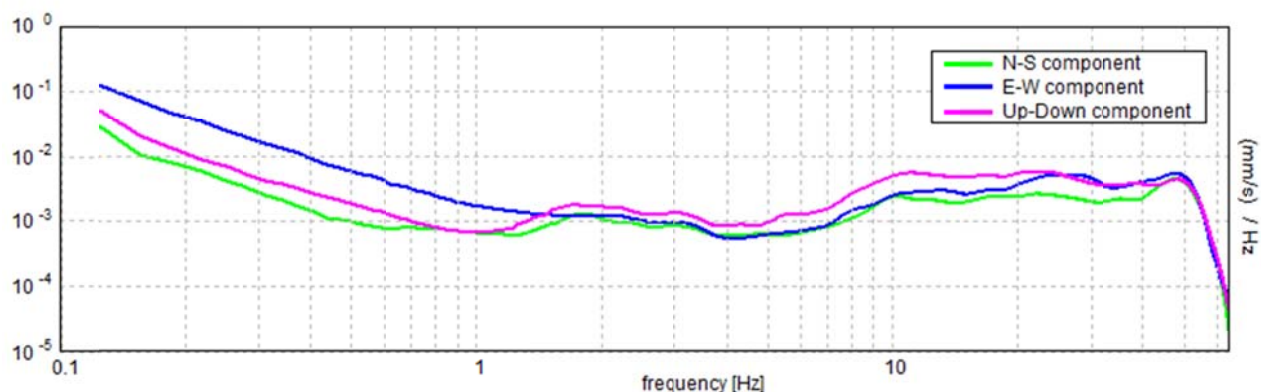


Figura 43 SINGLE COMPONENT SPECTRA (HVSr 2)

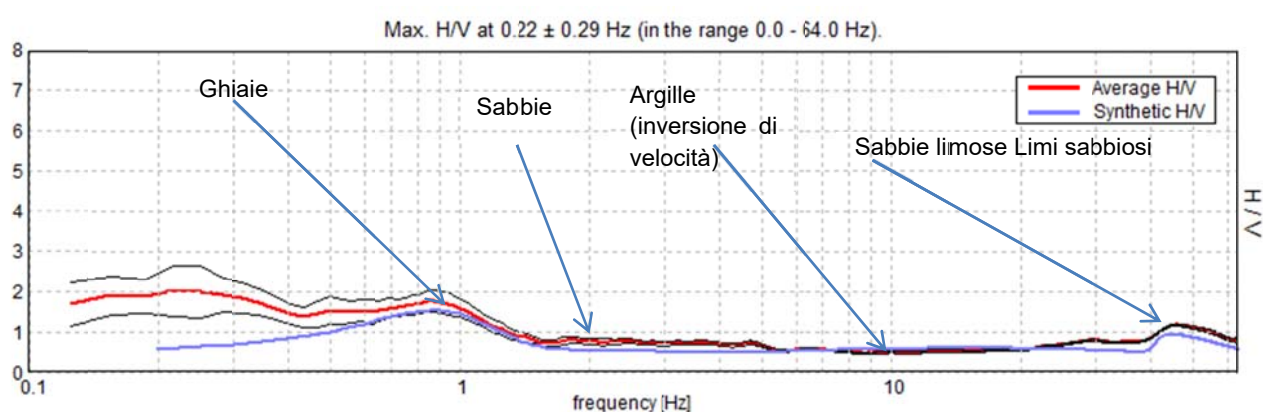


Figura 44 H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO (HVSr 2)

Depth at the bottom of the layer [m]	Thickness [m]	Vs [m/s]	Vs30 [m/s]
1.50	1.50	250	302
9.50	8.00	320	
34.50	25.00	300	
104.50	70.00	380	
inf.	inf.	550	
FREQUENZE DI RISONANZA DEL TERRENO = f0 1.0 Hz ; f1 2.0 Hz ; f2 10 Hz; f3 40.0 Hz			
PERIODI PROPRIO DEL TERRENO = T0 1.0 s ; T1 0.5 s ; T2 0.1 s ; T3 0.025 Hz			
AMPLIFICAZIONE DEL TERRENO = fino a 2			
PROFONDITA' DEL SUOLO RIGIDO (ghiaie) = 104,0 m da p.c.			

Tabella 11: Riepilogo risultati Indagine Sismica HVSr 2

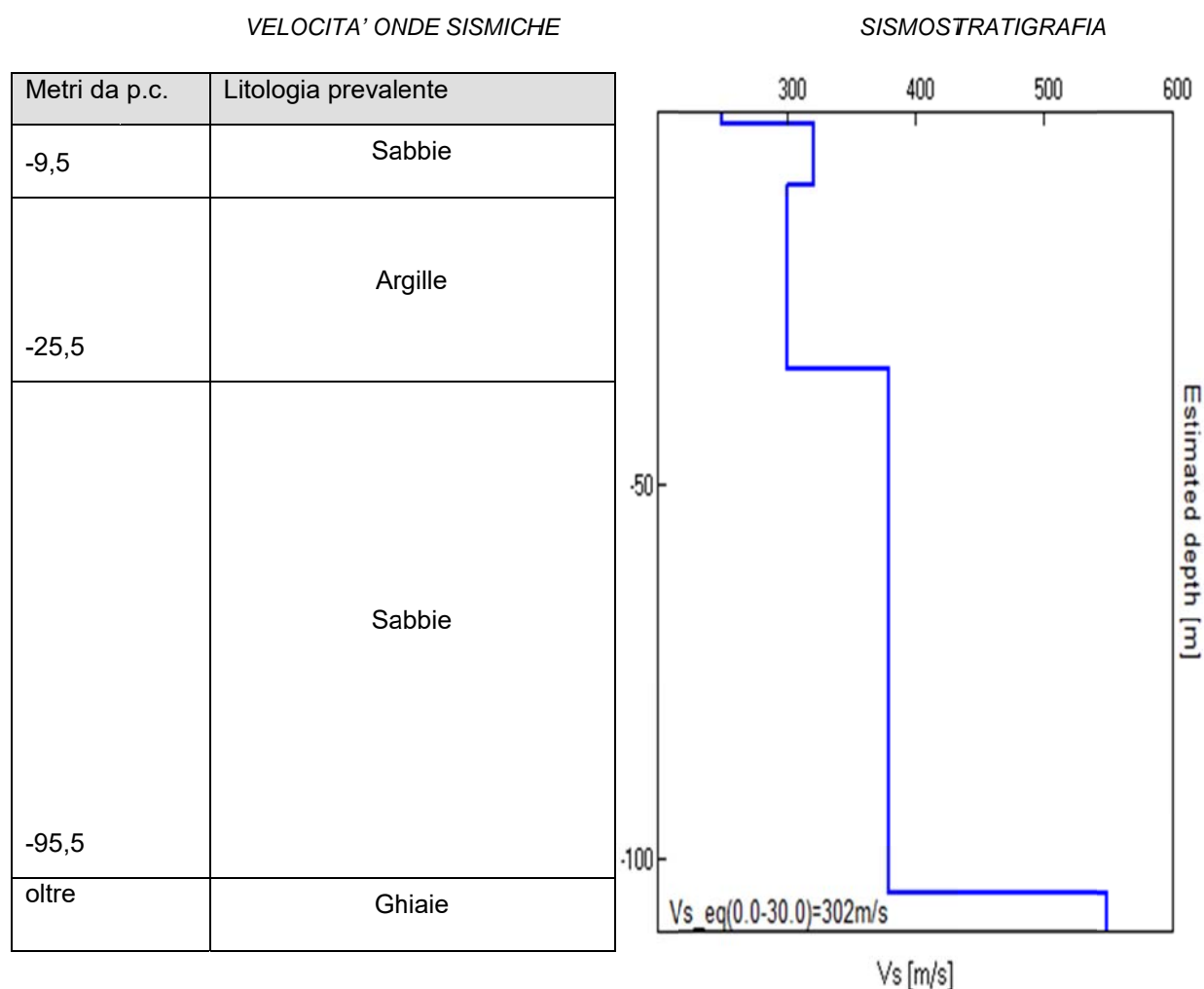


Figura 45: sismostratigrafia da HVSr 2.

5.3 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);

- **35.0 Hz** discontinuità sismostratigrafica legata al passaggio tra coperture limose e sabbie presenti (tra 1.5 e 9.5 m dal p.c.).
- **10.0 Hz** discontinuità sismostratigrafica legata al passaggio tra sabbie prevalenti (tra 1.5 e 9.5 m dal p.c.) e argille prevalenti (presenti tra 9.5 m da p.c. e 35.0 m dal p.c.). La curva in questo punto ha un picco negativo (depressione nel rapporto spettrale H/V), dovuta all'inversione di velocità tra Sabbie (circa 300 m/s) e Argille (circa 200 m/s)
- **2.0 Hz** circa contatto tra argille prevalenti (presenti tra 9.5 m da p.c. e 35.0 m dal p.c.) e sabbie compatte prevalenti (identificate tra 35 e 100 m circa dal p.c.).
- **1.0 Hz** circa contatto tra sabbie compatte prevalenti (identificate tra 35 e 100 m circa dal p.c.) e primo substrato like bed-rock ovvero il contatto con le Ghiaie fluvioglaciali.

Saranno, inoltre, da valutare gli effetti di doppia risonanza suolo-struttura attraverso il confronto tra le frequenze fondamentali del terreno riportate qui sopra e le frequenze fondamentali della struttura individuate nella relazione di calcolo.

A seguire vengono ricapitolati i valori di Vs 30 e frequenze di risonanza per ogni indagine, nonché i valori caratteristici finali per il sito d'indagine.

ID Indagine	F0 fondamentale [Hz]	A0	F1 secondaria [Hz]	A1	Vs30 (m/s)
MASW 1	1.2 ± 0.22	2.0	2.2 ± 0.22	2.0	258
MASW 2	1.0 ± 0.22	2.0	2.0 ± 0.22	2.0	244
ID Indagine	F0 fondamentale [Hz]	A0	F1 secondaria [Hz]	A1	Vs30 (m/s)
HVSR 1	1.2 ± 0.22	2.0	2.2 ± 0.22	2.0	305
HVSR 2	1.0 ± 0.22	2.0	2.0 ± 0.22	2.0	302
Frequenza fondamentale di risonanza del sito [Hz] per il contatto tra copertura sedimentaria sabbioso-argillosa e prima formazione ghiaiosa (like bed-rock)			≈ 1.0 Hz – 2.0 Hz		
VS,equivalente [m/s]			≈ 277 m/s		
Categoria sismica			C		

Tabella 12 Riepilogo risultati analisi sismiche

5.4 Prove penetrometriche statiche (CPTU)

Sono state eseguite n.2 prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU), nelle pertinenze del terreno di fondazione delle pile del cavalcavia superiore e delle rampa discendente, nell'intento di parametrizzare dal punto di vista geotecnico l'area di sedime, individuando eventuali livelli dalle caratteristiche geotecniche scadenti sulla verticale.

Si riportano a seguire i report e l'interpretazione stratigrafica delle prove eseguite

PROVA PENETROMETRICA STATICA CPTU N.1



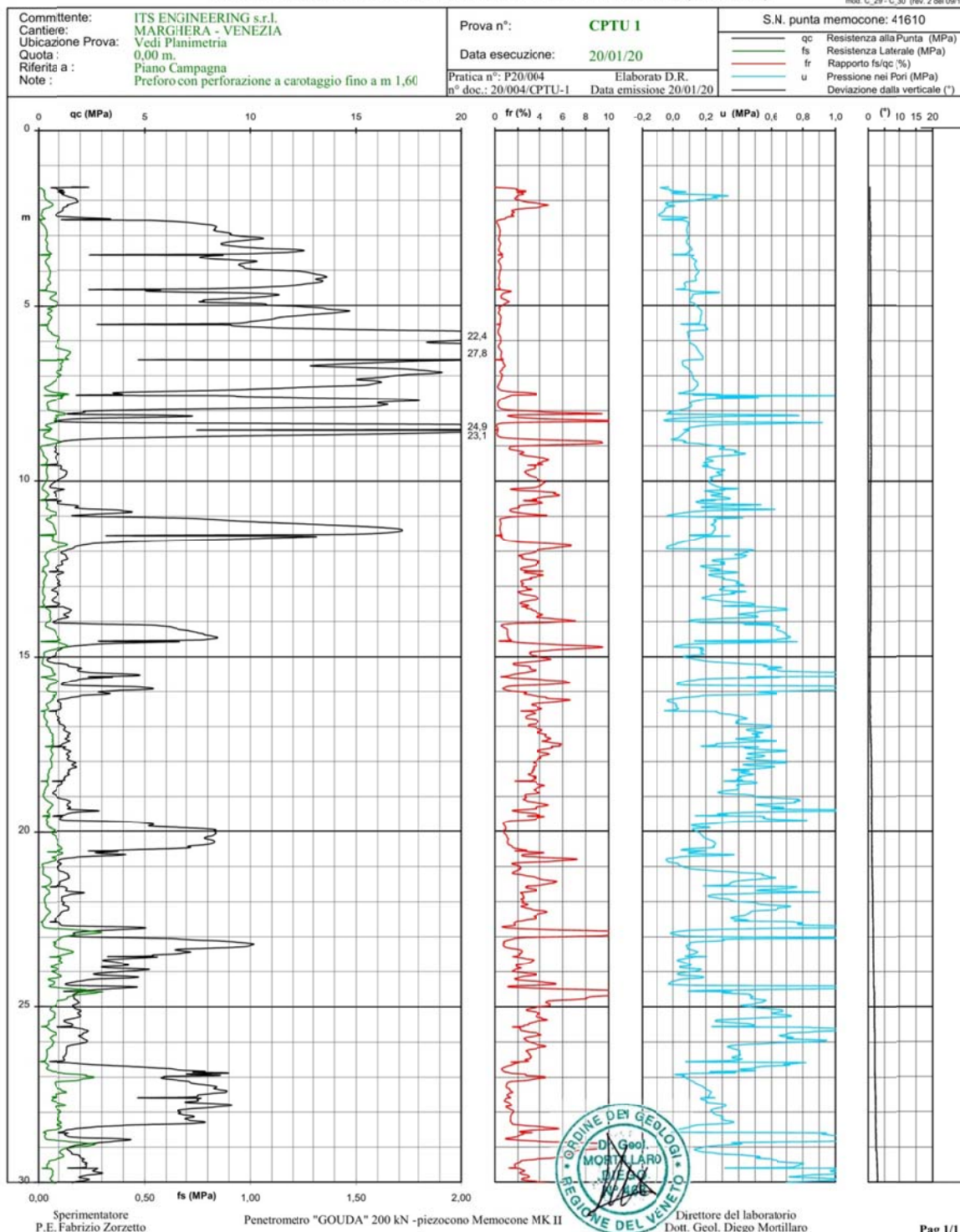
GEOTECNICA VENETA s.r.l.
Via Dosa, 26/A - 30036 Olmo di Martellago (Ve)
Tel. 041/908157 - Fax 041/908905
e-mail gv@geotecnicaveneta.it

LABORATORIO AUTORIZZATO DAL MINISTERO DELLE
INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI ALL'ESECUZIONE E
CERTIFICAZIONE DI:
- PROVE SU TERRE
AI SENSI DELL'ART. 59 D.P.R. n. 380/2001

AZIENDA CON SISTEMA DI QUALITA' CERTIFICATO ISO 9001

PROVA PENETROMETRICA STATICA CON PIEZOCONO (AGI 1977)

mod. C. 29 - C. 30 (rev. 2 del 09/11)



Pag 1/1

Figura 46 – Diagrammi numero di colpi-profondità e RPD-profondità e valutazione stratigrafica prova n.1.

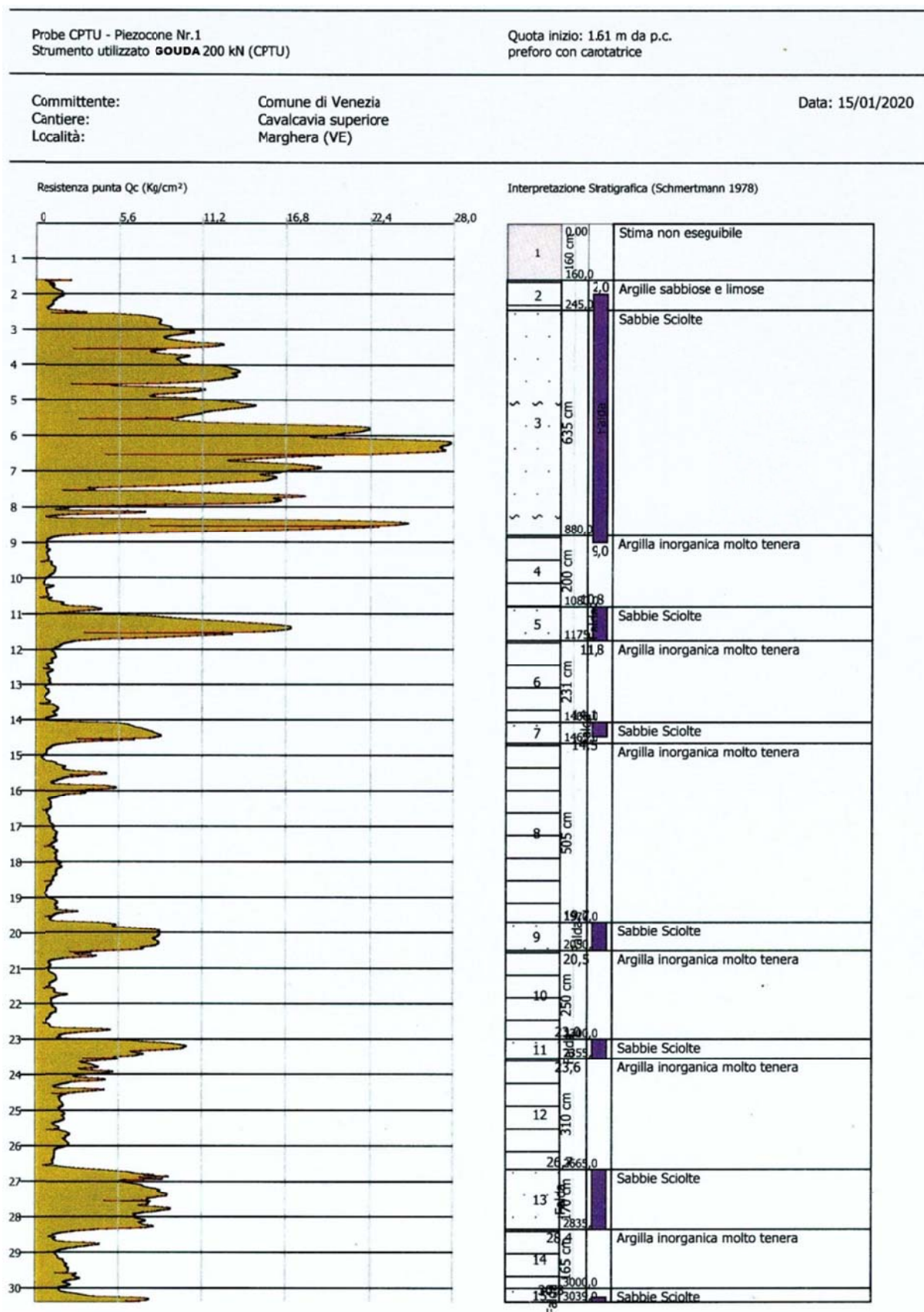


Figura 47 – interpretazione stratigrafica prova n.1.

PROVA PENETROMETRICA STATICA CPTU N.2



GEOTECNICA VENETA s.r.l.
Via Dosa, 26/A - 30030 Olmo di Martellago (Ve)
Tel. 041/908157 - Fax 041/908905
e-mail gv@geotecnicaveneta.it

LABORATORIO AUTORIZZATO DAL MINISTERO DELLE
INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI ALL'ESECUZIONE E
CERTIFICAZIONE DI:
- PROVE SU TERRE
AI SENSI DELL'ART. 59 D.P.R. n. 380/2001
AZIENDA CON SISTEMA DI QUALITA' CERTIFICATO ISO 9001

PROVA PENETROMETRICA STATICA CON PIEZOCONO (AGI 1977)

mod. C_29 - C_30 (rev. 2 del 09/11)

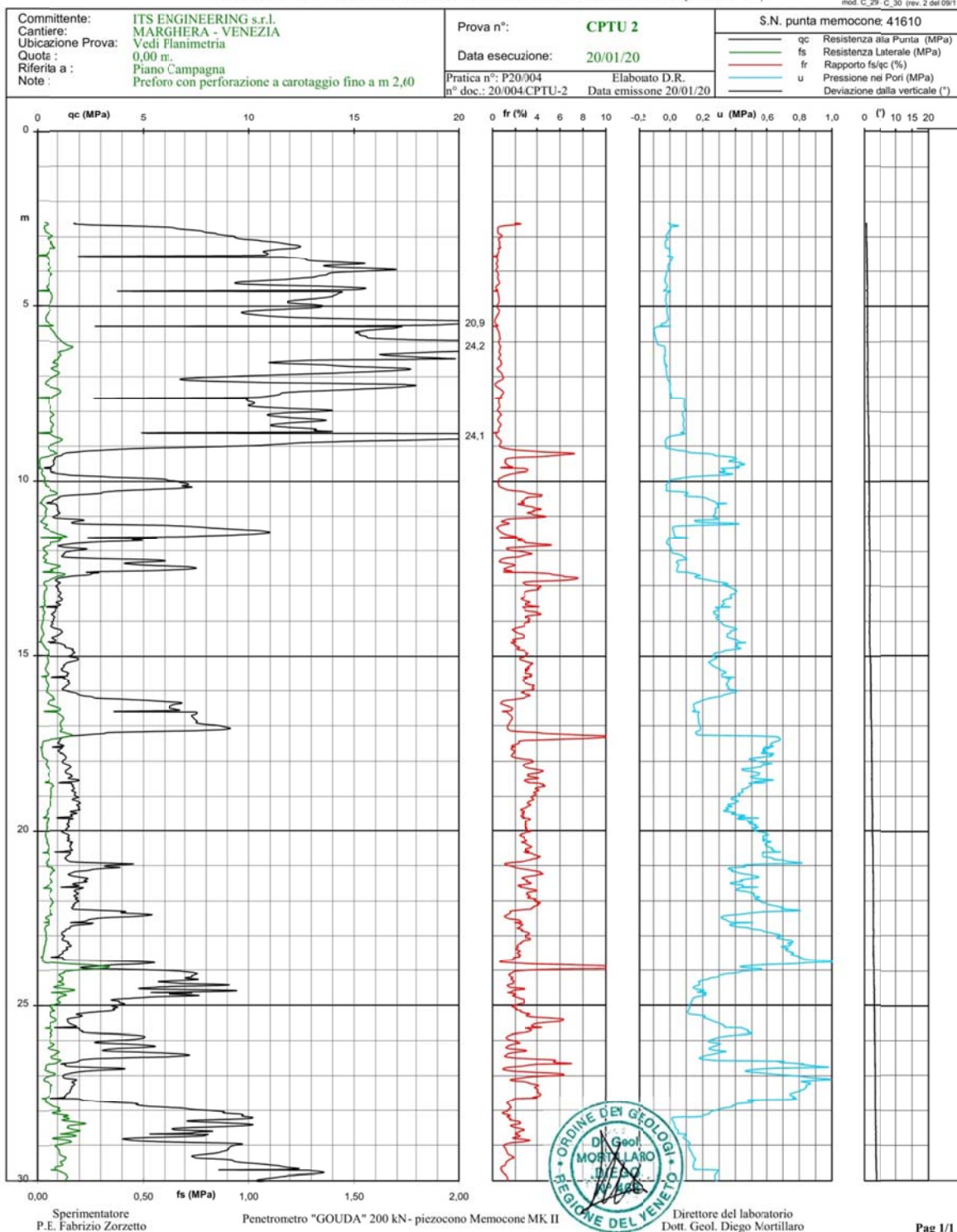


Figura 48 – Diagrammi numero di colpi-profondità e RPD-profondità e valutazione stratigrafica prova n.2.

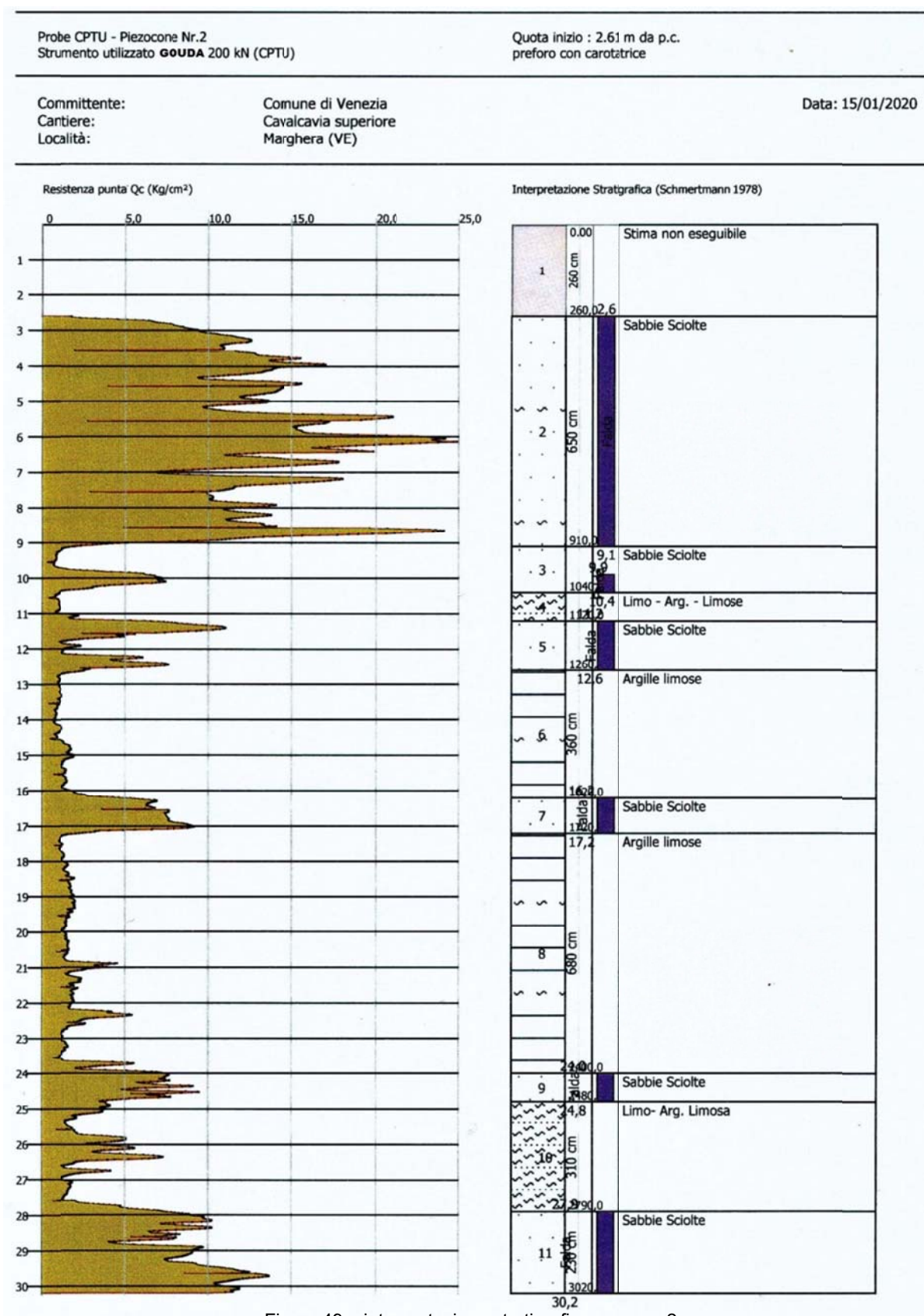


Figura 49 – interpretazione stratigrafica prova n. 2

La prove eseguite (CPTU1 e CPTU2) hanno evidenziato le seguenti caratteristiche geologiche generali per l'area d'indagine:

- Presenza di depositi essenzialmente sabbiosi incoerenti poco addensati tra 1.5 m e 9.0 m circa dal pc.;
- Depositi prevalentemente argillosi presenti tra 9.0 e 26.0-28.0 metri dal p.c. , con subordinatamente presenti sottili strati a maggior componente sabbiosa;
- Comparsa di un nuovo orizzonte a composizione prevalentemente sabbiosa oltre circa 26.0-28.0 metri ;

Le prove non hanno messo in evidenza la presenza di lenti particolarmente compressibili, ma al contrario testimoniano una certa omogeneità dell'assetto geologico dell'area indagata.

6. ASPETTI GEOLOGICO-TECNICI

Le caratteristiche geotecniche del terreno di fondazione sono

- discrete fino alla profondità circa 9.0 m dal p.c.;
- mediocri/scadenti tra 9.0 e 28.0 m circa da p.c.;
- da discrete a buone oltre tale profondità;

Vengono di seguito riportate alcune tabelle dei parametri geotecnici, ottenuti utilizzando il software STATIC PROBING prodotto dalla società Geostru (Romania).

6.1 Stima parametri geotecnici

I dati rilevati alle Prove CPTU 1 e CPTU2 sono costituiti da una coppia di valori per ogni intervallo di lettura costituiti da LP (Lettura alla punta) e LT (Lettura della punta + manicotto), le relative resistenze vengono quindi desunte per differenza, inoltre la resistenza laterale viene conteggiata 20 cm sotto (alla quota della prima lettura della punta).

Trasferiti i dati ad un PC, vengono desunte le resistenze specifiche Q_c (Resistenza alla punta R_P) e Q_l (Resistenza Laterale R_L o f_s attrito laterale specifico che considera la superficie del manicotto di frizione) tramite opportune costanti e sulla base dei valori specifici dell'area di base della punta e dell'area del manicotto di frizione laterale.

I dati di uscita principali sono R_P (Resistenza alla punta) e R_L (Resistenza laterale o f_s , attrito laterale specifico che considera la superficie del manicotto di frizione) che il programma calcola automaticamente; inoltre viene calcolato il Rapporto R_P/R_L (Rapporto Begemann 1965) e il Rapporto R_L/R_P (Rapporto Schmertmann 1978 – FR %).

Scegliendo il tipo di interpretazione litologica da bibliografia (consigliata o meno a seconda del tipo di penetrometro utilizzato) si ottiene in automatico la stratigrafia con il passo dello strumento ed interpolazione automatica degli strati.

Successivamente, con l'impegno di metodi statistici, i dati relativi ai parametri geotecnici degli strati precedentemente interpolati, sono stati utilizzati per ottenere i valori medi e caratteristici di ciascun parametro geotecnico per ogni strato.

Per ogni strato mediato, infatti, si è calcolata la Q_c media, la f_s media, il peso di volume naturale medio, il comportamento geotecnico (coesivo, incoerente o coesivo-incoerente), ed applicata una texture.

Si è prodotto, inoltre, il grafico (per i vari autori) Profondità/Valutazioni litologiche (Figure 46 e 48 grafici di Figure 47 e 49), per visualizzare in maniera diretta l'andamento delle litologie presenti lungo la verticale indagata.

L'utilizzo dei dati dovrà comunque essere trattato con spirito critico e possibilmente, dopo esperienze geologiche acquisite in zona.

Su richiesta si forniscono i fogli originali di calcolo dei parametri geotecnici presentati nelle pagine successive.

6.2 Prova CPTU 1

A seguire i parametri geotecnici medi e caratteristici ottenuti dall'elaborazione della prova CPTU

N.strato	Natura Terreno	CPTU 1											Litologia
		inizio	fine	spessore	Cu [kPa]	IP [%]	M [Mpa]	E [Mpa]	c' [kPa]	F [°]	Dr [%]	Y [kN/m2]	
		[m da P.C.]		[m]	carat.	carat.	carat.	carat.	carat.	carat.	carat.		
2	C. Int.	1.6	2.5	0.8	66.6	63.1	5.2	4.3	5.4	21.7	#N/D	18.5	Da sabbie limose a limi sabbiosi
3	GRAN	2.5	8.8	6.4	#N/D	#N/D	43.6	44.8	#N/D	36.5	87.3	19.8	Da sabbie pulite a sabbie limose
4	COE	8.8	10.8	2.0	48.8	10.8	4.8	3.6	3.9	26.4	#N/D	17.9	Da argille ad argille limose
5	GRAN	10.8	11.8	0.9	#N/D	#N/D	35.0	34.0	#N/D	31.8	63.6	19.2	Da sabbie pulite a sabbie limose
6	COE	11.8	14.1	2.3	52.1	8.5	5.5	4.1	4.2	26.9	#N/D	18.0	Da argille ad argille limose
7	GRAN	14.1	14.7	0.6	#N/D	#N/D	25.8	22.6	#N/D	28.9	48.0	19.3	Da sabbie limose a limi sabbiosi
8	COE	14.7	19.7	5.1	56.8	6.5	6.5	4.8	4.8	25.8	#N/D	18.2	Da argille ad argille limose
9	GRAN	19.7	20.5	0.8	#N/D	#N/D	28.4	24.8	#N/D	27.9	44.4	19.2	Da sabbie limose a limi sabbiosi
10	COE	20.5	23.0	2.5	58.8	4.9	7.2	5.3	5.1	23.9	#N/D	18.6	Da limi argillosi ad argille limose
11	GRAN	23.0	23.6	0.6	#N/D	#N/D	30.0	26.2	#N/D	27.5	43.3	19.5	Da sabbie limose a limi sabbiosi
12	COE	23.6	26.7	3.1	86.2	7.1	10.5	7.8	8.1	24.8	#N/D	18.4	Da argille ad argille limose.
13	GRAN	26.7	28.4	1.7	#N/D	#N/D	29.5	25.8	#N/D	26.7	39.2	19.0	Da sabbie limose a limi sabbiosi
14	COE	28.4	30.0	1.6	82.0	5.2	10.6	7.8	7.8	26.6	#N/D	18.0	Da argille ad argille limose
15	GRAN	30.0	30.4	0.4	#N/D	#N/D	27.0	23.7	#N/D	29.3	34.2	19.2	Da sabbie pulite a sabbie limose

Tabella 13 : Parametri geotecnici caratteristici ricavati dall'indagine CPTU 1.

N.strato	Natura Terreno	CPTU 1											Litologia
		inizio	fine	spessore	Cu [kPa]	IP [%]	M [Mpa]	E [Mpa]	c' [kPa]	F [°]	Dr [%]	Y [kN/m2]	
		[m da P.C.]		[m]	medi	medi	medi	medi	medi	medi	medi		
2	C. Int.	1.61	2.45	0.84	71.3	68.7	5.5	4.6	5.9	22.1	#N/D	18.5	Da sabbie limose a limi sabbiosi
3	GRAN	2.45	8.80	6.35	#N/D	#N/D	44.6	46.1	#N/D	36.7	88.0	19.8	Da sabbie pulite a sabbie limose
4	COE	8.80	10.80	2.00	50.8	11.3	5.0	3.7	4.1	26.8	#N/D	17.9	Da argille ad argille limose
5	GRAN	10.80	11.75	0.95	#N/D	#N/D	37.4	36.9	#N/D	32.2	65.4	19.2	Da sabbie pulite a sabbie limose
6	COE	11.75	14.06	2.31	54.3	9.0	5.7	4.2	4.5	27.3	#N/D	18.0	Da argille ad argille limose
7	GRAN	14.06	14.65	0.59	#N/D	#N/D	27.1	23.7	#N/D	29.3	49.1	19.3	Da sabbie limose a limi sabbiosi
8	COE	14.65	19.70	5.05	58.5	6.8	6.6	4.9	5.0	26.3	#N/D	18.2	Da argille ad argille limose
9	GRAN	19.70	20.50	0.80	#N/D	#N/D	29.3	25.6	#N/D	28.2	45.2	19.2	Da sabbie limose a limi sabbiosi
10	COE	20.50	23.00	2.50	62.7	5.4	7.6	5.6	5.5	24.7	#N/D	18.6	Da limi argillosi ad argille limose
11	GRAN	23.00	23.55	0.55	#N/D	#N/D	31.4	27.5	#N/D	27.9	44.3	19.5	Da sabbie limose a limi sabbiosi
12	COE	23.55	26.65	3.10	90.3	7.6	10.9	8.1	8.5	25.3	#N/D	18.4	Da argille ad argille limose.
13	GRAN	26.65	28.35	1.70	#N/D	#N/D	30.0	26.2	#N/D	26.9	39.6	19.0	Da sabbie limose a limi sabbiosi
14	COE	28.35	30.00	1.65	86.0	5.6	11.0	8.2	8.2	27.3	#N/D	18.0	Da argille ad argille limose
15	GRAN	30.00	30.39	0.39	#N/D	#N/D	28.3	24.7	#N/D	29.2	35.8	19.3	Da sabbie pulite a sabbie limose

Tabella 14 Parametri geotecnici medi ricavati dai risultati della Prova Penetrometrica statica (CPTU 1)

6.3 Prova CPTU 2

A seguire i parametri geotecnici medi e caratteristici ottenuti dall'elaborazione della prova CPTU

VALORI CARATTERISTICI	CPTU 2													
	N.strato	Natura Terreno	inizio	fine	spessore	Cu [kPa]	IP [%]	M [Mpa]	E [Mpa]	c' [kPa]	F [°]	Dr [%]	Y [kN/m2]	Litologia
			[m da P.C.]		[m]	carat.	carat.	carat.	carat.	carat.	carat.	carat.		
	2	GRAN	2.6	9.1	6.5	#N/D	#N/D	44.7	45.1	#N/D	36.6	88.2	18.5	Da sabbie pulite a sabbie limose
	3	COE	9.1	9.9	0.7	46.4	10.5	4.6	3.4	3.7	24.7	#N/D	19.8	Da argille ad argille limose
	3	GRAN	9.9	10.4	0.5	#N/D	#N/D	22.1	19.3	#N/D	29.8	50.1	17.9	Da sabbie limose a limi sabbiosi
	4	COE	10.4	11.2	0.9	51.5	10.3	5.1	3.8	4.1	26.8	#N/D	19.2	Da argille ad argille limose
	5	GRAN	11.2	12.6	1.4	#N/D	#N/D	24.4	21.4	#N/D	29.5	48.9	18.0	Da sabbie pulite a sabbie limose
	6	COE	12.6	16.2	3.6	57.1	8.2	6.1	4.6	4.8	26.7	#N/D	19.3	Da argille ad argille limose
	7	GRAN	16.2	17.2	1.0	#N/D	#N/D	27.7	24.2	#N/D	28.7	47.5	18.2	Da sabbie limose a limi sabbiosi
	8	COE	17.2	24.0	6.8	72.8	7.3	8.5	6.3	6.5	26.3	#N/D	19.2	Da argille ad argille limose
9	GRAN	24.0	24.8	0.8	#N/D	#N/D	28.0	24.5	#N/D	26.9	40.1	18.6	Da sabbie limose a limi sabbiosi	
10	COE	24.8	27.9	3.1	95.2	7.6	11.6	8.6	9.1	25.4	#N/D	19.5	Da limi argillosi ad argille limose	
11	GRAN	27.9	30.2	2.4	#N/D	#N/D	36.4	32.7	#N/D	27.6	45.7	19.3	Da sabbie limose a limi sabbiosi	

Tabella 15 : Parametri geotecnici caratteristici ricavati dall'indagine CPTU 2.

VALORI MEDI	CPTU 2													
	N.strato	Natura Terreno	inizio	fine	spessore	Cu [kPa]	IP [%]	M [Mpa]	E [Mpa]	c' [kPa]	F [°]	Dr [%]	Y [kN/m2]	Litologia
			[m da P.C.]											
	2	GRAN	2.61	9.12	6.51	#N/D	#N/D	45.4	46.0	#N/D	36.7	88.7	19.2	Da sabbie pulite a sabbie limose
	3	COE	9.12	9.85	0.73	50.7	11.8	5.0	3.7	4.1	25.6	#N/D	18.2	Da argille ad argille limose
	3	GRAN	9.85	10.35	0.50	#N/D	#N/D	23.4	20.5	#N/D	30.2	51.4	19.0	Da sabbie limose a limi sabbiosi
	4	COE	10.35	11.22	0.87	55.1	11.2	5.5	4.1	4.5	27.5	#N/D	17.9	Da argille ad argille limose
	5	GRAN	11.22	12.59	1.37	#N/D	#N/D	26.0	22.9	#N/D	29.8	50.2	19.1	Da sabbie pulite a sabbie limose
	6	COE	12.59	16.22	3.63	58.8	8.5	6.3	4.7	5.0	27.1	#N/D	17.8	Da argille ad argille limose
	7	GRAN	16.22	17.22	1.00	#N/D	#N/D	28.4	24.9	#N/D	29.0	48.1	19.1	Da sabbie limose a limi sabbiosi
	8	COE	17.22	24.00	6.78	74.5	7.5	8.7	6.4	6.7	26.8	#N/D	18.0	Da argille ad argille limose
9	GRAN	24.00	24.80	0.80	#N/D	#N/D	28.7	25.1	#N/D	27.3	40.7	19.2	Da sabbie limose a limi sabbiosi	
10	COE	24.80	27.86	3.06	100.0	8.2	12.1	9.0	9.6	25.7	#N/D	17.7	Da limi argillosi ad argille limose	
11	GRAN	27.86	30.24	2.38	#N/D	#N/D	37.1	33.4	#N/D	27.8	46.2	19.5	Da sabbie limose a limi sabbiosi	

Tabella 16 Parametri geotecnici medi ricavati dai risultati della Prova Penetrometrica statica (CPTU 2)

6.4 Interpretazione geotecnica

Il presente capitolo riassume i parametri geotecnici e sismici utili ai fini del progetto di adeguamento sismico della struttura viaria di Marghera – Cavalcavia superiore.

Analizzando quantitativamente i risultati ottenuti, si può concludere che il modello stratigrafico sintetico è il seguente:

Profondità (m)	Litologia	Comportamento	Qualità geotecnica
0.0 – 1.5	Limo-argilloso (terreno oltrepassato dal preforo)	Coesivo-Incoerente	Pessima
1.5 – 9.0	Sabbie, sabbie limose Limi sabbiosi	Incoerente	Mediocre-Discreta
9.0 - 28.0	Argille prevalenti	Coesivo	Discreta
OLTRE 28 m	Sabbi e sabbie limose	Incoerente	Buona

Tabella 17: modello stratigrafico definitivo

Di seguito si riportano i parametri geotecnici caratteristici e medi, a partire dai dati dell'elaborazione delle prove CPTU e con ulteriori operazioni statistiche dall'elaborazione delle prove penetrometriche eseguite, validate dalle prospezioni sismiche; va tenuto presente che i valori si riferiscono ad un areale, quindi possono essere localmente falsati.

VALORI CARATTERISTICI

Strato	Profondità (m)	Cu (kPa)	IP (%)	M (Mpa)	Ed (Mpa)	C' (kPa)	ϕ (°)	Dr (%)	γ (kPa)	Litologia	Vp (m/s)	Vs (m/s)
1	0.0 – 9.0	#N/D	#N/D	34.55	34.825	#N/D	32.85	53.35	19.3	1200	320	1200
2	9.0 – 28.0	65.89	7.61	18.59	16.22	5.82	27.61	45.1875	18.5	1400	280	1400
3	28.0 – 70.0 m	#N/D	#N/D	31.7	28.2	#N/D	28.45	39.95	19.2	1600	380	1600

Tabella 18 parametri geotecnici medi per gli strati individuati

Cu = coesione non drenata

IP = indice di plasticità

M = modulo edometrico

E = Modulo elastico

C' = coesione drenata

ϕ = angolo d'attrito

Dr = densità relativa

γ = peso di volume naturale

Vs = velocità delle onde S (di taglio orizzontale)

Vp = velocità delle onde P (di compressione verticale)

NB: si tratta di uno schema semplificato; resta intesa la locale, seppur molto limitata, difformità stratigrafica.

VALORI MEDI

Strato	Profondità (m)	Cu (kPa)	IP (%)	M (Mpa)	Ed (Mpa)	C' (kPa)	ϕ (°)	Dr (%)	γ (kPa)	Litologia	Vp (m/s)	Vs (m/s)
1	0.0 – 9.0	#N/D	#N/D	22.00	21.04	#N/D	28.99	33.40	19.3	Sab+Lim	1200	320
2	9.0 – 28.0	67.46	8.53	18.66	16.30	5.97	28.02	46.08	18.5	Arg+Lim	1400	280
3	28.0 – 70.0 m	#N/D	#N/D	32.70	29.05	#N/D	28.50	41.00	19.3	Sab+Lim	1600	380

Tabella 19: parametri geotecnici medi per gli strati individuati

Cu = coesione non drenata

IP = indice di plasticità

M = modulo edometrico

E = Modulo elastico

C' = coesione drenata

ϕ = angolo d'attrito

Dr = densità relativa

γ = peso di volume naturale

Vs = velocità delle onde S (di taglio orizzontale)

Vp = velocità delle onde P (di compressione verticale)

NB: si tratta di uno schema semplificato; resta intesa la locale, seppur molto limitata, difformità stratigrafica.

7. 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.

7.1 Definizione delle scelte progettuali

Di seguito sono riepilogati i parametri relativi alla scelta progettuale dell'analisi del sito di interesse:

Cavalcavia superiore – Via della Pila – Marghera (VI)				
Coordinate geografiche (ED50)	Latitudine: 45,480937, Longitudine 12,238864			
Scelta della strategia di progettazione	Vita Nominale: 50 anni Classe d'uso: IV Coefficiente d'uso: 2.0; Stato limite di riferimento: SLV, SLD, SLO Vita di riferimento (Vr): 100 anni Periodo di ritorno: 1850 snni (SLC), 949 anni (SLV), 101 anni (SLD), 60 anni (SLO) Categoria topografica: T1; Categoria sottosuolo: C			
Pericolosità sismica di base	SLO ag: 0,038 g Fo: 2,554 Tc*: 0,260 [s]	SLD ag: 0,047 g Fo: 2,492 Tc*: 0,301 [s]	SLV ag: 0,109 g Fo: 2,608 Tc*: 0,375 [s]	SLC ag: 0,139 g Fo: 2,609 Tc*: 0,395 [s]
Dati di disaggregazione (nodo ID 12293)	Magnitudo (M) compresa tra 4 e 6.5 (SLV, SLD, SLO, SLC) Distanza (R) compresa tra 30 km e 90 km (SLC, SLV), tra 30 km e 120 km (SLD), tra 30 km e 130 km (SLO)			

Tabella 20: parametri sismici dinamici del sito d'indagine

7.2 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.

Sismostrato	Spessore (m)	Vs (m/s)	Peso di volume (kN/m ³)	Tensione verticale [kPa]	Descrizione
1	1.50	250.00	17.00	12.8	Limi Sabbiosi
2	8.50	320.00	18.00	60.3	Sabbie e sabbie limose
3	25.00	250.00	18.00	197.5	Argille prevalenti
4	35.00	380.00	18.00	621.5	Sabbie, sabbie limose
Like-Bedrock	Half-Space	550.00	19.00	943.2	Ghiaie

Tabella 21: modello sismostratigrafico semplificato utilizzato per analisi di Risposta Sismica Locale

7.3 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. **12525**.

Per **SLC** si è selezionata una probabilità di **eccedenza del 5% in 50 anni**. In **Figura 50** 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 4.5 e 6.5** e una **distanza R compresa tra 30 e 70 km**, dati utilizzati nel software Rexel 3.5 per la ricerca del gruppo di 7 accelerogrammi utili alle analisi.

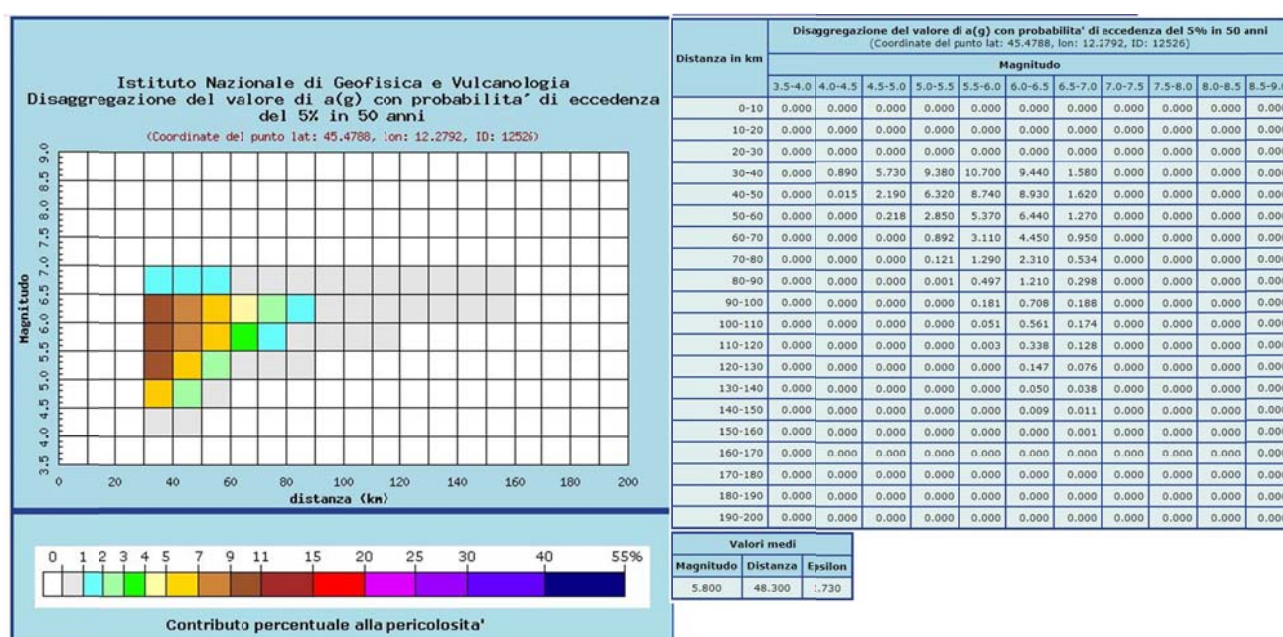


Figura 50: Parametri di disaggregazione SLC.

Per **SLV** si è selezionata una probabilità di **eccedenza del 10% in 50 anni**. In **Figura 51** 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 6.5** e una distanza **R compresa tra 30 e 90 km**, dati utilizzati nel software Rexel 3.5 per la ricerca del gruppo di 7 accelerogrammi utili alle analisi.

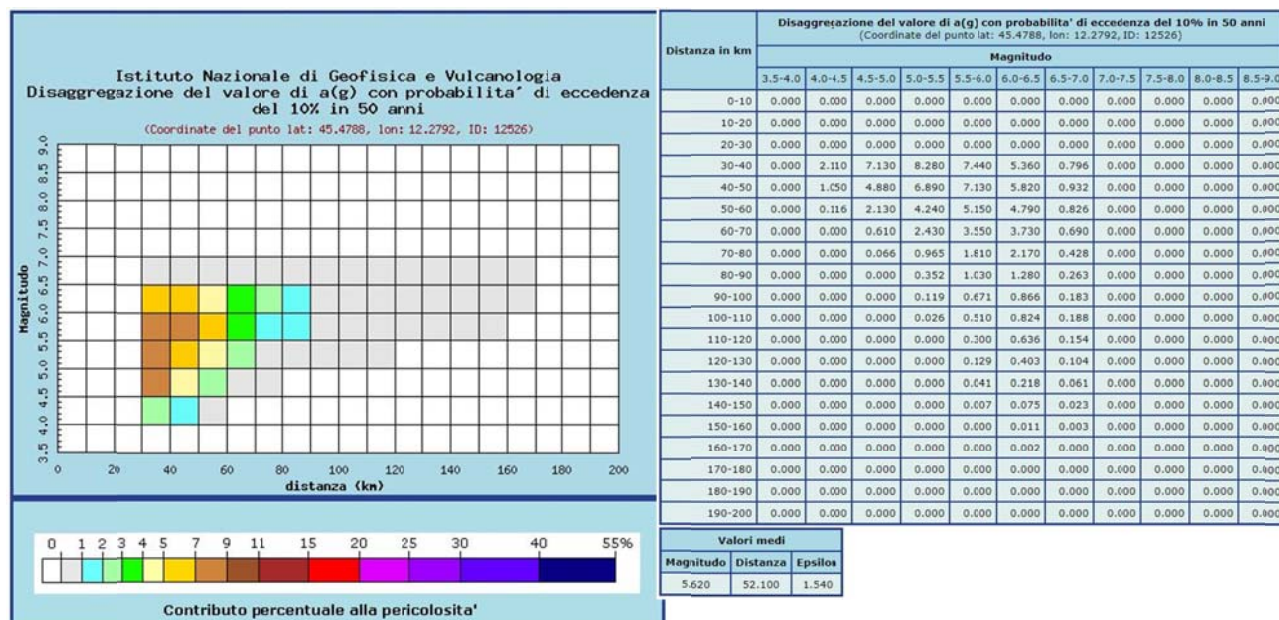


Figura 51 Parametri di disaggregazione SLV.

Per **SLD** si è selezionata una probabilità di **eccedenza del 63% in 50 anni**. In **Figura 52** 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 6.5** e una distanza **R compresa tra 30 e 90 km**, dati utilizzati nel software Rexel 3.5 per la ricerca del gruppo di 7 accelerogrammi utili alle analisi.

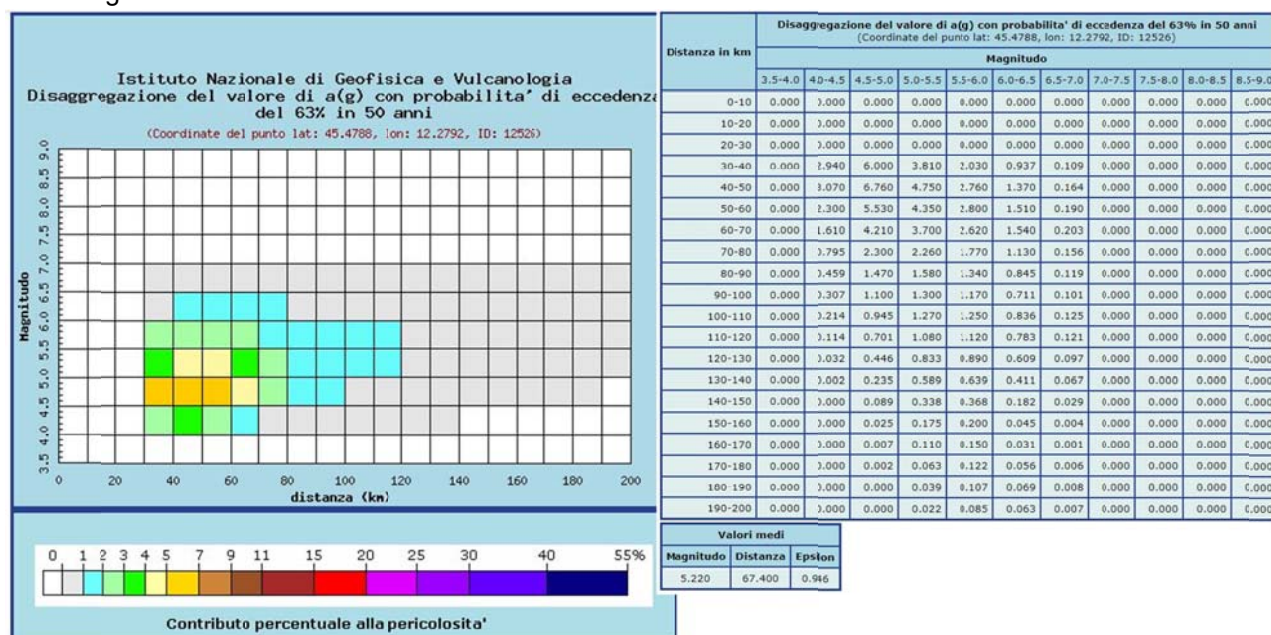


Figura 52: Parametri di disaggregazione SLD.

Per **SLO** si è selezionata una probabilità di **eccedenza del 81% in 50 anni**. In **Figura 53** 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 6.5 e una distanza R compresa tra 0 e 80 km, dati utilizzati nel software Rexel 3.5 per la ricerca del gruppo di 7 accelerogrammi utili alle analisi.

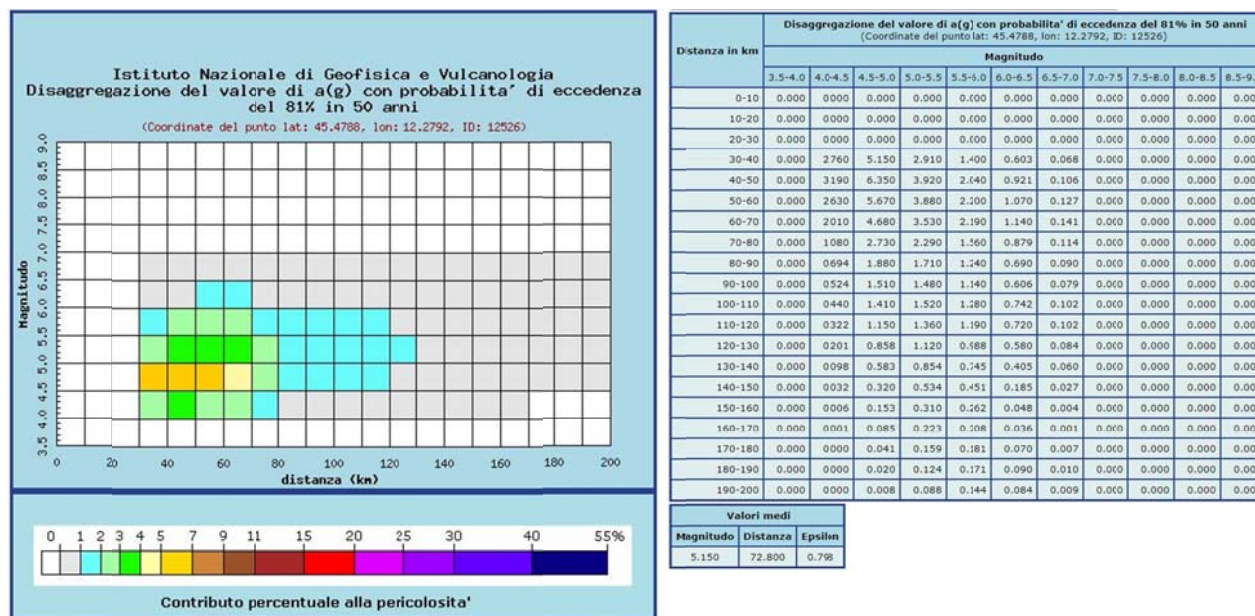


Figura 53: Parametri di disaggregazione SLO.

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 **settopla** spettrocompatibile definita tramite REXEL (**Figura 54**). 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 $0.109g$ per il sito del cavalcavia di MARGHERA in classe di edificio 4).

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.**

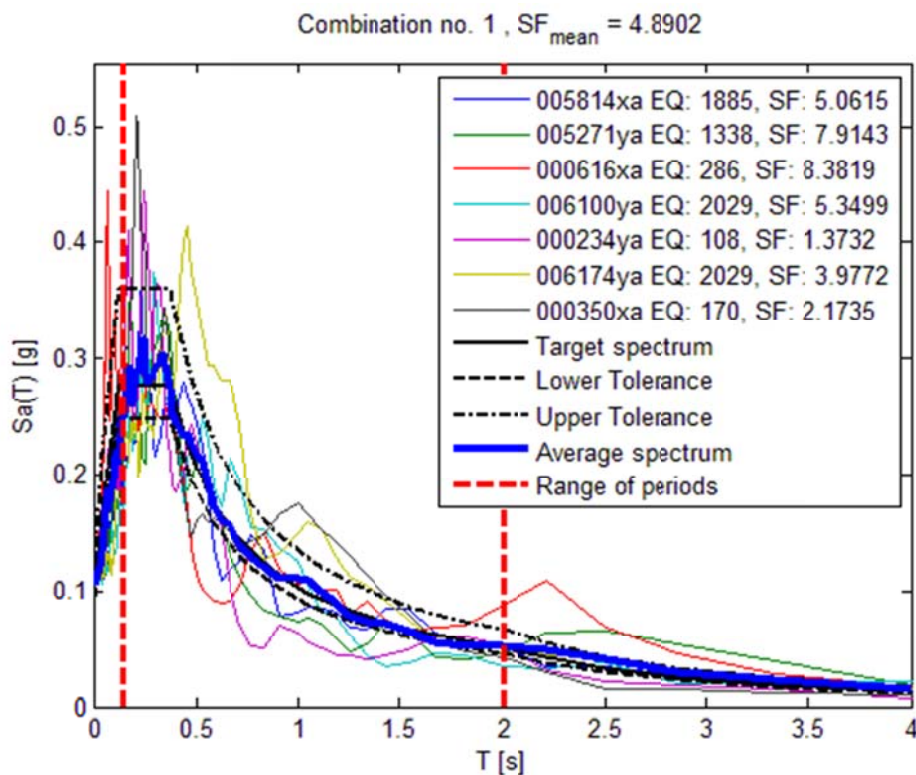


Figura 54: Accelerogrammi di Input ricavati con l'utilizzo del Software Rexel 3.5 (progetto dell'Università Federico II di Napoli)

7.4 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 55)**. 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.

• 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 di 1.0 Hz (principale - vedi tabella cap. 4.2.2) e 2.0 Hz (secondaria)**. 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 1.6 volte dell'accelerazione sismica di base di 0.109 g alle basse frequenze.

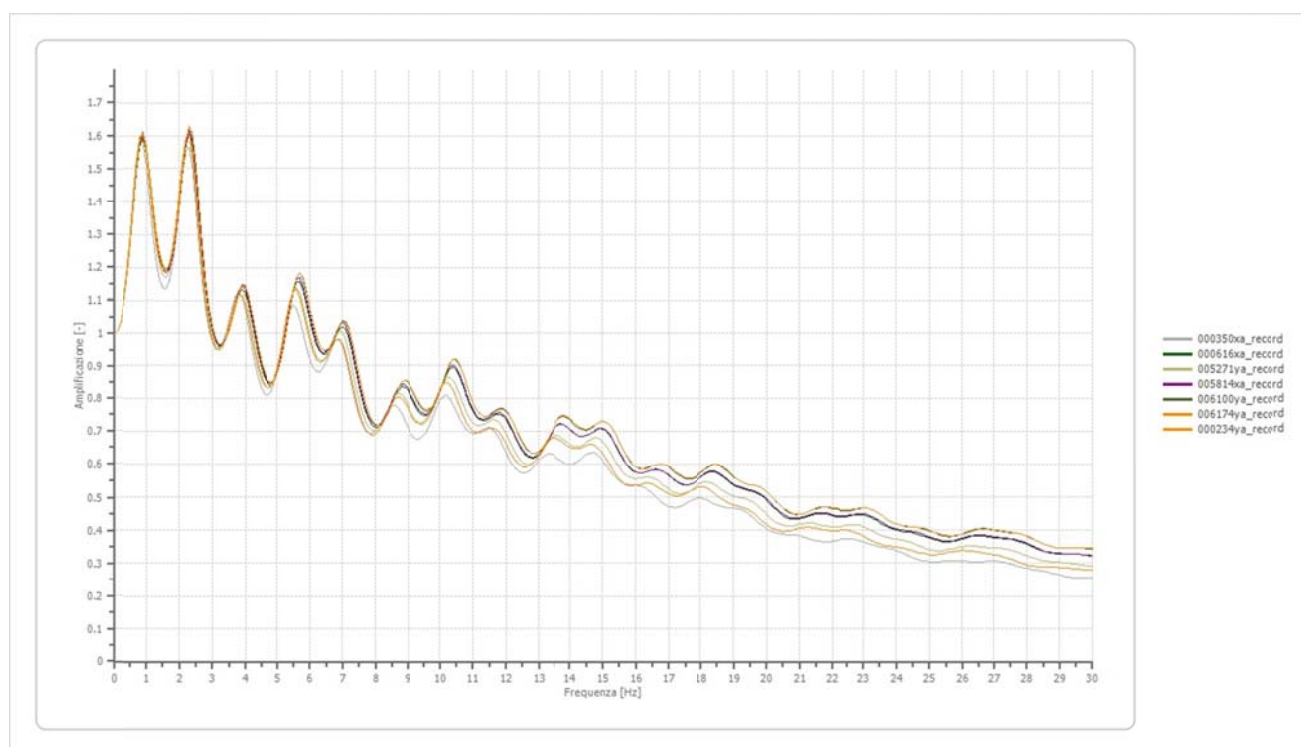


Figura 55: Funzione di trasferimento dell'accelerazione

La seguente Figura 56 riporta lo **spettro medio di accelerazione di output** in sovrapposizione agli spettri indicati dalla normativa per i sottosuoli di categoria B e C, T1,

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 57.

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 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 SLV. (Ordinanza n. 3519/2006).

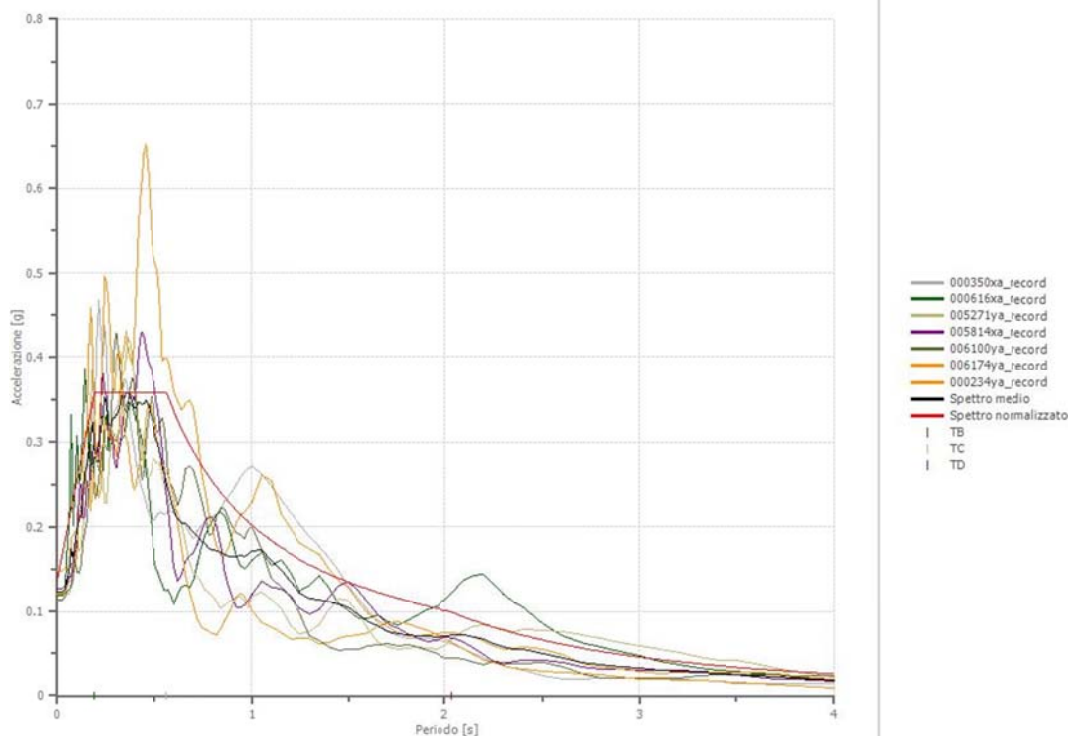


Figura 56: Spettro di risposta medio ricavato dallo Studio di Risposta Sismica Locale. Stato limite di riferimento SLV. In sostanza lo spettro ci dice su quali frequenze di vibrazione la sollecitazione sulle strutture risulta massima e sono possibili fenomeni di risonanza, che potrebbero determinarne il collasso.

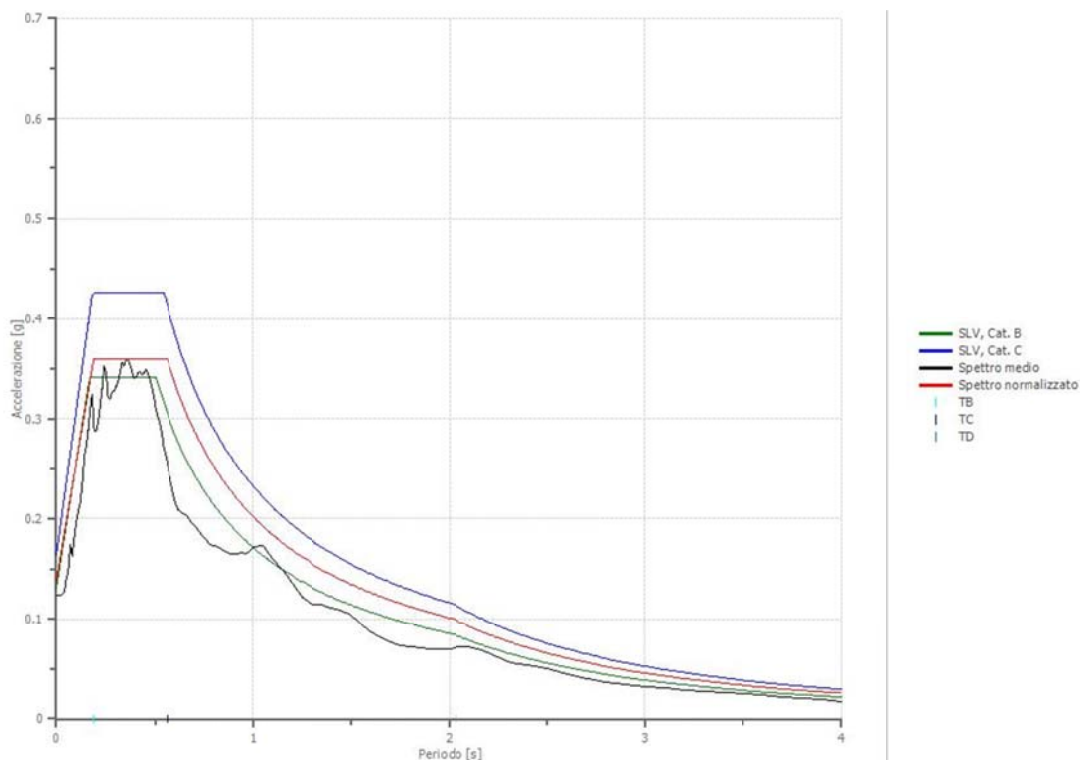


Figura 57: Spettro di risposta medio ricavato dallo Studio di Risposta Sismica Locale sovrapposto agli spettri di normativa per categorie B, T1 e C, T1. Stato limite di riferimento SLV

- **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 ovviamente le stesse frequenze (esse dipendono dagli accelerogrammi di input e dalla stratigrafia) che per gli SLV ovvero quelle di 1.0 Hz (principale - vedi tabella cap. 4.2.2) e 2.0 Hz (secondaria).** 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 1.6 volte dell'accelerazione sismica di base di 0.047g per gli SLD alle basse frequenze.

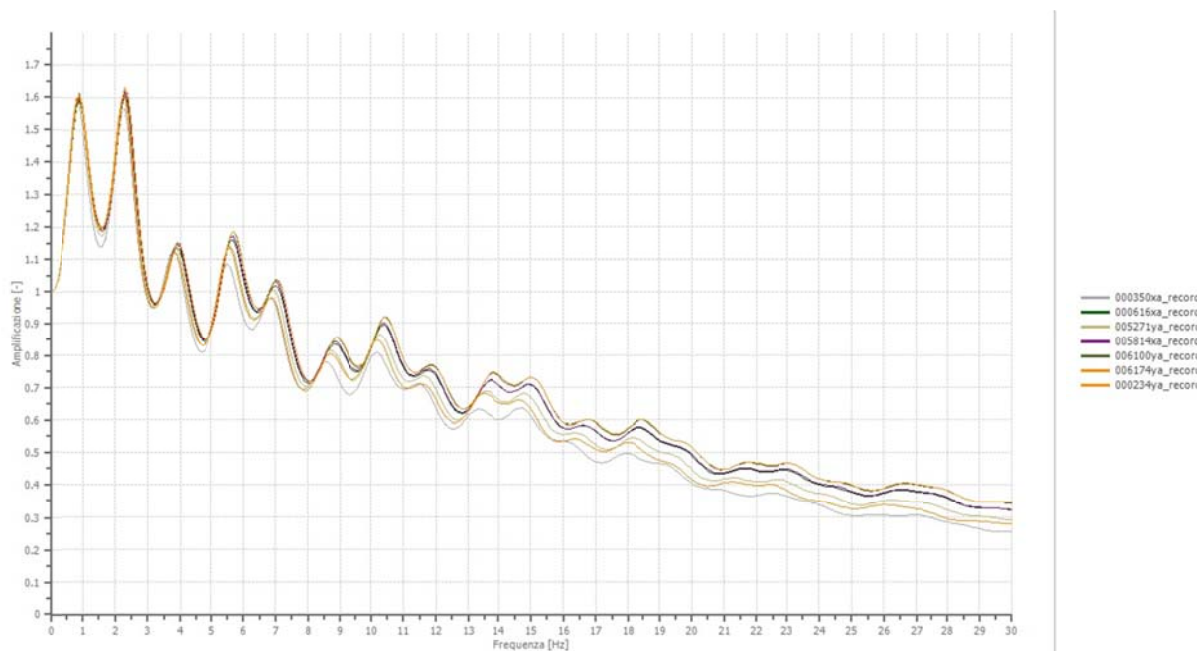


Figura 58: Funzione di trasferimento dell'accelerazione per il sito in esame

La seguente Figura 59 riporta lo **spettro medio di accelerazione di output** in sovrapposizione agli spettri indicati dalla normativa per i sottosuoli di categoria B e C, T1, considerando come stato limite di riferimento gli SLD

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 60.

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).

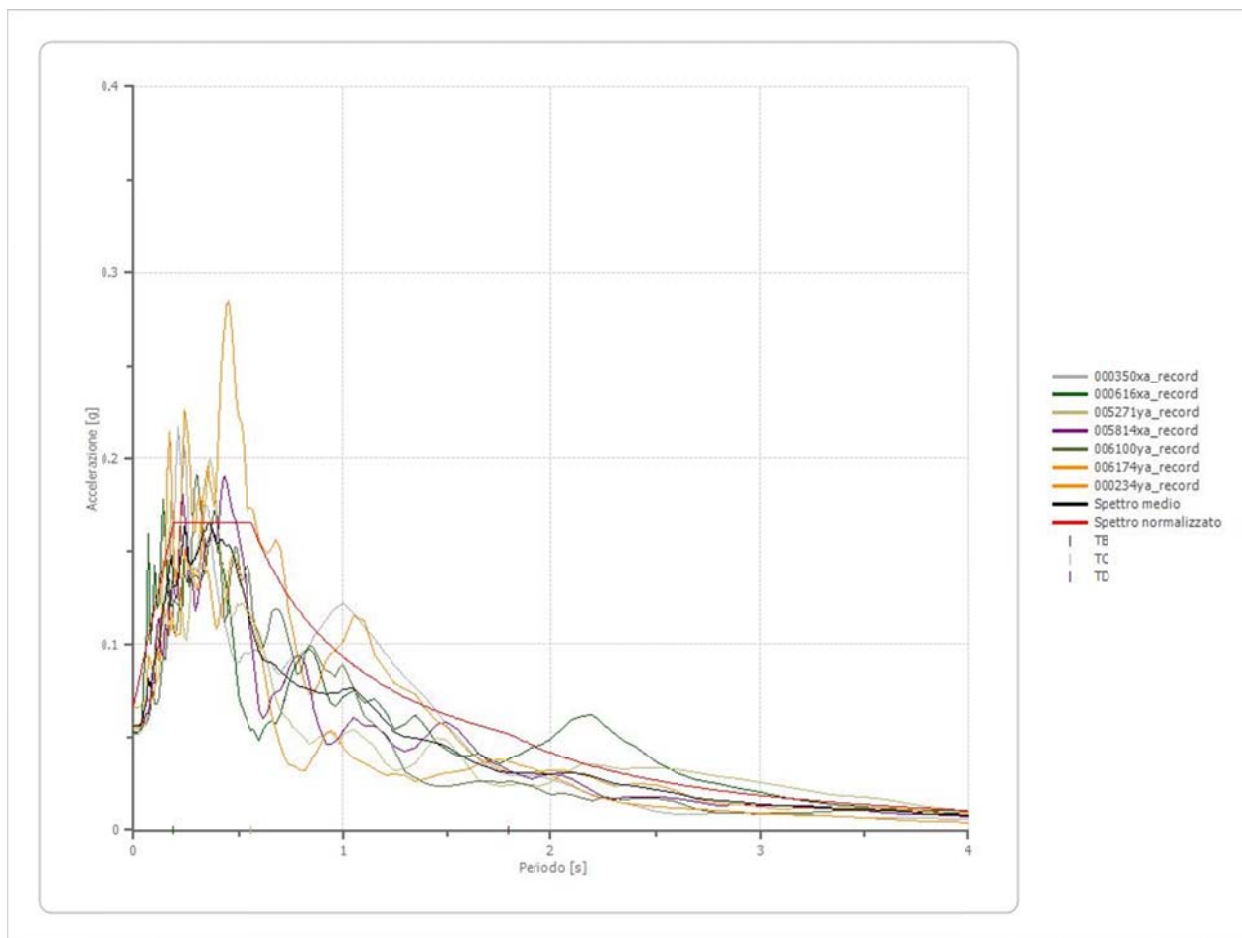


Figura 59: Spettro di risposta medio ricavato dallo Studio di Risposta Sismica Locale. Stato limite di riferimento SLD
In sostanza lo spettro ci dice su quali frequenze di vibrazione la sollecitazione sulle strutture risulta massima e sono possibili fenomeni di risonanza, che potrebbero determinarne il collasso.

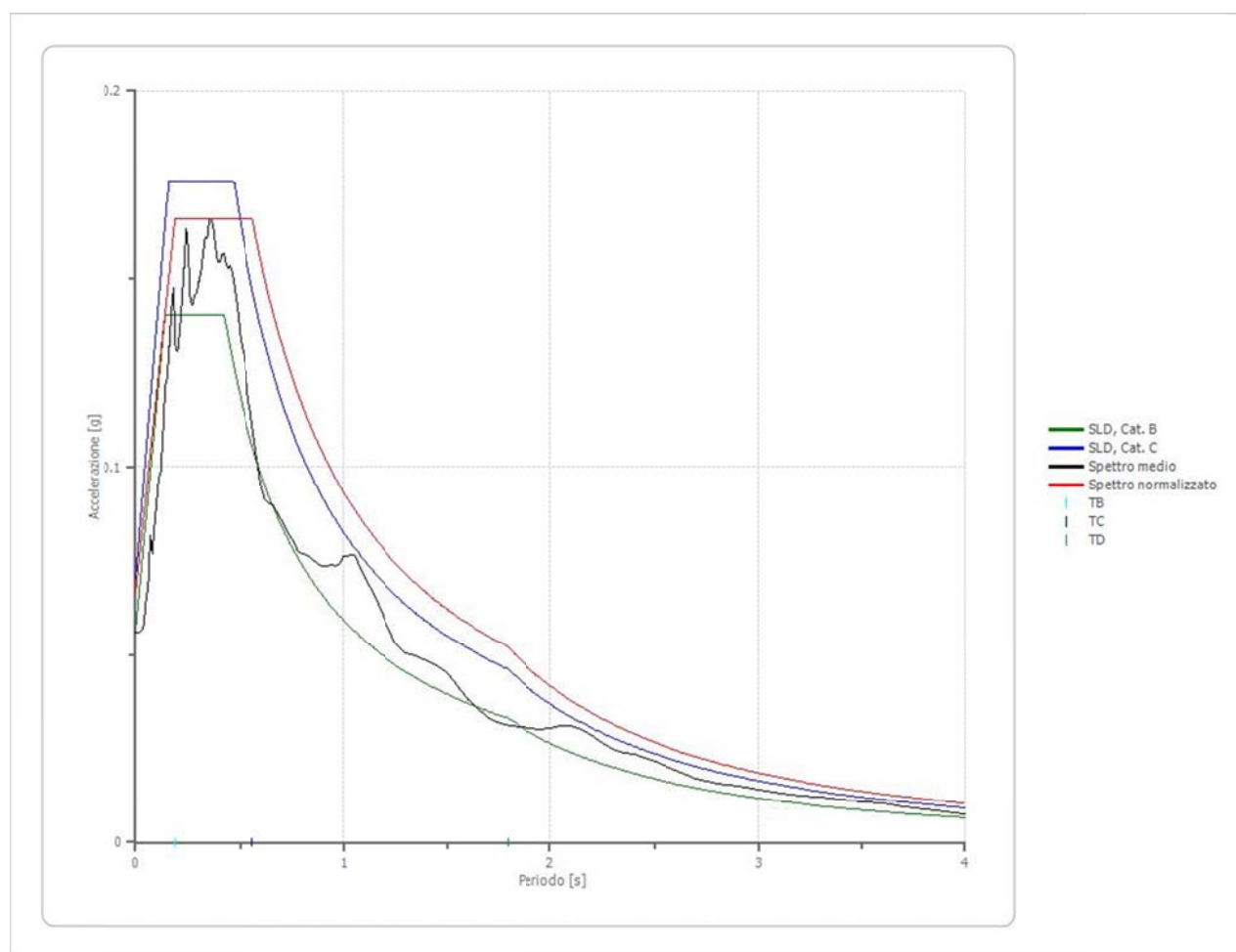


Figura 60: Spettro di risposta medio ricavato dallo Studio di Risposta Sismica Locale sovrapposto agli spettri di normativa per categorie B, T1 e C, T1. Stato limite di riferimento SLD

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 basso 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.

8. VERIFICA DELLA SUSCETTIVITA' ALLA LIQUEFAZIONE DEI TERRENI

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

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 58(a) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c < 3,5$ ed in figura 58(b) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c > 3,5$.

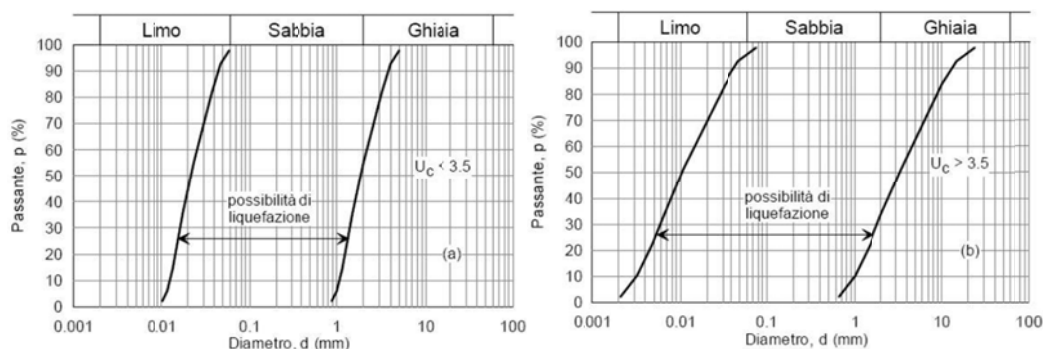


Figura 62 – intervallo granulometrico di suscettività alla liquefazione

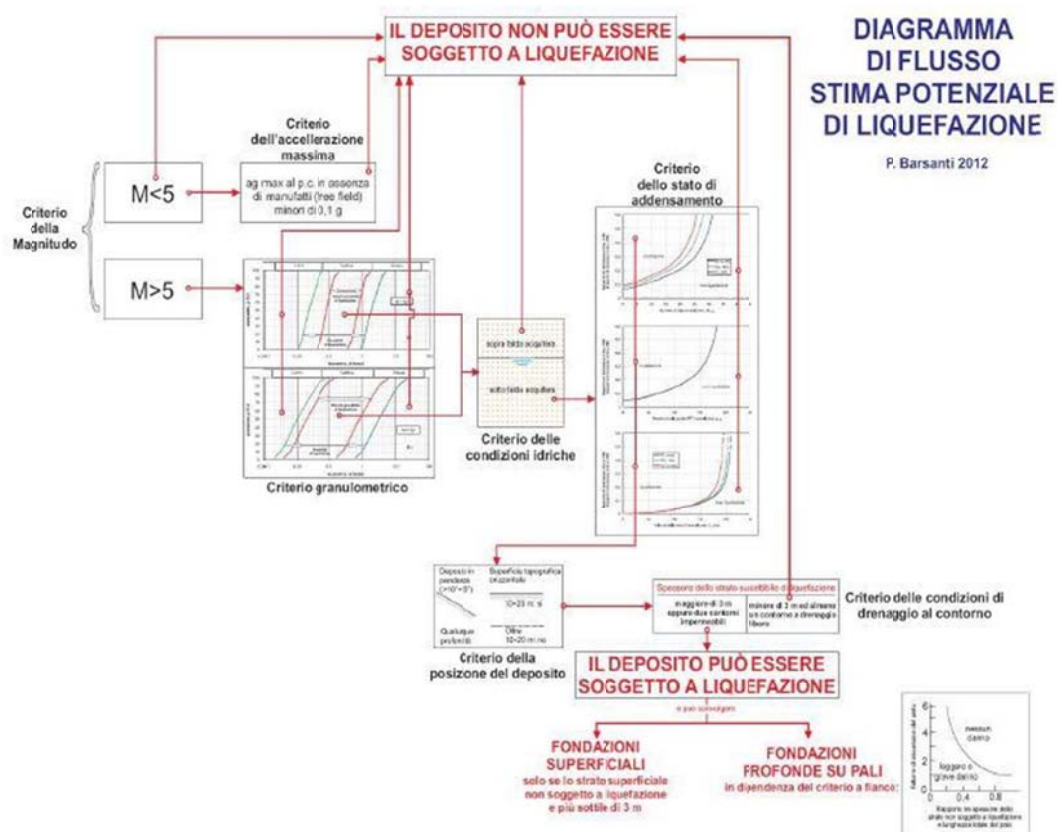


Figura 63 – Diagramma di flusso per la stima del potenziale di liquefazione

Nel caso specifico per il sito in esame, l'accelerazione massima attesa al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) per gli SLV è di 0,098g dunque inferiore al limite di 0,100 g, dunque questo fattore potrebbe essere considerato sufficiente per escludere a priori la possibilità di liquefazione, l'omissione della verifica stessa

Tuttavia, analizziamo la situazione nel complesso:

- Magnitudo attesa NON è inferiore a 5: Il sito ricade a circa 40 chilometri dalla zona sismogenetica n. ZS905, a cui è assegnata (secondo il volume indirizzi e criteri per la microzonazione sismica) una magnitudo massima di 6.6. Secondo l'analisi di disaggregazione esposta in capitolo 3.2, la massima magnitudo attesa al sito che metta a rischio la Salvaguardia della Vita, è di 5.65 Mw per un epicentro di terremoto posto a 52.100 km di distanza.

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, 916, 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 64: 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 1.50 e 9.0 m dal p.c. è interna alle zone indicate nella figura 55 (la figura mostra l'intervallo granulometrico di suscettività alla liquefazione nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c < 3,5$ ed in figura 15(b) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c > 3,5$.)
- lo strato liquefacibile ha uno spessore maggiore di 3 m ;
- la liquefazione può avere effetti sulle fondazioni superficiali in quanto lo strato superficiale non soggetto a liquefazione è più sottile di 3 m;
- La liquefazione può avere effetti sulle fondazioni profonde in dipendenza del criterio desumibile dal seguente schema



Figura 65: 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. I possibili danni si hanno quando il F_s è attorno a 1 – 2 e il rapporto di ordinata pari a 0.2 – 0.4 (ovvero lunghezze strato non liquefacibile minore di metà della lunghezza del palo).

Non si esclude del tutto quindi la liquefazione dei terreni sabbiosi presenti tra 1.50 e 10 m circa dal p.c., con danni possibili alle fondazioni degli edifici.

E' stata effettuata dunque una verifica alla liquefazione sullo strato 2 presente oltre tra le profondità di 2.5 e 9.0 m circa dal p.c. come da prove CPTU, considerando 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).

Attraverso l'utilizzo del Software Static Probing di Geostru. Si è applicato innanzitutto il metodo semplificato e la procedura originaria (Seed e Idriss, 1971) da cui risulta Fattore di Sicurezza > 1 e pari a circa a 1.20.

Liquefazione Metodo di Robertson & Wride 1997

Inizio strato (m)	Fine. Strato (m)	Qc (Kg/cm ²)	Fs (Kg/cm ²)	Correlazione	Fattore di sicurezza a liquefazione
2.45	8,80	12,7504	0,063327	Robertson & Wride 1997	1,175

Tabella 23 Liquefazione da correlazione con dati da prova CPTU 1.

Liquefazione Metodo di Robertson & Wride 1997

Inizio strato (m)	Fine. Strato (m)	qc (Kg/cm ²)	fs (Kg/cm ²)	Correlazione	Fattore di sicurezza a liquefazione
2.60 2	9,10	13,06791	0,070346	Robertson & Wride 1997	1,25

Tabella 24: Liquefazione da correlazione con dati da prova CPTU 2.

9. CONCLUSIONI

In base a quanto detto finora, l'area in oggetto può essere considerata stabile dal punto di vista geomorfologico e non presenta particolari Vincoli o Fragilità.

I terreni sono di tipo limoso-argilloso fino a profondità di 2.5 m circa (nel sito d'indagine è presente la pavimentazione stradale), con elevate capacità coesive e buone proprietà geotecniche, passanti a sabbie con limo tra 2.50 e 9.0 m dal p.c. (corpo sabbioso del sistema alluvionale del Brenta) aventi buone capacità geotecniche e, infine, livelli argillosi 9,0 e i 30,0 m circa. A questa profondità si trova un nuovo strato a sabbia prevalente con Vs pari a circa 380 m/s. In ultima analisi si è identificato un nuovo cambio litologico a profondità di circa 75-90 m dal p.c. con il passaggio a depositi ghiaiosi aventi Vs pari a 550 m/s. 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 270 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 di Marghera si presenta come un filtro che risona alle frequenze caratteristiche di 2.0 Hz circa (ovvero al contatto tra argille prevalenti, presenti tra 9.5 m da p.c. e 35.0 m dal p.c. e sabbie compatte prevalenti, identificate tra 35 e 100 m circa dal p.c.) e di 1.0 Hz circa (contatto tra sabbie compatte prevalenti, identificate tra 35 e 100 m circa dal p.c., e primo substrato like bed-rock ovvero il contatto con le Ghiaie fluvioglaciali).

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. Inoltre, nonostante lo spettro di Categoria C presenti un valore di picco dell'accelerazione leggermente più basso rispetto al valore di picco dello spettro di Categoria C (per SLV e per SLD), lo scarto tra questi due valori è comunque inferiore al 20% e dunque si può considerare definitivamente per i calcoli sulle strutture in relazione all'adeguamento sismico del cavalcavia, lo spettro di Risposta Sismica Locale, andando a soddisfare le prescrizioni delle NTC al capitolo §3.2.3.6.

Infine, è stata riscontrata possibilità di liquefazione dei depositi sabbiosi presenti tra 2.50 e 9.0 m circa dal p.c. i 5.0 m di profondità in concomitanza di eventi con Magnitudo pari > 6. Considerata la massima magnitudo attesa per la zona d'indagine 5.65 per gli SLV (secondo i dati di disaggregazione della pericolosità sismica di riferimento), la possibilità di liquefazione risulta 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

Dott. Geol. Nicola Saviane

Allegati:

- *Atlante Fotografico*
- *Bibliografia*

ALLEGATO 1: ATLANTE FOTOGRAFICO



FOTO 1 : individuazione punto d'esecuzione Prova Penetrometrica Statica CPTU 1.



FOTO 2 : individuazione punto d'esecuzione Prova Penetrometrica Statica CPTU 2.



FOTO 3 : Prova Penetrometrica Statica CPTU 1.



FOTO 4 : tromografo digitale per indagine HVSR 1



FOTO 5: tromografo digitale per indagine HVSR 2



FOTO 6 : linea d'indagine sismica attiva MASW 1



FOTO 7: stendimento di sismica MASW 2.



FOTO 8 : dettaglio su apparecchi ricevitori delle onde sismiche, Geofoni da 4,5 Hz.

ALLEGATO 2: BIBLIOGRAFIA

- PTGM - PIANO TERRITORIALE GENERALE METROPOLITANO, 2014;
- PAT COMUNE DI VENEZIA, 2014;
- INDAGINE IDROGEOLOGICA SULL'AREA DI PORTO MARGHERA (seconda fase) DGRV n. 4879/99 - DGRV n. 4225/2004 - DGRV n. 3359/2005 - DGRV n. 3615/2005. Marzo 2009;
- PIANO STRALCIO PER L'ASSETTO IDROGEOLOGICO DEL BACINO SCOLANTE IN LAGUNA DI VENEZIA . Marzo 2015. Autorità di bacino dei fiumi dell'Alto Adriatico - Cannaregio 4314 - 30121 Venezia.
- Le acque sotterranee della pianura veneta - I risultati del Progetto SAMPAS . ARPAV e Regione Veneto, 2008.
- Carta Geomorfologica della Provincia di Venezia, scala 1:50.000. A Bondesan, A. Vitturi, R. Rosselli, 2004
- Piano di Provinciale di Protezione Civile della Provincia di Venezia. A. Vitturi, P. Zangheri. 2007.
- Colombo P., 1974. "Elementi di geotecnica". Zanichelli Ed., Bologna. pp.1-290.
- Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia Gruppo di Lavoro MPS, 2004. "Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo 2003".
- Lancellotta R., 1993. "Geotecnica". Zanichelli Ed., Bologna. pp.1-555.
- Progetto DCP-INGV – S1; <http://esse1-gis.mi.ingv.it>
- Database of Individual Seismogenetic Sorces versione 3.2.1 (INGV) <http://diss.rm.ingv.it/dissGM/index.html?Il=ITIS101>;
- Gestione Parametri Sismici - Geostru - Geostru Geoapp (<https://geoapp.eu/parametrisismici2018/>)
- Cestari F., 1990 "Prove geotecniche in sito". Geo-Graph s.n.c..
- Prontuario interattivo di geotecnica - Caratterizzazione geotecnica - Fondazioni dirette – Cedimenti DARIO FLACCOVIO editore AUTORE T. Collotta
- Hiroshi Arai, Kohji Tokimatsu, 2005 "S-Wave velocity profiling by inversion of microtremor H/V spectrum".
- Aki K., 1964. A note on the use of microseisms in determining the shallow structures of the earth's crust, *Geophysics*, 29, p. 665 – 666.
- Arai H. e Tokimatsu K., 2004. S-Wave Velocity Profiling by Inversion of Microtremor H/V Spectrum, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 94, p. 53 – 63.
- Castellaro S., Mulargia F. Bianconi L., 2005. Stratigrafia sismica passiva: una nuova tecnica accurata, rapida ed economica, *Geologia Tecnica Regionale*, vol. 3.
- D'Amico V., Picozzi M., Albarello D., Naso G. e Tropenscovino S., 2004. Quick estimates of soft sediments thicknesses from ambient noise horizontal to vertical spectral ratios: a case study in southern Italy, *J. Eartq. Eng.*, 8, p. 895 – 908.
- Dal Moro G., 2008b, Rapporto sulla campagna Vs30 in Friuli Venezia Giulia, Dipartimento di Scienze Geologiche Ambientali e Marine, Università di Trieste.
- Dal Moro G & Pipan M., 2007, Joint Inversion of Surface Wave Dispersion Curve and Reflection Travel Times via Multi-Objective Evolutionary Algorithms, *J. Appl. Geophysics*, 61, 56-81.
- Gallipoli R., La Penna V., Lorenzo P. et al., 2000. Comparison of geological and geophysical prospecting techniques in the study of a landslide in southern Italy, *European J. Environm. and Eng. Geophys.*, 4, p. 117 – 128.
- Ibs-von Seht M. e Wohlenberg J., 1999. Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments, *Bull. Seismol. Soc. America*, 89, p. 250 – 290.
- Ivanov, J., Miller, R.D., Xia, J., Steeples, D., and Parck, C.B., 2006, Joint Analysis of Refractions with Surface Waves. An Inverse Refraction-Traveltime Solution: *Geophysics*, 71, R131-R138.
- ITASCA (2011) - FLAC 2D v 7.00.413 – Fast Lagrangian Analysis of Continua – Version 5.0. User's Guide, Itasca Consulting Group, Minneapolis, USA.
- Mucciarelli M. e Gallipoli M.R., 2001. A critical review of 10 Years of microtremor HVSR technique, *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 42, P. 255 – 266.
- Mucciarelli M. e Gallipoli M.R., 2006. Comparison between Vs30 and other estimates of site amplification in Italy, *Conf. Eartq. Eng. And Seismol.*, Ginevra, 3-8 Sept. no 270.
- Mulargia F., Castellaro S., Rossi P.L., 2007. Effetti di sito e Vs30: una risposta alla normativa antisismica", *Il geologo – Ordine dei Geologi Regione Emilia Romagna*.
- Nakamura Y., 1989. A method for dynamic characteristics estimates of subsurface using microtremor on the round surface, *QR of RTRI*, 30, p. 25 – 30.
- Roth M. & Holliger K- 1999. Inversion of Sourcegenerated noise in high-resolution seismic data. *The Leading Edge*, 18, 1402-1406.