



## CAP Holding S.p.A.

Via del Mulino, 2 - Palazzo U10  
20090 Assago (MI)

### COMUNE DI SESTO SAN GIOVANNI INDAGINI GEOLOGICO-TECNICHE A SUPPORTO DELLA PROGETTAZIONE DI ALCUNI INTERVENTI PRESSO L'IMPIANTO DEPURAZIONE ACQUE DI SESTO SAN GIOVANNI (MI)

### RELAZIONE GEOLOGICA GENERALE E RELAZIONE GEOTECNICA

Num. Rif. Lavoro	18-087n	N. copie consegnate		
	Data	Redatto (RT)	Revisionato (RC)	Approvato (DT)
rev00	09/10/2018	Dott. Geol. N. Bistacchi	Dott. Geol. D. Fantoni	Dott. Geol. D. Fantoni Dott. Geol. E. Coatti
rev01				
<b>Gruppo di lavoro</b>	Dott. Geol. D. Gerosa, Dott. Geol. G. Criniti, Dott. Geol. A. Longhi			
<b>Nome file</b>	18-087-n-cap_depuratore Sesto San Giovanni_relazione.doc			



Via Sentirone n.10 –  
20037 Paderno Dugnano (MI) –  
P.IVA 02676190966  
Tel. 02.91084691 - Fax 02.99108919  
info@eurogeosrl.it - eurogeosrl@pec.eurogeosrl.it  
<http://www.eurogeosrl.it>

**Idrogea**  
servizi S.r.l.  
Società di Ingegneria



Via Lungolago di Calcinate, 88 –  
21100 Varese –  
P.IVA : 02744990124  
Tel. 0332 286650 – Fax 0332 234562 -  
idrogea@idrogea.com – idrogea@pec.it  
[www.idrogea.com](http://www.idrogea.com)

## SOMMARIO

---

1	PREMESSA.....	3
2	INQUADRAMENTO GEOGRAFICO .....	4
3	INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO, GEOLOGICO, IDROGEOLOGICO E GEOTECNICO 5	5
4	FATTIBILITA' GEOLOGICA DI PIANO E VINCOLI.....	7
5	INDAGINI ESEGUITE.....	9
5.1	SONDAGGI GEOGNOSTICI .....	10
5.1.1	Risultati Stratigrafici.....	11
5.1.2	Prove SPT .....	14
5.2	PROVE PENETROMETRICHE DINAMICHE.....	16
5.2.1	Metodologia Impiegata .....	16
5.2.2	Esiti delle prove .....	19
5.3	STRATIGRAFIA LITOTECNICA .....	21
5.4	INDAGINE SISMICA M.A.S.W.....	23
5.4.1	Indagine geofisica MASW: metodologia e strumentazione .....	24
5.4.2	Elaborazione dati .....	25
5.4.3	Calcolo delle $V_{S,30}$ e definizione della categoria di sottosuolo – NTC18.....	28
5.4.4	Analisi del potenziale di liquefazione dei terreni di fondazione.....	30
6	CONCLUSIONI.....	31

## 1 PREMESSA

Le Società Eurogeo s.r.l. e Idrogea Servizi S.r.l., nel contesto dell'incarico affidato da **CAP Holding S.p.A.** per l'affidamento di prestazioni di indagini geologiche, geotecniche e sismiche presso impianti di depurazione, stazioni di sollevamento fognarie e reti di fognatura dislocate nelle province di Milano e di Monza Brianza (CIG 72861132A8) ha effettuato alcune indagini presso l'impianto trattamento acque di Sesto San Giovanni (MI), in Via Daniele Manin, interessata da interventi vari di manutenzione straordinaria.

Nello specifico, nel mese di Settembre 2018, sono state eseguite le seguenti indagini geognostiche, geotecniche e sismiche:

1. Raccolta ed analisi della documentazione di progetto;
2. Presa in carico e consultazione di tutta la documentazione disponibile relativamente al contesto geologico, geotecnico e idrogeologico dell'area;
3. Esecuzione di indagine Georadar finalizzato alla individuazione di sottoservizi nelle aree di indagine;
4. Esecuzione di n.1 indagine Sismica (MASW);
5. Esecuzione di n.2 sondaggi geognostici, a carotaggio continuo, spinti fino a 10 m da p.c. con esecuzione di n.4 prove SPT in foro per verticale di sondaggio;
6. Esecuzione di n.5 prove penetrometriche dinamiche (con attrezzatura DPSH) a 10.2 m da

La presente relazione identifica e definisce gli aspetti geologici, idrogeologici e geotecnici dell'area di progetto descrivendo in dettaglio le litologie e i valori geotecnici dei terreni presenti nell'area.

Le indagini sono state localizzate, in accordo con la committente, in corrispondenza del settore interessato dal progetto.

## 2 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

L'area interessata dalle opere in progetto (figura 1) si colloca in Via Leonardo Da Vinci, nel settore meridionale del territorio comunale di Sesto San Giovanni.

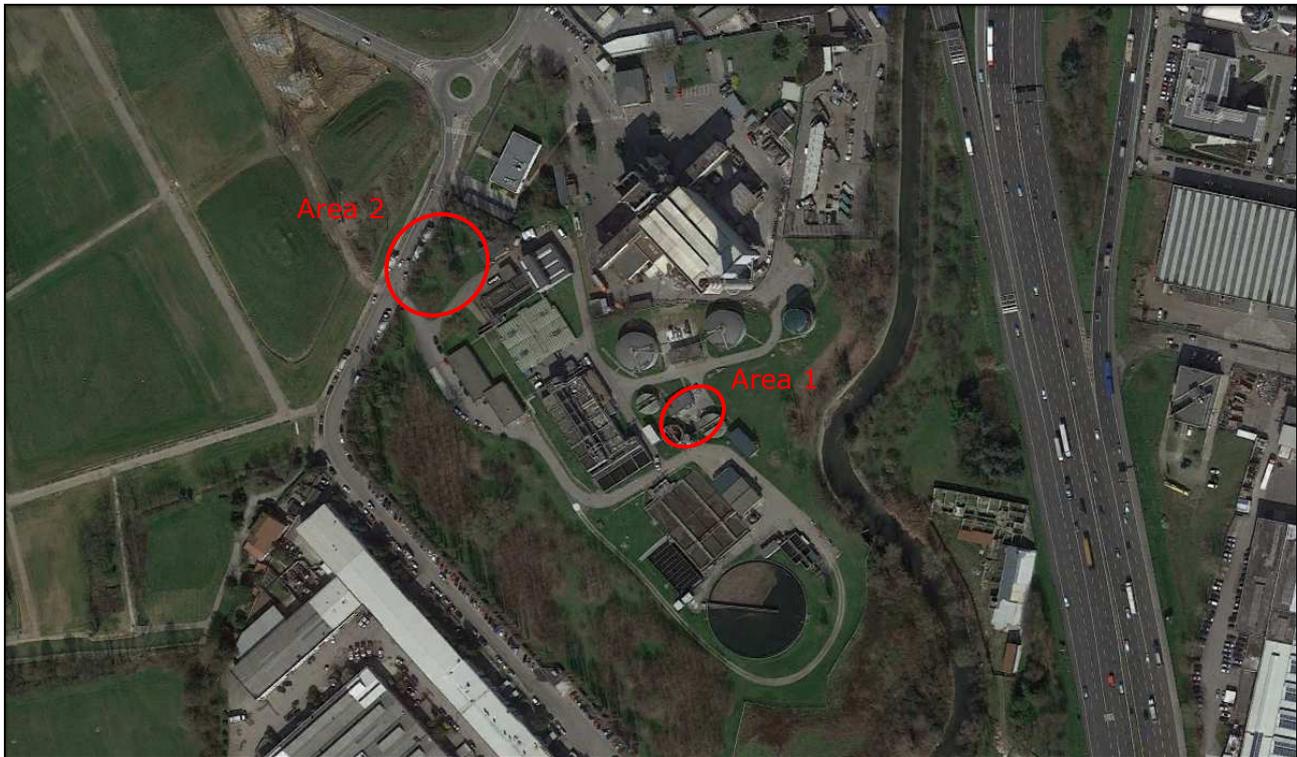


Figura 1 – Immagine aerea dell'area di progetto (in rosso i due settori oggetto di indagine)

### 3 INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO, GEOLOGICO, IDROGEOLOGICO E GEOTECNICO

Il territorio ha forma subpianeggiante debolmente degradante verso sud –sud ovest e presenta una serie di blande depressioni di paleoalveo che si sviluppano generalmente in direzione NNW-SSE, mantenendo l'allineamento con l'attuale reticolo idrografico superficiale. L'unica evidenza morfologica è rappresentata dalla blanda incisione fluviale del fiume Olona che attraversa il territorio comunale.

Da un punto di vista geologico, il territorio comunale di Sesto San Giovanni è interessato da depositi appartenenti al Diluvium recente, che costituisce il livello fondamentale della Pianura con ghiaie sabbiose prevalenti e solo occasionalmente con sabbie. Esso si estende uniformemente su tutta l'area, interrotto soltanto, lungo il limite orientale, dai depositi alluvionali del Lambro (Alluvium), all'interno dei quali è ubicata l'area in esame.

In particolare i depositi appartenenti all'Alluvium sono prevalentemente costituiti da ghiaie e sabbie prive di alterazioni superficiali; l'eventuale presenza di sabbie e limi, disposti con andamento lenticolare allungato nel senso della direzione di corrente, dipende delle divagazioni che ha subito il corso del t. Lambro.

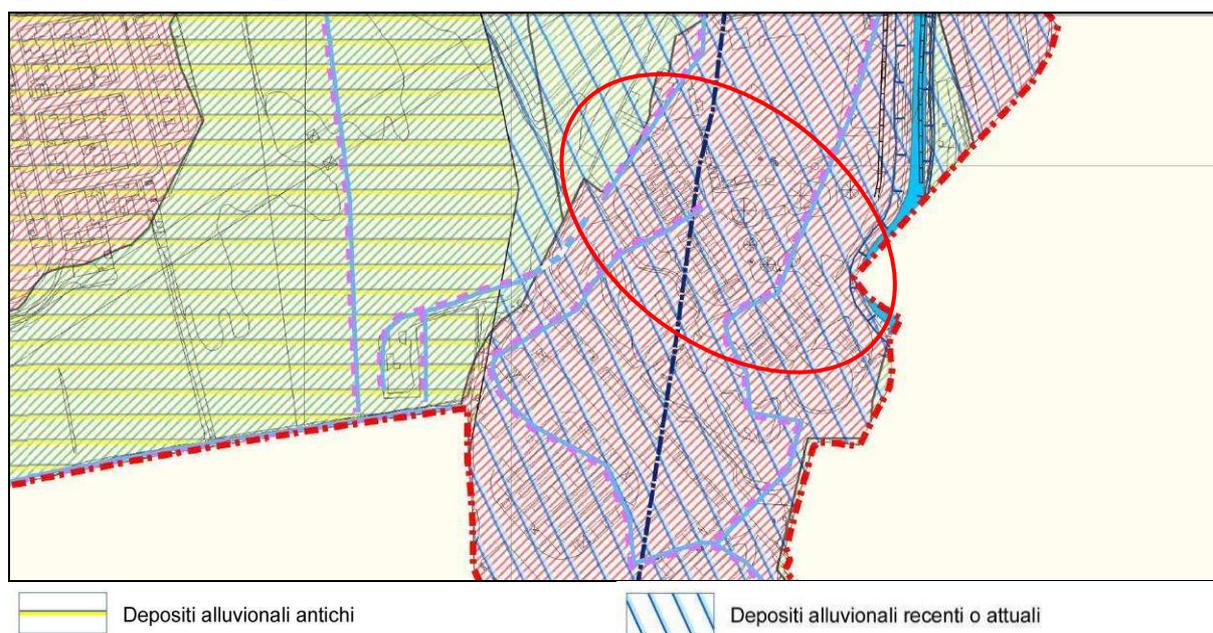


Figura 2 – Estratto della Carta Litologica del P.G.T. del comune di Sesto San Giovanni. In rosso l'area di indagini

Dal punto di vista idrogeologico l'area è interessata da depositi caratterizzati da una permeabilità medio-alta, con possibilità quindi di infiltrazione da parte di acque superficiali e meteoriche, che raggiungono le falde acquifere del sottosuolo qualora esse non siano sufficientemente protette e quando siano minacciate da fonti di inquinamento per scarichi industriali incontrollati.

La piezometria dedotta dal PGT del Comune di Sesto San Giovanni evidenzia una soggiacenza compresa tra 15 e 20 m nel settore sud-orientale del territorio e lungo il fiume Lambro con una direzione media di flusso NNE-SSW.

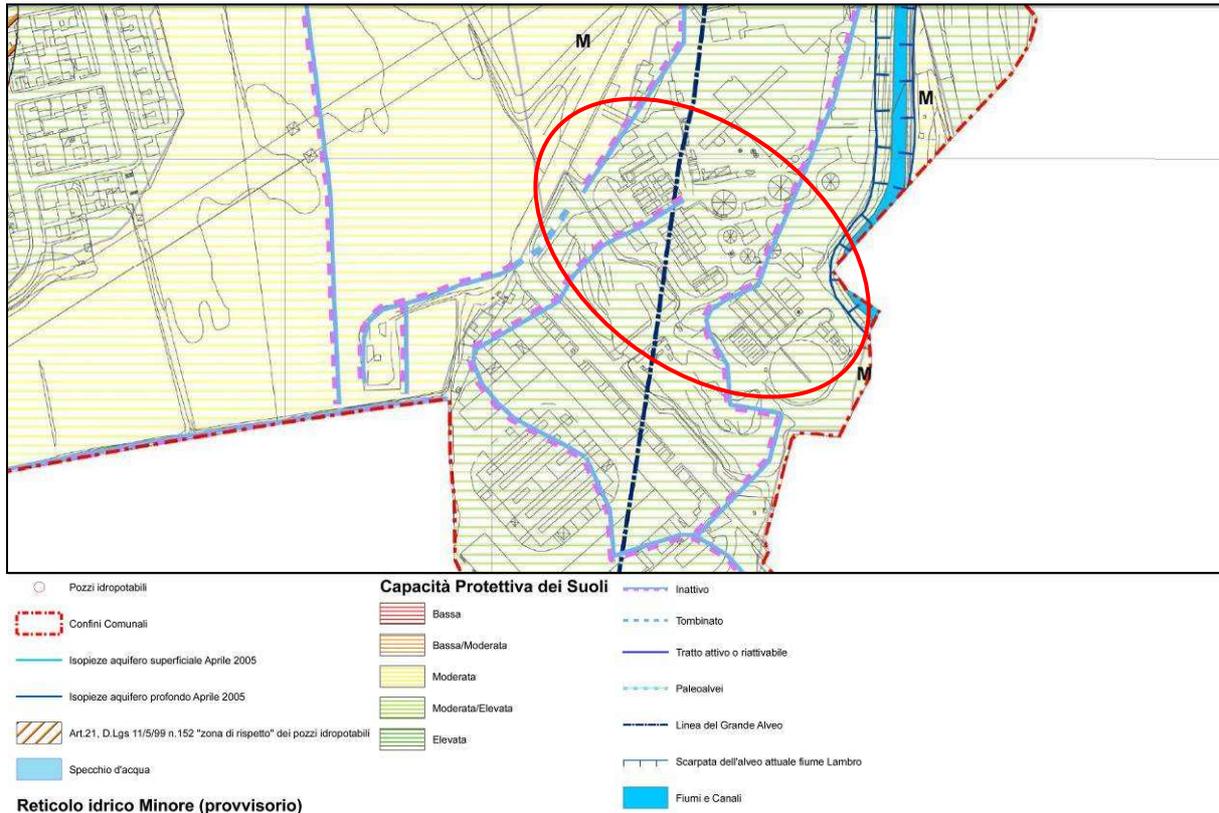


Figura 3 – Estratto della Carta Idrogeologica del P.G.T. del comune di Sesto San Giovanni. In rosso l'area di indagini

## 4 FATTIBILITA' GEOLOGICA DI PIANO E VINCOLI

Lo studio geologico a supporto del PGT del Comune di Sesto San Giovanni inquadra l'area di progetto in **Classe di Fattibilità 3**.

La figura seguente, tratta dal citato studio, mostra la classificazione di fattibilità geologica nell'intorno dell'area indagata e, di seguito, le problematiche/prescrizioni legate alla classe 3.

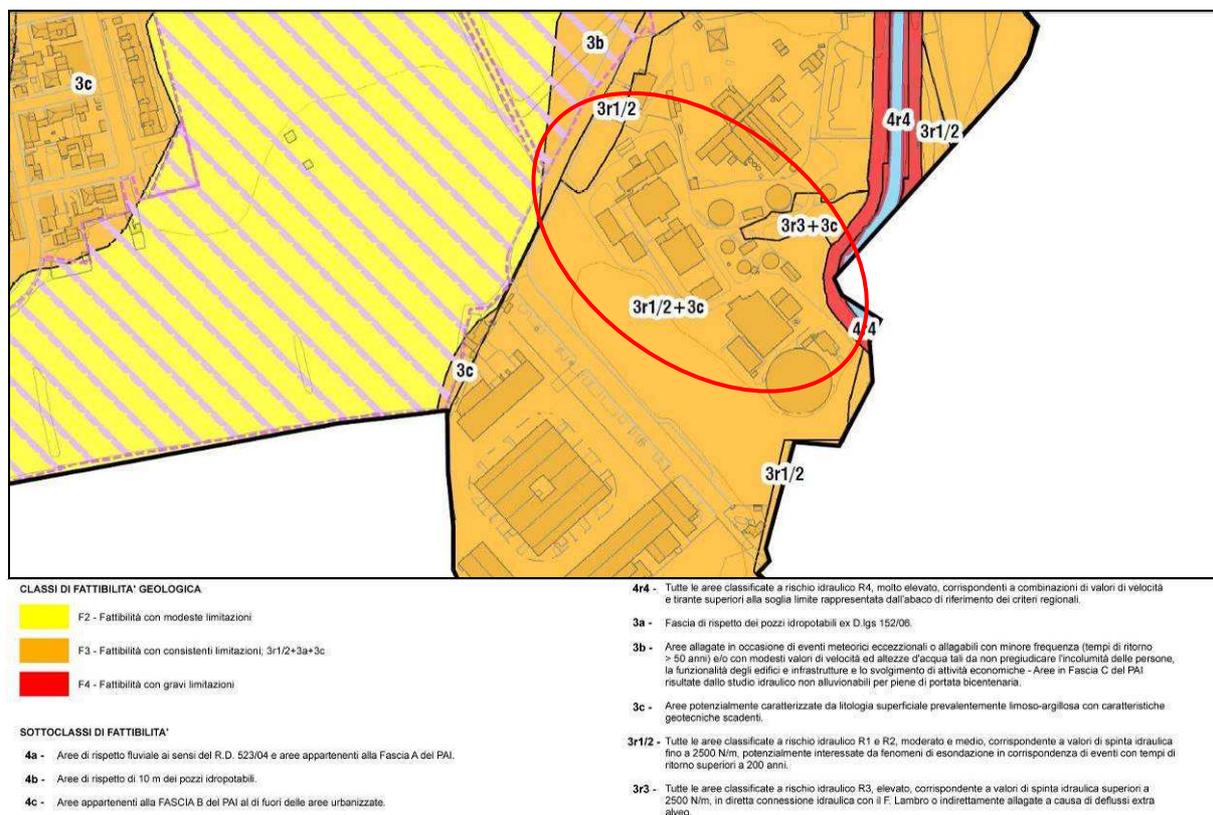


Figura 5 – Carta di Fattibilità del P.G.T. del comune di Sesto San Giovanni. In rosso l'area di indagini

### Descrizione

In questa classe ricadono le aree con condizioni di pericolosità serie che non possono in alcun modo essere trascurate in fase di modifica della destinazione d'uso dei terreni. L'utilizzo di queste zone è subordinato alla realizzazione di supplementi di indagine volti a meglio definire l'entità e la distribuzione dei fenomeni attraverso rilievi, prove in sito ed in laboratorio e ogni altra attività che possa consentire di precisare le idonee destinazioni, le volumetrie ammissibili e le tipologie costruttive più opportune. Gli studi dovranno inoltre definire gli interventi atti alla mitigazione del rischio e, dove possibile alla sua completa rimozione.

Per l'edificato esistente dovranno essere fornite indicazioni in merito alle indagini da seguire per la progettazione delle opere di difesa e per la sistemazione idrogeologica.

Potranno essere previsti sistemi di monitoraggio al fine di compiere previsioni sulla possibile evoluzione dei fenomeni prevedendone in tal modo gli effetti.

Sono state create quattro sottoclassi in funzione delle tipologie di fenomeno o di vincolo esistente:

- 3a – sono aree potenzialmente inquinate in cui sono state attivate le procedure di Bonifica ai sensi del D.lgs 152/06.
- 3b – Sono le aree interessate dalla fascia di rispetto delle captazioni ad uso idropotabile

- 3c – Sono le aree che sono state oggetto nel passato da esondazioni storiche del Fiume Lambro e le aree che ricadono in Fascia C del PAI
- 3d – Sono le aree che presentano in superficie materiali con caratteristiche geotecniche potenzialmente scadenti;
- 3r1/2 – Sono le aree classificate a rischio R1 e R2, moderato e medio, corrispondenti a valori di spinta idraulica fino a 2500 N7m, potenzialmente interessate da fenomeni di esondazione in corrispondenza di eventi con tempi di ritorno superiori a 200 anni.

### **Prescrizioni**

- nelle aree più acclivi, evitare opere estese continue e rigide, più vulnerabili a eventuali movimenti differenziali del terreno, inserendo giunti di separazione o giunti elastici che consentano l'adattamento dell'opera (ove compatibile con la sua funzionalità) ai eventuali cedimenti del terreno;
- preferire quindi, ove possibile, opere di forma compatta e ridotte dimensioni, per le quali sarà preferibile irrigidire la struttura, uniformando i cedimenti. Nelle ristrutturazioni e ampliamenti, evitare quindi legami rigidi tra vecchie e nuove strutture accostate;
- evitare opere che comportino la realizzazione di importanti scavi o accumuli di terreno e limitare i carichi imposti, bilanciando i volumi sbancati ed i riporti. Andrà quindi verificato che l'intervento operato non muti sostanzialmente la situazione geostatica della zona;
- procedere agli scavi di una certa importanza per campioni di pochi metri;
- richiedere particolare attenzione nel controllo delle modalità di esecuzione dei lavori.

Secondo quanto sopra esposto l'area in esame ricade all'interno della Classe di Fattibilità 3 sottoclasse 3r1/2+3c.

## 5 INDAGINI ESEGUITE

Il modello geologico-tecnico dell'area in esame è stato esaurientemente ricostruito mediante i risultati ottenuti dalle indagini eseguite in data 21/09/2018.

Di seguito si riporta la descrizione ed i risultati delle indagini eseguite, la cui ubicazione è riportata nella figura seguente.

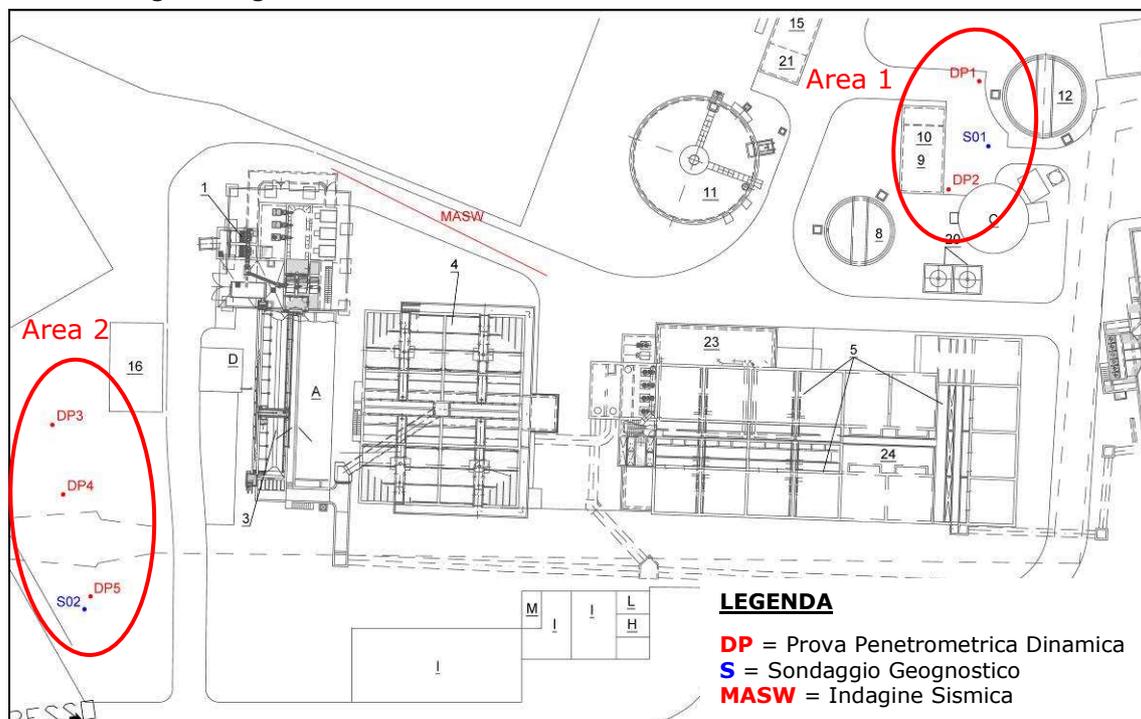


Figura 7 - Ubicazione delle indagini eseguite

L'esecuzione delle indagini è stata preceduta da una verifica con georadar, finalizzata all'individuazione di eventuali sottoservizi in corrispondenza dei punti indagine (sondaggi e prove penetrometriche)

## 5.1 SONDAGGI GEOGNOSTICI

Il sondaggio geognostico a carotaggio continuo è stato effettuato in data 21 settembre 2018, con l'utilizzo di una sonda a rotazione dotata di una torre di spinta alta 6 m, su cui è stata montata una testa di rotazione a velocità regolabile, in grado di imprimere un movimento rotatorio ad una batteria di aste della lunghezza di 1.5 m ciascuna. Il carotaggio è stato eseguito con carotiere semplice da  $\varnothing = 127$  mm e tubazioni metalliche di rivestimento da  $\varnothing = 152$  mm (Figura 9) ed ha raggiunto la profondità di 10,0 m da p.c..



Figura 9 – Sonda utilizzata per la perforazione del sondaggio geognostico.

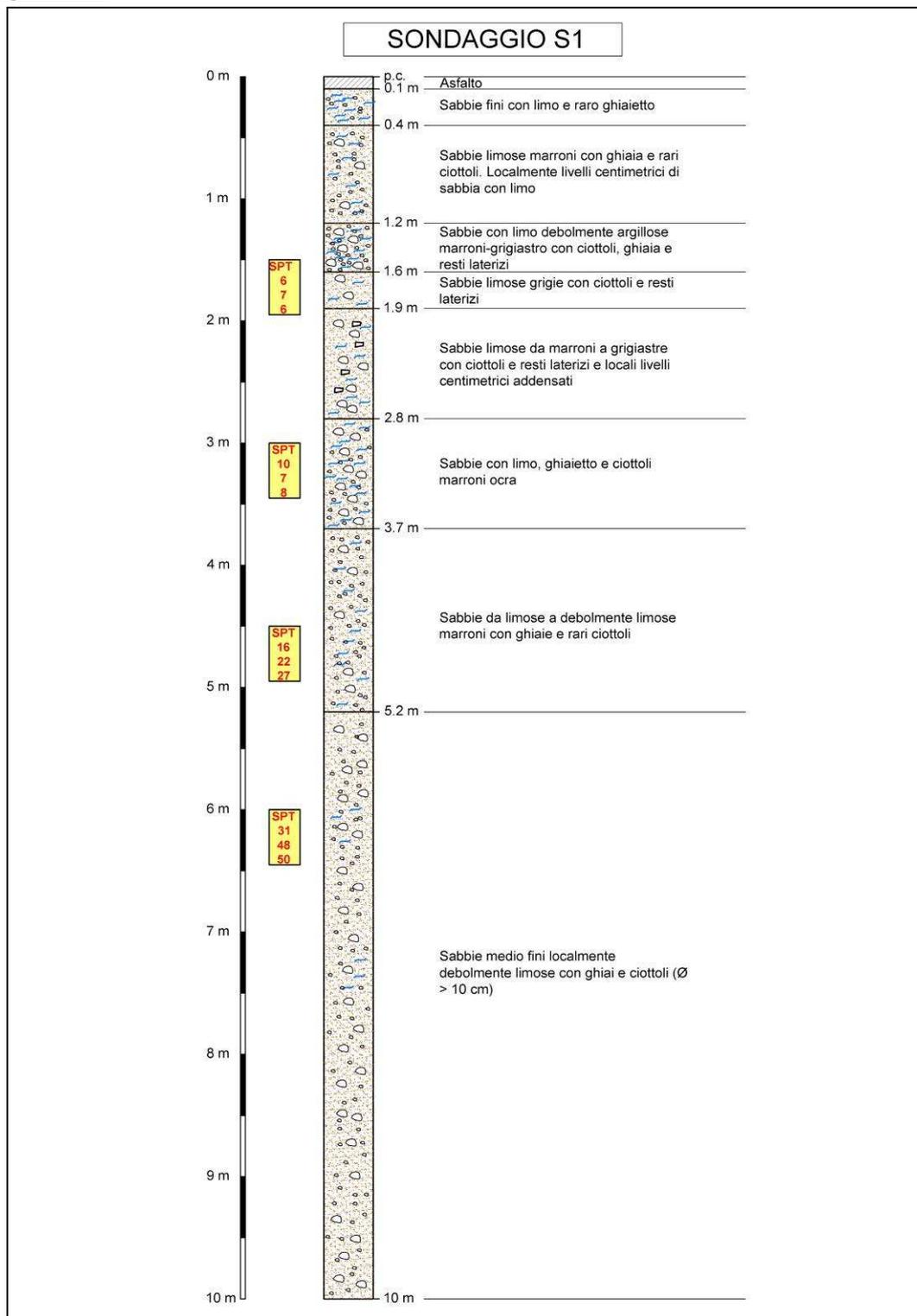
Le carote rimaneggiate ottenute sono state adeguatamente sistemate in apposite cassette catalogatrici e regolarmente fotografate alla fine della perforazione.

- N. 4 prove SPT per verticale di sondaggio per la definizione dei principali parametri geotecnici dei terreni attraversati.

### 5.1.1 Risultati Stratigrafici

Dall'analisi litologica delle carote ottenute dal sondaggio è stato possibile definire le seguenti stratigrafie:

#### Sondaggio S01



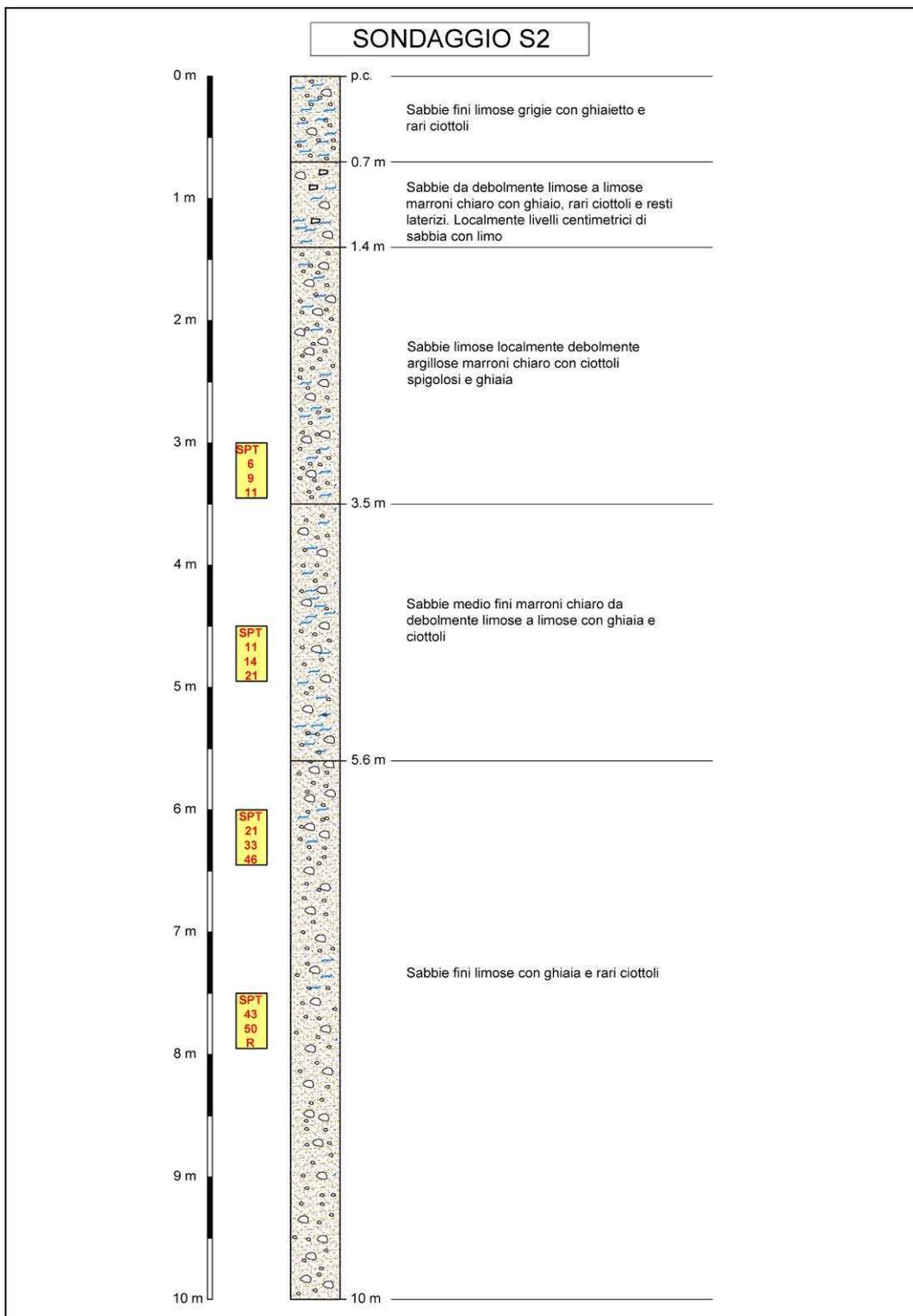


cassetta 1: profondità 0 - 5 m



cassetta 2: profondità 5 - 10 m

**Sondaggio S02**





cassetta 1: profondità 0 - 5 m



cassetta 2: profondità 5 - 10 m

### 5.1.2 Prove SPT

La prova SPT (Standard Penetration Test) consiste nell'infiggere a percussione nel terreno, mediante un apposito maglio e per un dato avanzamento, uno speciale campionatore o una punta conica (a seconda della granulometria del materiale testato), determinando così la resistenza meccanica del terreno alla penetrazione.

Per la descrizione dell'attrezzatura e della prova si rimanda alle raccomandazioni dell'Associazione Geotecnica Italiana (Raccomandazioni per le Indagini Geotecniche, 1977) e dell'Associazione Geotecnica Internazionale (ISSMFE). In totale sono state eseguite 4 prove SPT lungo la verticale del sondaggio eseguito.

La tabella seguente riporta le profondità di esecuzione delle prove ed i relativi esiti.

<b>S01</b>	<b>Prof. (m da p.c.)</b>	<b>N1</b>	<b>N2</b>	<b>N3</b>	<b>NSPT<sub>30</sub></b>
<b>SPT1</b>	1.5	6	7	6	<b>13</b>
<b>SPT2</b>	3.0	10	7	8	<b>15</b>
<b>SPT3</b>	4.5	16	22	27	<b>49</b>
<b>SPT4</b>	6.0	31	48	50	<b>98</b>

<b>S02</b>	<b>Prof. (m da p.c.)</b>	<b>N1</b>	<b>N2</b>	<b>N3</b>	<b>NSPT<sub>30</sub></b>
<b>SPT1</b>	3.0	6	9	11	<b>20</b>
<b>SPT2</b>	4.5	11	14	21	<b>35</b>
<b>SPT3</b>	6.0	21	33	46	<b>79</b>
<b>SPT4</b>	7.5	43	50	Rifiuto	<b>Rifiuto</b>

I valori ottenuti dalle prove SPT rispecchiano le caratteristiche dei terreni attraversati e confermano sostanzialmente il quadro litotecnico di riferimento risultante dalle prove penetrometriche eseguite.

## 5.2 PROVE PENETROMETRICHE DINAMICHE

Per la caratterizzazione geotecnica del terreno sono state eseguite, sempre in data 12 settembre 2018, n. 5 prove penetrometriche dinamiche, n.2 in Area 1 e n.3 in Area 2, con penetrometro super-pesante (DPSH) spinte sino alla profondità di 10.0 m da p.c., la cui ubicazione è riportata in figura 7.

### 5.2.1 Metodologia Impiegata

Le prove penetrometriche dinamiche sono state condotte tramite SCPT (Standard Conic Penetration Test) utilizzando una attrezzatura DPSH (Super Heavy), avente le seguenti caratteristiche tecniche:

<i>Peso massa battente</i>	$M = 73.00 \text{ kg}$
<i>Altezza caduta libera</i>	$H = 0.75 \text{ m}$
<i>Peso sistema battuta</i>	$M_s = 63 \text{ kg}$
<i>Diametro punta conica</i>	$D = 51.00 \text{ mm}$
<i>Area base punta conica</i>	$A = 20.43 \text{ cm}^2$
<i>Angolo apertura punta</i>	$\alpha = 60^\circ$
<i>Lunghezza delle aste</i>	$L_a = 0.90 \text{ m}$
<i>Peso aste per metro</i>	$M_a = 6.31 \text{ kg}$
<i>Profondità giunzione 1<sup>a</sup> asta</i>	$P_1 = 0.30 \text{ m}$
<i>Avanzamento punta</i>	$\delta = 0.30 \text{ m}$
<i>Numero di colpi per punta</i>	$N = N=(30)$
<i>Rivestimento / Fanghi</i>	No
<i>Energia specifica per colpo</i>	$Q = 8.93 \text{ kg/ cm}^2$

Tutte le indagini sono state eseguite tramite l'infissione di aste di lunghezza pari a 90 cm con conteggio dei colpi di maglio necessari all'infissione di progressive di 30cm (DPSH). Il numero di colpi è in stretta relazione con la resistenza all'avanzamento della punta e delle aste, ossia con lo stato di addensamento dei terreni attraversati e con la litologia.

I dati di campagna sono riportati su diagrammi penetrometrici che mettono in relazione il numero di colpi (NSCPT) con i metri di avanzamento. Interpretando questi diagrammi vengono individuati gli strati che assumono omogenea resistenza all'avanzamento delle aste.

Il numero di colpi NSCPT viene quindi moltiplicato per un fattore necessario per standardizzare i valori secondo la normativa NSPT (Standard Penetration Test).

Dai valori di NSPT, tramite software dedicato, si ricavano i parametri geotecnici propri del materiale e del loro stato tensionale (Densità relativa, Angolo di attrito, ecc.).



Figura 9 – Penetrometro super-pesante (DPSH) Pagani utilizzato per le indagini. A: DP1; B: DP2; C: DP3; D: DP4



Figura 9 – Penetrometro super-pesante (DPSH) Pagani utilizzato per le indagini. Prova DP5.

### 5.2.2 Esiti delle prove

Di seguito si riportano i diagrammi penetrometrici delle prove eseguite suddivisi tra Area 1 e Area 2.

#### AREA 1

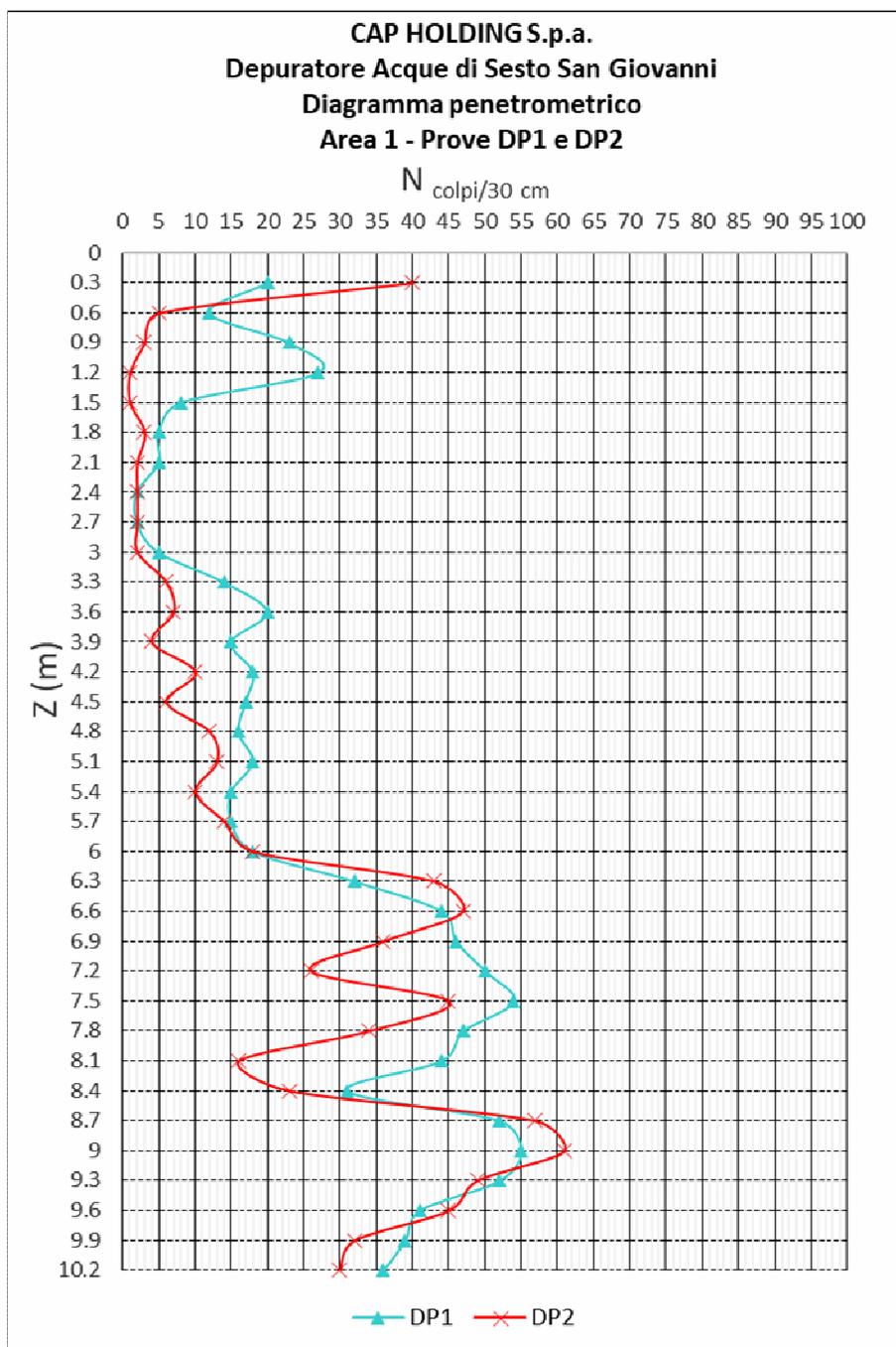


Figura 9 – Grafico riassuntivo delle prove penetrometriche eseguite in Area 1

L'analisi dei diagrammi penetrometrici relativi alle prove eseguite nell'Area 1 (DP1 e DP2) ha evidenziato la presenza di tre livelli contraddistinti da caratteristiche stratigrafiche e litotecniche leggermente differenti tra loro ma sostanzialmente omogenei per entrambe le prove eseguite.

La tabella seguente riassume le profondità dei livelli litotecnici individuati nelle diverse prove:

	DP1	DP2
<b>Livello 1</b>	0.3-3.0	0.3-3.3
<b>Livello 2</b>	3.0-6.0	3.3-6.0
<b>Livello 3</b>	6.0-10.2	6.0-10.2

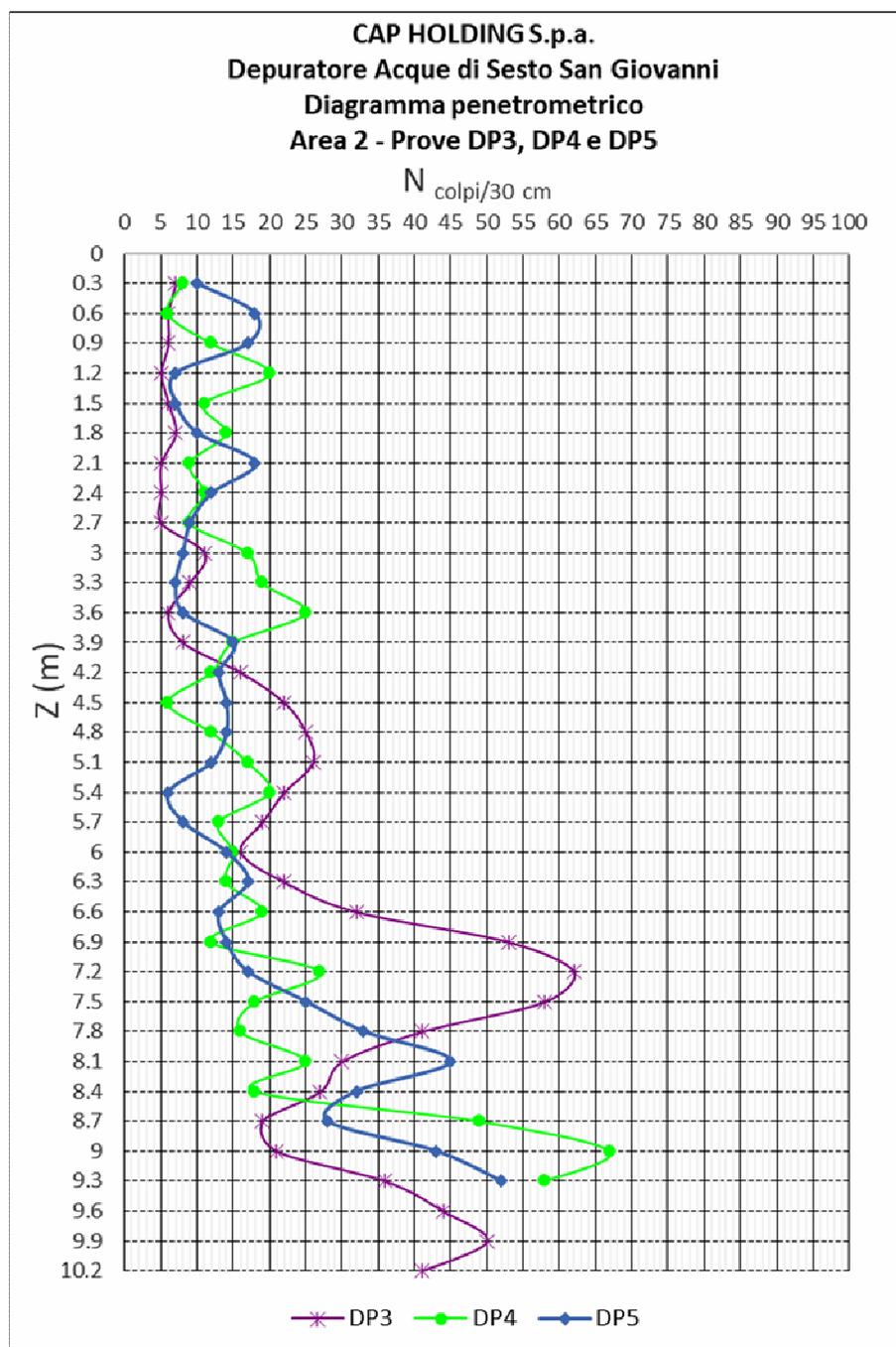
**AREA 2**

Figura 9 – Grafico riassuntivo delle prove penetrometriche eseguite in Area 2

L'analisi dei diagrammi penetrometrici relativi alle prove eseguite nell'Area 1 (DP3, DP4 e DP5) ha evidenziato la presenza di due livelli contraddistinti da caratteristiche stratigrafiche e litotecniche leggermente differenti tra loro ma sostanzialmente omogenei per tutte le prove eseguite.

La tabella seguente riassume le profondità dei livelli litotecnici individuati nelle diverse prove:

	<b>DP3</b>	<b>DP4</b>	<b>DP52</b>
<b>Livello 1</b>	0.3-6.0	0.3-6.9	0.3-7.2
<b>Livello 2</b>	6.0-10.2	6.9-10.2	7.2-10.2

### 5.3 STRATIGRAFIA LITOTECNICA

Nel presente capitolo, sempre divisi per area d'indagine, vengono riassunti e presentati gli esiti geotecnici e geognostici delle indagini effettuate (sondaggi e prove penetrometriche).

Nello specifico nella tabella seguente sono presentati i dati relativi alla natura litologica (desunta dalla stratigrafia dei sondaggi illustrate nel dettaglio nei capitoli precedenti) e alla geometria (quote di inizio e di fine) dei livelli litotecnici incontrati durante le prove.

#### AREA 1

<b>Livello</b>	<b>Litologia</b>	<b>Profondità da p.c. (m)</b>
<b>1</b>	Sabbie fini e medie da debolmente limose a limose con ghiaia e ciottoli. Presenza di resti laterizi.	0.3-3.0/3.3
<b>2</b>	Sabbie da limose localmente a con limo con ghiaia e rari ciottoli.	3.0/3.3-6.0
<b>3</b>	Sabbie fini debolmente limose con ghiaia e ciottoli.	6.0-10.2

#### AREA 2

<b>Livello</b>	<b>Litologia</b>	<b>Profondità da p.c. (m)</b>
<b>1</b>	Sabbie fini e medie da debolmente limose a limose con ghiaia e ciottoli. Presenza di resti laterizi.	0.3-6.0/7.2
<b>2</b>	Sabbie fini limose con ghiaia e rari ciottoli.	6.0/7.2-10.2

Nelle tabelle seguenti sono presentati i valori medi dei principali parametri geotecnici ricavati in via conservativa considerando i valori più bassi tra quelli medi di ogni prova.

**AREA 1**

PARAMETRI TERRENO							
Livello	N DP	N SPT	$\gamma_n$	$\gamma_{sat}$	Dr	$\phi'$	Qualità Geotecnica
Livello 1	3.4	5.2	16.0	17.5	29.7	22°-24°	Scarsa/Mediocre
Livello 2	13.3	20.1	19.0	20.5	58.5	30°-32°	Discreta
Livello 3	41.7	62.9	72.2	73.7	103.6	38°-40°	Buona

**AREA 2**

PARAMETRI TERRENO							
Livello	N DP	N SPT	$\gamma_n$	$\gamma_{sat}$	Dr	$\phi'$	Qualità Geotecnica
Livello 1	12.4	18.8	18.9	20.4	56.6	30°-32°	Discreta
Livello 2	36.6	55.3	49.7	51.2	97.1	38°-40°	Buona

## 5.4 INDAGINE SISMICA M.A.S.W.

Di seguito si illustrano le elaborazioni ed i risultati ottenuti dall'esecuzione di n.1 profilo sismico con la metodologia MASW.

La campagna di indagine è stata eseguita nella giornata del 21 settembre 2018.

Scopo dell'indagine è quello di ricostruire, per l'area in oggetto, l'andamento della velocità delle onde sismiche di taglio con la profondità ( $V_s$ -z).

Il modello sismico monodimensionale costituisce infatti l'aspetto principale sia nella stima degli effetti sismici di sito (o risposta sismica locale - RSL) che nella definizione dell'azione sismica di progetto, in quanto consente di conoscere l'incidenza delle locali condizioni stratigrafiche nella modifica della pericolosità sismica di base (definizione della categoria di sottosuolo).

Ciò permette una corretta progettazione strutturale in relazione alle condizioni sito-specifiche, garantendo un adeguato livello di protezione antisismica delle costruzioni (O.P.C.M. 3274 e s.m.i; D.M. 14.01.2008; D.g.r. IX/2616/2011; D.g.r.X/5001/2016).

Nei paragrafi successivi vengono descritte le modalità d'esecuzione delle misure sperimentali e l'interpretazione geofisica delle stesse. Nella figura che segue si riporta l'ubicazione della prospezione MASW effettuata.

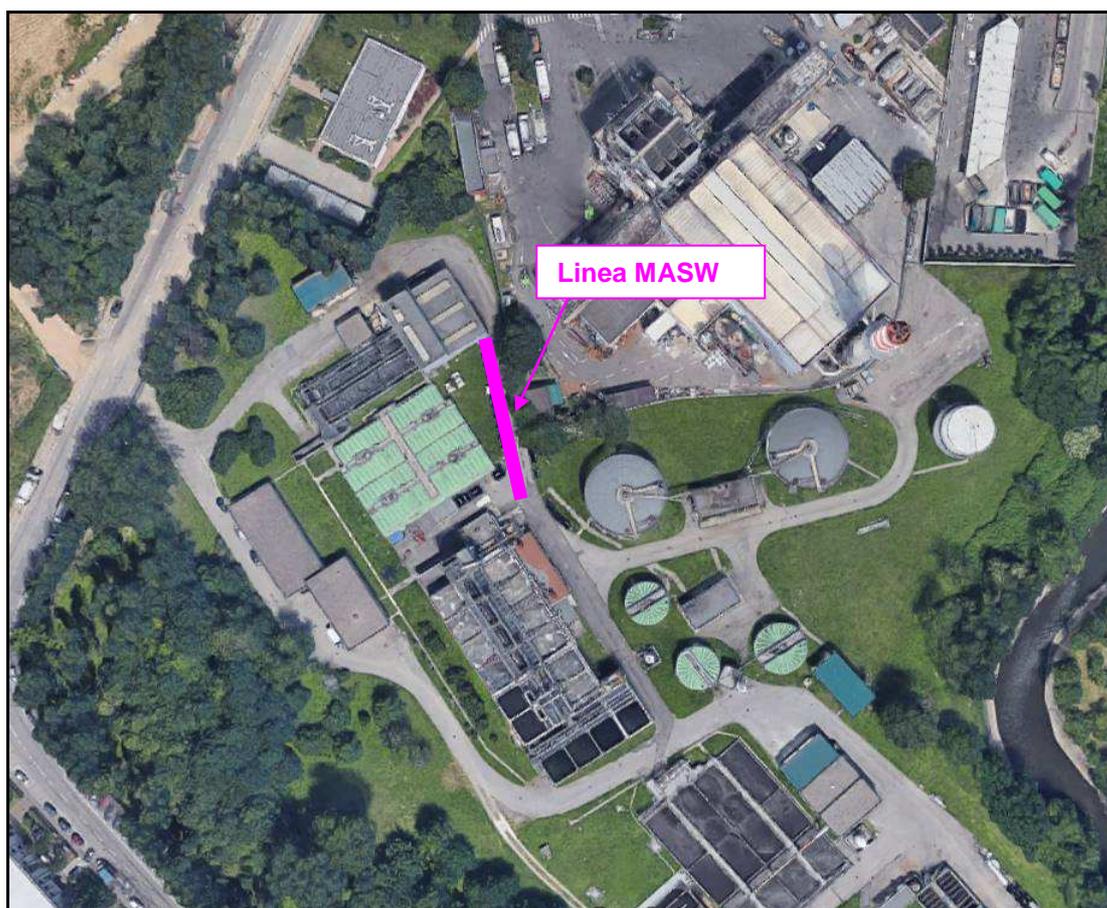


Figura 11 – Ubicazione dell'indagine M.A.S.W. eseguita.

#### 5.4.1 Indagine geofisica MASW: metodologia e strumentazione

La prova MASW, messa a punto nel 1999 da ricercatori del *Kansas Geological Survey* (Park C.B. et al., 1999) permette di determinare in modo dettagliato l'andamento della velocità delle onde sismiche di taglio (o onde S) in funzione della profondità attraverso lo studio della propagazione delle onde superficiali di Rayleigh.

Il metodo di indagine MASW si distingue in "attivo" e "passivo" (Zywicki D.J., 1999; Park C.B., Miller R.D., 2006; Roma V., 2006):

- 1) Nel "*metodo attivo*" le onde superficiali sono prodotte da una sorgente impulsiva disposta a piano campagna e vengono registrate da uno stendimento lineare composto da numerosi ricevitori posti a breve distanza (distanza intergeofonica).
- 2) Nel "*metodo passivo*" lo stendimento presenta le stesse caratteristiche geometriche del metodo attivo ma i ricevitori non registrano le onde superficiali prodotte da una sorgente impulsiva, bensì il rumore di fondo (detto anche "microtremori") prodotto da sorgenti naturali (vento) e antropiche (traffico, attività industriali).

Le due tecniche indagano bande spettrali differenti: mentre il metodo attivo consente di ottenere una curva di dispersione nel range di frequenza compreso tra 10 e 40 Hz e fornisce informazioni sulla parte più superficiale di sottosuolo (fino a circa 20-30 m di profondità in funzione della rigidità del suolo), il metodo passivo consente di determinare una curva di dispersione nella banda di frequenza tra 4 e 20 Hz e fornisce informazioni sugli strati più profondi (generalmente al di sotto dei 30 m).

La combinazione delle due tecniche consente di ottenere uno spettro completo nella banda di frequenza comprese tra 4 e 40 Hz e permette una dettagliata ricostruzione dell'andamento della velocità delle onde di taglio fino a circa 30-40 m di profondità (sempre in funzione della rigidità degli strati).

L'analisi delle onde superficiali è stata eseguita utilizzando la strumentazione classica per la prospezione sismica a rifrazione disposta sul terreno secondo un array lineare da 24 geofoni con spaziatura pari a 1.5 m (la configurazione geometrica adottata è stata dettata sia dalle condizioni logistiche che dalla necessità di ricostruire al meglio lo spettro di velocità delle onde superficiali di Rayleigh).

Per ottenere una buona risoluzione in termini di frequenza, oltre ad utilizzare geofoni da 4.5 Hz, è stato utilizzato un sismografo a 24 bit.

Nell'esecuzione della prova MASW attiva è stato utilizzato come sistema di energizzazione una mazza di 8 Kg battente su piattello metallico. Per aumentare il rapporto segnale/rumore si è proceduto alla somma di più energizzazioni (processo di *stacking*).

La sorgente è stata posta ad una distanza compresa tra 6 e 12 m dal primo geofono effettuando più energizzazioni in punti differenti ("*Optimum Field Parameters of an MASW Survey*", Park C.B. et al., 2005; Dal Moro G., 2008; Dal Moro G., 2012).

Terminata l'indagine attiva, con la stessa configurazione geometrica si è passati alla registrazione dei microtremori (MASW passiva o ReMi) acquisendo in totale 10 registrazioni di rumore, ciascuna della lunghezza di 30 s.

Di seguito si riassumono le principali caratteristiche della strumentazione utilizzata per l'esecuzione della prova MASW attiva e passiva:

n°	Strumentazione	Caratteristiche
1	Unità di acquisizione	sismografo GEOMETRICS "GEODE" a 24 bit
24	Geofoni verticali	"Geospace" con $f_0 = 4.5$ Hz
1	Cavo sismico	L = 60 m
1	Sorgente	Mazza battente su piattello metallico



Figura 12 – Vista dello stendimento M.A.S.W. effettuato

#### 5.4.2 Elaborazione dati

I dati sperimentali, acquisiti in formato SEG-2, sono stati trasferiti su PC e convertiti in un formato compatibile (KGS format file) per l'interpretazione attraverso l'utilizzo di uno specifico programma di elaborazione (*SurfSeis* 5.0 della Kansas University, Park C. B., 2016). Tale programma permette di elaborare i dati acquisiti sia con il metodo attivo che con quello passivo.

L'analisi consiste nella trasformazione dei segnali registrati in uno spettro bidimensionale "phase velocity-frequency ( $c-f$ )" che analizza l'energia di propagazione delle onde superficiali lungo la linea sismica.

Gli spettri bidimensionali ottenuti dalle registrazioni con il metodo attivo e con quello passivo, elaborati in fasi separate, vengono successivamente combinati in modo da ottenere uno spettro unico.

In questo grafico è possibile distinguere il "modo fondamentale" delle onde di superficie, in quanto le onde di Rayleigh presentano un carattere marcatamente dispersivo che le differenzia da altri tipi di onde (onde riflesse, onde rifratte, onde multiple).

Inoltre, la combinazione dei due metodi MASW consente di individuare il "modo fondamentale" delle onde di superficie nel campo di frequenze compreso tra i 4 e i 40 Hz e di ottenere informazioni sia "superficiali" che "profonde".

Sullo spettro di frequenza viene eseguito un "picking" attribuendo ad un certo numero di punti una o più velocità di fase per un determinato numero di frequenze (si veda la curva di dispersione riportata di seguito).

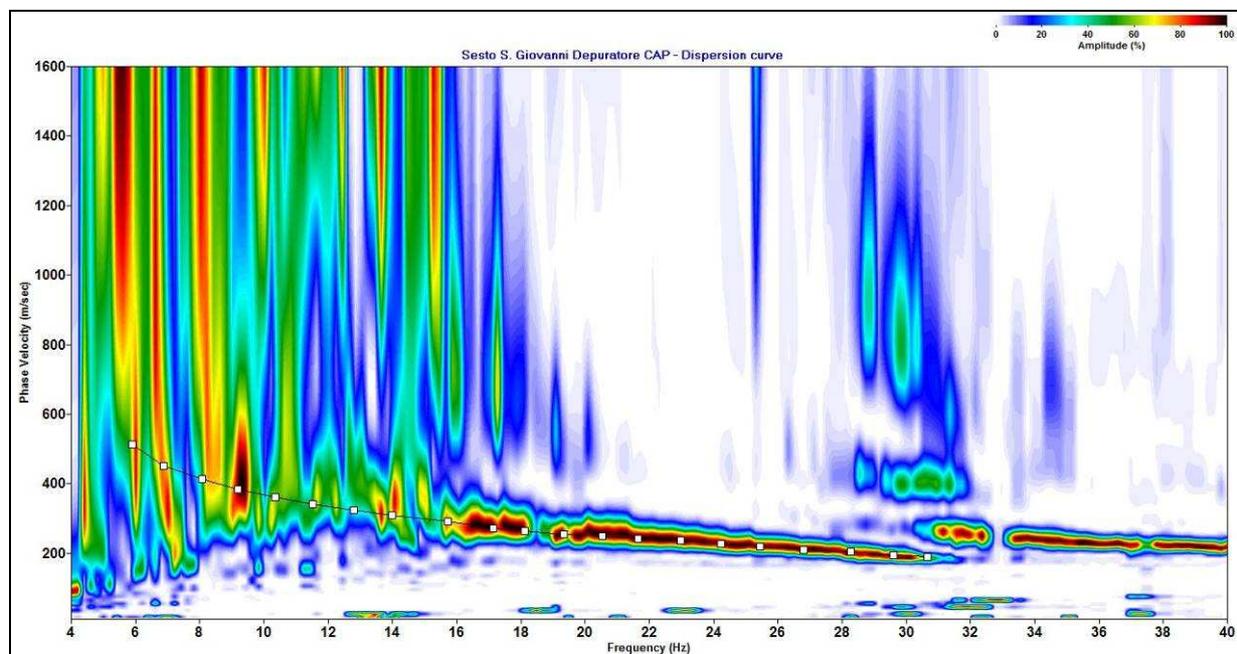


Figura 13 – Curva di dispersione e picking

Tali valori vengono successivamente riportati su un diagramma periodo-velocità di fase per l'analisi della curva di dispersione e l'ottimizzazione di un modello interpretativo.

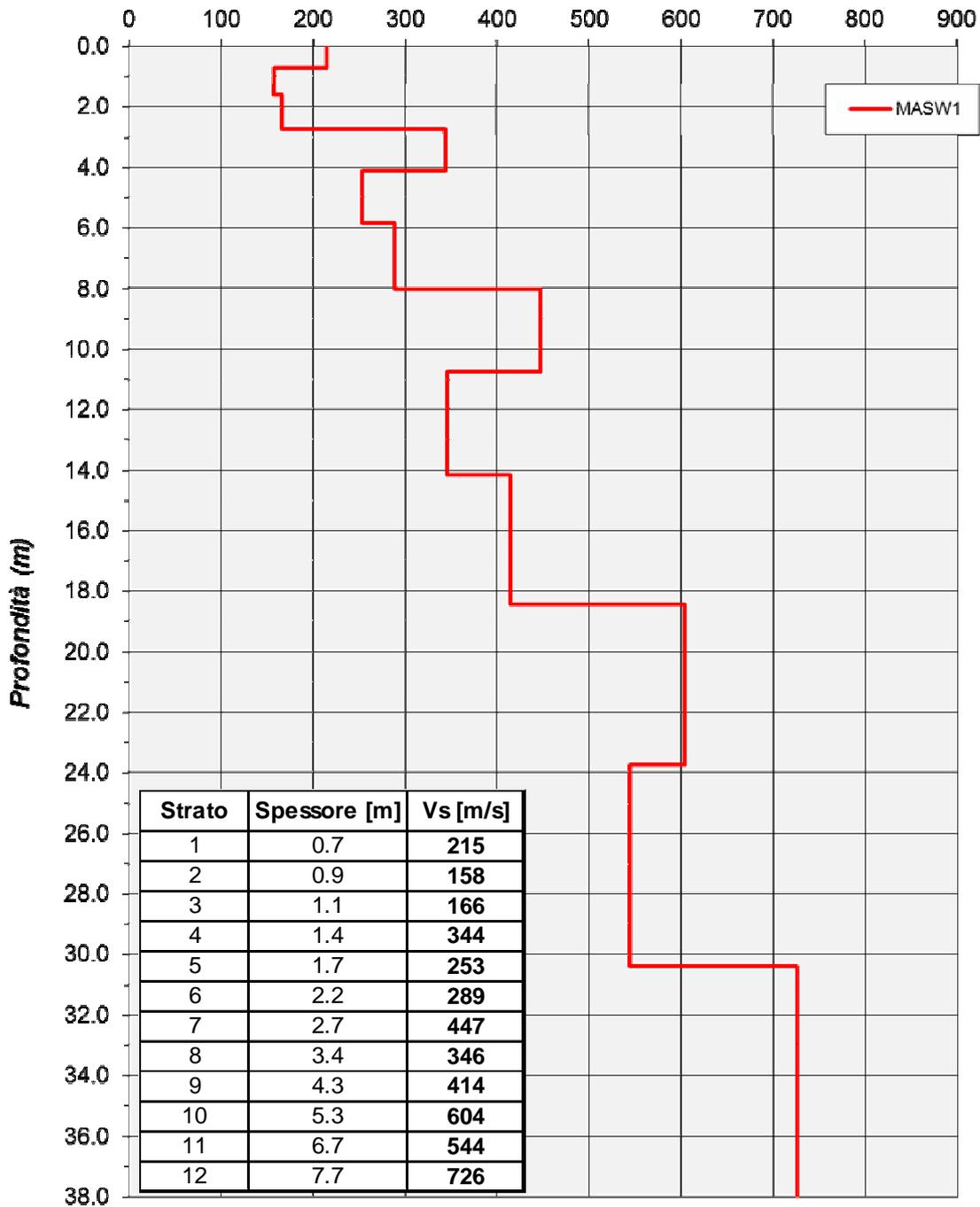
Variando la geometria del modello di partenza ed i valori di velocità delle onde S si modifica automaticamente la curva calcolata di dispersione fino a conseguire un buon "fitting" con i valori sperimentali.

L'analisi dello spettro bidimensionale c-f consente in questo modo di ricostruire un modello sismico monodimensionale del sottosuolo, il quale risulta costituito dall'andamento della velocità delle onde di taglio Vs in funzione della profondità.

Dall'inversione della curva di dispersione (relativa al "modo fondamentale" delle onde superficiali di Rayleigh) si ottiene il seguente modello medio di velocità delle onde sismiche di taglio con la profondità, rappresentativo dell'area investigata:

**Shear-Wave Velocity Profile from Surface waves inversion**

Velocità onde S (m/sec)



**5.4.3 Calcolo delle  $V_{S,30}$  e definizione della categoria di sottosuolo – NTC18**

A partire dal modello sismico monodimensionale ricostruito attraverso l'indagine geofisica effettuata, è possibile calcolare il valore della  $V_{S,eq}$ , che rappresenta la velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio fino alla profondità del bedrock sismico H (substrato con  $V_S > 800$  m/s). Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio è definita dal parametro  $V_{S,30}$  ottenuto ponendo  $H=30$  m nella seguente equazione (D.M. 17.01.2018 "Aggiornamento delle norme tecniche per le costruzioni"):

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

dove  $h_i$  e  $V_{S,i}$  indicano lo spessore (in m) e la velocità delle onde di taglio dello strato i-esimo (fino al bedrock sismico o a 30 m dalla quota di imposta delle fondazioni), N il numero di strati e H la profondità del substrato con  $V_S > 800$  m/s.

Utilizzando la formula sopra riportata si ottengono i seguenti valori (si è assunta come quota di calcolo [q.r.] il piano di esecuzione dello stendimento sismico e poiché il bedrock sismico è posto oltre i 30 m dal piano fondazionale, ai sensi delle NTC18 il valore di  $V_{S,eq}$  coincide con il valore di  $V_{S,30}$ ):

Profondità di posa delle fondazioni da q.r. [m]	$V_{S,eq} = V_{S,30}$ [m/s]	Categoria sottosuolo
0.0	372.0	B
1.0	389.1	B
2.0	415.2	B

<b>Categoria</b> <i>D.M. 17.01.2018</i>	<b>Descrizione</b>
<b>A</b>	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m</i>
<b>B</b>	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.</i>
<b>C</b>	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente 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.</i>
<b>D</b>	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente 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 100 e 180 m/s.</i>
<b>E</b>	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.</i>

#### 5.4.4 Analisi del potenziale di liquefazione dei terreni di fondazione

La liquefazione è un fenomeno associato alla perdita di resistenza al taglio o a un accumulo di deformazioni plastiche in terreni saturi, prevalentemente sabbiosi, sollecitati da azioni dinamiche (terremoti) che agiscono in condizioni non drenate.

L'analisi della suscettibilità alla liquefazione di un dato sito dipende da:

- caratteristiche dell'azione sismica (intensità e durata);
- proprietà geotecniche dei terreni;
- caratteristiche litologiche dei terreni e profondità della falda.

La liquefazione di un deposito è dunque il risultato dell'effetto combinato di due principali categorie di fattori: le condizioni del terreno (fattore predisponente) e la sismicità (fattore scatenante).

Ai sensi delle NTC18 (Cap. 7.11.3.4.2) la verifica della liquefazione può essere omessa qualora si manifesti almeno una delle seguenti condizioni:

1. Accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizione di campo libero)  $< 0.10g$ ;
2. Profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna;
3. Depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata  $(N_1)_{60} > 30$  oppure  $q_{c1n} > 180$ ;

Per l'area in esame risulta:

- ✓ Ubicazione sito: ED50 Lat 45.500141 - Long 9.089424;
- ✓ Accelerazione massima orizzontale  $a_{max} = 0.054 - 0.060g$  ( $a_{max} = a_g * S$  - per SLV categoria sottosuolo B, categoria topografica T1,  $V_R = 50$  anni e  $V_R = 75$  anni);

Poiché il valore di  $a_{max}$  risulta inferiore a  $0.10g$  (condizione di esclusione prevista dalle NTC18), si può assumere che **i terreni che costituiscono l'area in esame non sono soggetti a fenomeni di liquefazione in condizioni sismiche.**

## 6 CONCLUSIONI

Alla luce di quanto riportato nelle sezioni precedenti che illustrano gli esiti delle indagini effettuate si possono esporre le seguenti considerazioni riassuntive e conclusive:

- L'area in studio è ubicata all'interno dell'impianto di trattamento acque di Via Manin a Sesto San Giovanni (MI).
- Si tratta di un settore caratterizzato da depositi sciolti appartenenti all'Alluvium costituiti prevalentemente da ghiaie e sabbie.
- Dal punto di vista geomorfologico l'area in esame si presenta stabile e priva di processi geomorfici attivi o potenziali.
- Il sottosuolo del sedime di progetto, fino ai 10 m da p.c. è prevalentemente costituito da una sequenza di depositi sabbiosi. Di seguito è riportata una stratigrafia schematica del primo sottosuolo ricavato dal sondaggio geognostico.

profondità (m)	descrizione
0.0 - 0.7	Sabbie fini da limose a con limo con ghiaietto, rari ciottoli e locali resti laterizi
0.7 - 3.7	Sabbie da debolmente limose a limose con ghiaia, ciottoli e resti lateritici.
3.7 - 5.6	Sabbie da limose a debolmente limose marroni con ghiaie e rari ciottoli
5.6 - 10.0	Sabbie medio fini localmente debolmente limose con ghiaia e ciottoli

- L'esecuzione di specifiche indagini geotecniche in sito, costituite n. 5 prove penetrometriche DPSH, di cui n. 2 in Area 1 e n. 3 in Area 2, ha permesso di caratterizzare dal punto di vista geotecnico i terreni oggetto di indagine (fino ad una profondità di 10 m da p.c.). Le tabelle seguenti riassumono gli esiti delle interpretazioni delle prove SPT e delle prove penetrometriche DPSH precedentemente descritte per i differenti livelli litotecnici definiti:

### AREA 1

PARAMETRI TERRENO							
Livello	N DP	N SPT	$\gamma_n$	$\gamma_{sat}$	Dr	$\phi'$	Qualità Geotecnica
Livello 1	3.4	5.2	16.0	17.5	29.7	22°-24°	Scarsa/Mediocre
Livello 2	13.3	20.1	19.0	20.5	58.5	30°-32°	Discreta
Livello 3	41.7	62.9	72.2	73.7	103.6	38°-40°	Buona

### AREA 2

PARAMETRI TERRENO							
Livello	N DP	N SPT	$\gamma_n$	$\gamma_{sat}$	Dr	$\phi'$	Qualità Geotecnica
Livello 1	12.4	18.8	18.9	20.4	56.6	30°-32°	Discreta

Livello 2	36.6	55.3	49.7	51.2	97.1	38°-40°	Buona
-----------	------	------	------	------	------	---------	-------

- E' stata effettuata una indagine sismica di tipo MASW che ha individuato la **Categoria di Sottosuolo B** (Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.). I terreni che costituiscono l'area in esame non sono soggetti a fenomeni di liquefazione in condizioni sismiche.

Varese, 09/10/2018

Dott. Geol. Davide Fantoni

