

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO PER LA  
 PRODUZIONE DI ENERGIA MEDIANTE LO SFRUTTAMENTO DEL VENTO  
 NEL MARE ADRIATICO MERIDIONALE - LUIPIAE MARIS  
 35 WTG – 525 MW

**PROGETTO DEFINITIVO - SIA**

Progettazione e SIA



Indagini ambientali e studi specialistici



Studio misure di mitigazione e compensazione



supervisione scientifica



**1. ELABORATI GENERALI**

**R.1.3 Relazione geologica**

REV.	DATA	DESCRIZIONE



# INDICE

1. Premessa .....	3
2. Individuazione del sito sulla terra ferma.....	5
3. Aspetti vincolistici.....	6
4. Aspetti geolitologici del sito di progetto .....	8
5. Caratteri idrogeologici.....	11
6. Morfologia e idrografia superficiale.....	13
8. INDAGINI SUL SUOLO .....	16
8.1 Prospezione MASW .....	16
8.1.2 Attrezzature e tecniche operative.....	18
8.1.3 Risultati.....	19
8.2 Prospezione sismica a rifrazione .....	21
8.2.1 Attrezzature e tecniche operative.....	23
8.2.2 Risultati.....	24
9. Modello del sottosuolo di posa del cavidotto.....	26
9.1 Modello geologico-tecnico .....	26
10. INDAGINI IN MARE .....	28
11. Considerazioni conclusive .....	32

## 1. Premessa

Il seguente studio geologico per la realizzazione del **“Progetto di un impianto eolico offshore al largo delle coste adriatiche tra Brindisi e Lecce”** è stato redatto in conformità al D.M. 17/01/2018 e si è avvalso, nel corso del suo svolgimento di indagini specifiche e della raccolta di dati e notizie bibliografiche ottenute da fonti ufficiali pubbliche e private.

L'impianto offshore in progetto servirà per la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile eolica della potenza nominale di 525 MW ed è costituito da 35 aerogeneratori e da una stazione elettrica di trasformazione 66/400 kV installati su fondazioni flottanti nel Mare Adriatico meridionale e di un elettrodotto di connessione a 400 KV localizzato in parte a mare in parte a terra.

Tutte le indagini condotte sono state ubicate lungo l'area interessata dal tracciato di progetto.



**Fig1 – Ubicazione aerogeneratori di progetto**

Le indagini effettuate in mare hanno definito la stratigrafia dei sedimenti marini lungo il piano di posa del cavidotto mentre le indagini svolte sulla terra ferma, oltre alla definizione stratigrafica, hanno permesso di ottenere anche i parametri geomeccanici del sottosuolo che sarà interessato dall'attraversamento del cavidotto da realizzare.

#### **Indagini sul suolo:**

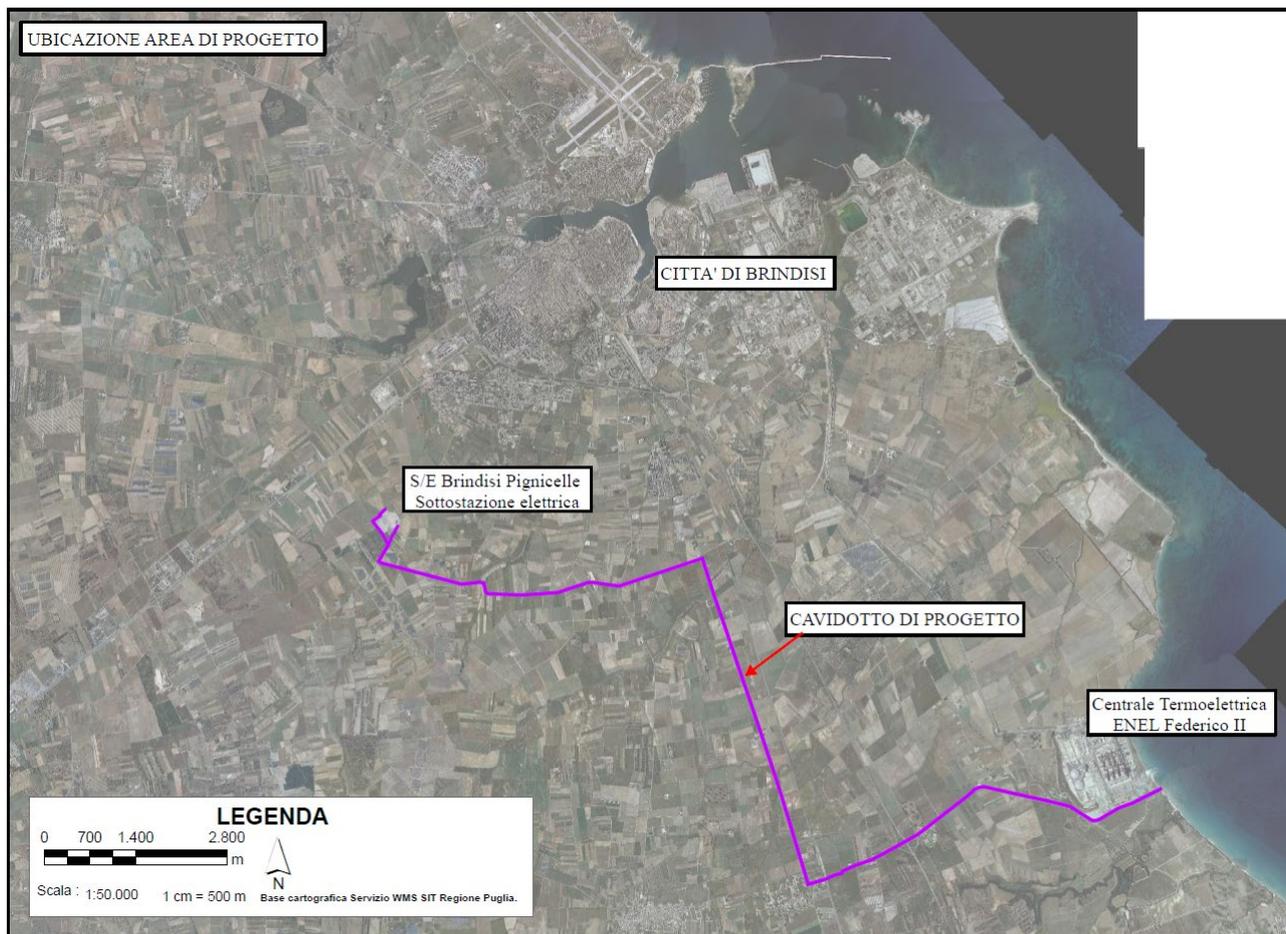
- Esecuzione di 3 prospezioni sismiche a rifrazione in onde P per determinare i parametri elasto-meccanici dei terreni;
- Esecuzione di 3 prospezione sismica mediante la tecnica MASW per classificare il suolo di fondazione secondo le NTC 2018.

#### **Indagini a mare:**

- Indagini stratigrafiche mediante Sub-bottom profiler;
- Rilievi multibeam - Side Scan Sonar.

## 2. Individuazione del sito sulla terra ferma

Il sito è contraddistinto da una morfologia poco accidentata, si tratta infatti di un'area pianeggiante o leggermente scoscesa in direzione della linea di costa che si trova a meno di un chilometro da essa lungo la linea ferroviaria. Per comprendere l'esatta ubicazione dei luoghi si riporta, di seguito, la figura 1: Ortofoto in scala 1:50.000.



*Fig. 1 – Stralcio di Ortofoto*

### 3. Aspetti vincolistici

In riferimento al PAI redatto dall'Autorità di Bacino della Puglia, si considerano in questo caso le perimetrazioni riferite alle aree a differente grado di pericolosità idraulica e geomorfologica.

Si evince che l'area in oggetto ricade parzialmente in un tratto a pericolosità idraulica media e bassa mentre, lungo la costa, è interessata da pericolosità geomorfologica media ed alta.

Nello stralcio seguente è possibile visualizzare il tracciato della condotta di progetto in relazione alla distribuzione delle aree perimetrate dall'Autorità di Bacino della Puglia (fig.2 e 3).

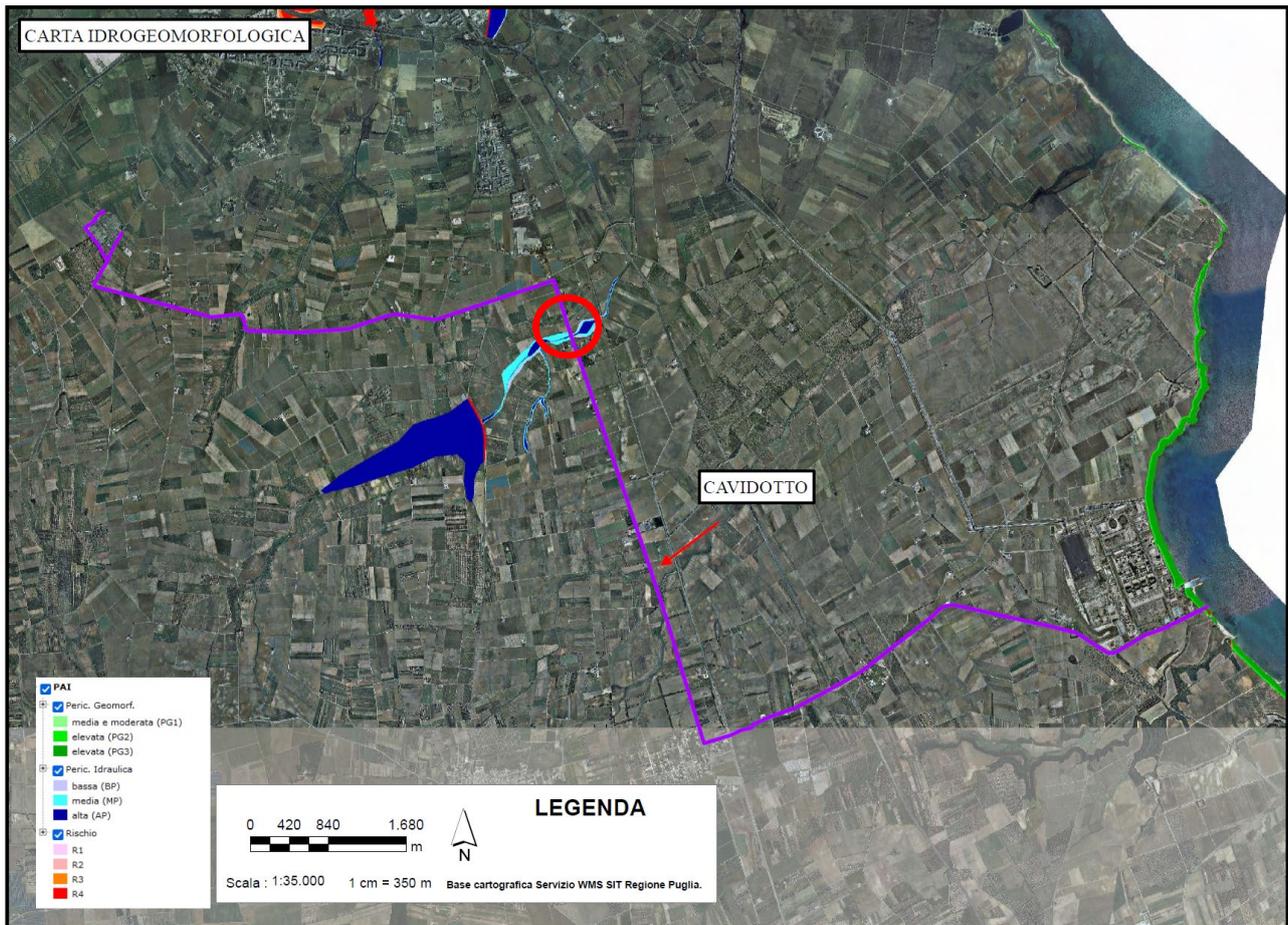
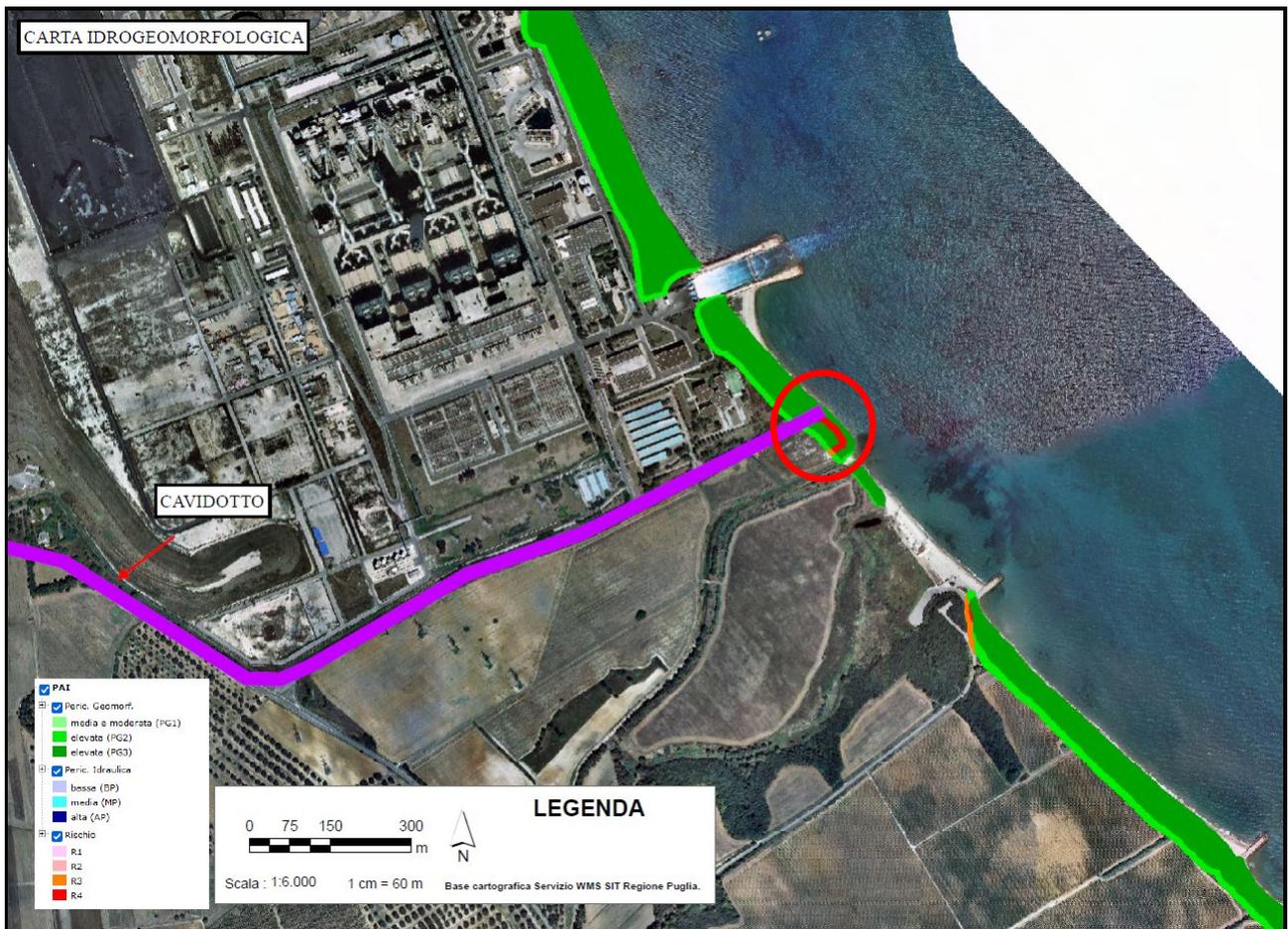


Fig. 2– Stralcio del PAI della Puglia da web-gis ([www.adb.puglia.it](http://www.adb.puglia.it))



**Fig. 3 – Stralcio del PAI - Ingrandimento dell'area in prossimità della costa**

#### 4. Aspetti geolitologici

Le osservazioni geologiche sono state condotte sulle sequenze litologiche affioranti nel territorio in esame, in particolare ricorrendo ad osservazioni lungo trincee e scavi di natura antropica che mettono in luce tali sequenze.

Tuttavia in corrispondenza del sito di progetto, il numero limitato di affioramenti, l'elevata antropizzazione dell'area oggetto dell'intervento ha evidenziato la necessità di acquisire ulteriori dati geologici d'insieme ricorrendo alla consultazione di fonti bibliografiche e cartografiche.

In particolare è stata consultata la Carta Geologica d'Italia, foglio n. 203 "Brindisi" (Fig.4).

L'area ricade su di un ciclo sedimentario trasgressivo pleistocenico costituito da sedimenti marini poggianti su una successione carbonatica mesozoica e cenozoica, di ambiente di piattaforma il cui spessore è di circa 6 Km. Questa poggia su un basamento cristallino, di tipo continentale, di grande potenza. Questa unità è ribassata verso il mare da una serie di faglie verticali. Morfogeneticamente è una delle ultime superfici occupate dal mare in fase di ritiro.

Una classificazione delle unità geologiche cartografate, ed affioranti nell'areale di studio, permette di distinguerle in quattro gruppi fondamentali dalle più recenti alla più antiche:

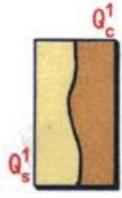
- Sabbie argillose ( $Q^1_s$ -  $Q^1_c$ ) - età pleistocenica;
- Calcari dolomitici ( $C^{8-6}$ ) - età cretacea;

I principali caratteri geolitologici delle suddette unità sono:

- **Sabbie argillose** giallastre ( $Q^1_s$ ), talora debolmente cementate, in strati di qualche centimetro di spessore, passanti inferiormente a sabbie argillose e argille grigio-azzurrate; spesso l'unità ha intercalazioni di banchi arenacei e calcarenitici ben cementati ( $Q^1_c$ );
- **Calcari dolomitici** e dolomie grigio-nocciola, a frattura irregolare, calcari grigio chiari.



## LEGENDA



Sabbie argillose giallastre, talora debolmente cementate, in strati di qualche cm. di spessore, che passano inferiormente a sabbie argillose e argille grigio-azzurastre ( $Q_s^1$ ); spesso l'unità ha intercalati banchi arenacei e calcarenitici ben cementati ( $Q_c^1$ ). Nelle sabbie più elevate si notano talora *Cassidulina laevigata* D'ORB. *carinata* SILV., *Bulimina marginata* D'ORB., *Ammonia beccarii* (LIN.), *Ammonia perlucida* (HER. ALL. EARL.) (PLEI-STOCENE). Nelle sabbie argillose ed argille sottostanti, accanto a *Arctica islandica* (LIN.), *Chlamys septemradiata* MULL. ed altri molluschi, sono frequenti: *Hyalinea balthica* (SCHR.), *Cassidulina laevigata* D'ORB. *carinata* SILV., *Bulimina marginata* D'ORB., *Bolivina catanensis* SEG. (CALABRIANO). FORMAZIONE DI GALLIPOLI.

Fig. 4 – Carta Geologica geologico strutturale della piana di Brindisi con traccia del cavidotto di progetto

## 5. Caratteri idrogeologici

Il limite geografico “dell'unità idrogeologica del Salento”, che comprende l'intera penisola salentina, è rappresentato dall'ideale allineamento di Brindisi-Taranto.

La penisola Salentina è caratterizzata da una circolazione idrica sotterranea piuttosto complessa in quanto non riconducibile ad un solo acquifero, ma viceversa ad un maggior numero di livelli idrici di cui il principale, sia in rapporto alle dimensioni, che all'importanza soprattutto dal punto di vista antropico, è quello noto con il termine di falda “profonda” o falda “di base”.

In sostanza si possono distinguere dei livelli idrici cosiddetti “superiori”, contenuti nei depositi della copertura post-cretacea miocenica e plio-pleistocenica e la falda “profonda” localizzata in corrispondenza della formazione carbonatica del Cretaceo.

La falda profonda è sostenuta alla base da acqua di mare di invasione continentale con una interfaccia, tra le due acque, di profondità variabile dall'ordine di alcune decine di metri a pochi decimetri nelle zone prossime alla costa. Zone di prevalente alimentazione sono quelle degli affioramenti calcarei e dolomitici. Nelle aree di affioramento dei terreni pleistocenici, ad esempio nell'area brindisina e nelle zone interne a cavallo di Otranto, gli apporti meteorici ravvenano falde superficiali sostenute da livelli argillosi praticamente impermeabili.

Di diretto interesse è la “falda superficiale brindisina” le cui caratteristiche sono di seguito descritte.

### **Falda superficiale area brindisina**

Si tratta di una falda superficiale arealmente molto estesa (circa 700 Km<sup>2</sup>) anche se non sempre continua. Si rinviene nel sottosuolo di una porzione della provincia di Brindisi a partire da Punta Penna Grossa a nord fino agli abitati di Mesagne, Latiano, Oria e Torre S.Susanna ad Ovest e S.Donaci e Campi Salentina a Sud. Pertanto può essere considerata collegata alla falda dell'area leccese settentrionale.

Il substrato che sostiene questa falda e quello argilloso pleistocenico che è separato dalla sottostante formazione carbonatica mesozoica da uno spessore variabile ma in genere modesto di calcareniti tufacee. Lo spessore dell'acquifero è in genere contenuto entro un valore massimo di 15 metri con una profondità della superficie freatica molto ridotta.

E' caratterizzato da bassi valori di permeabilità e di conseguenza da bassi valori delle portate specifiche. Caratteristiche idrodinamiche migliori si rilevano laddove lo spessore dell'acquifero assume valori più elevati, ovvero laddove il sostrato impermeabile di base si approfondisce. Sulla base dei pochi dati disponibili può indicarsi nella porzione compresa tra il Canale Reale, Mesagne, San Pietro Vernotico e Torre San Gennaro la porzione di acquifero dotato di migliori caratteristiche idrodinamiche, comunque modeste.

Analogamente a quanto evidenziato per le falde superficiali salentina, anche per questo acquifero la distribuzione media dei carichi piezometrici, riportata nella tavola 6.3.2, evidenzia direzioni preferenziali di deflusso localizzate lungo le principali incisioni in concordanza con la morfologia del substrato impermeabile.

In virtù di quanto appreso dallo stralcio della Tavola 6.3.2 del PTA della Puglia (fig. 5) “Distribuzione media dei carichi piezometrici degli acquiferi porosi del brindisino, tarantino e del Salento”, la falda relativa “all’acquifero poroso superficiale”, in base all’andamento delle isofreatiche, è diretta sostanzialmente verso la costa e la si rinviene generalmente ad una quota compresa tra 40 metri fino al livello del mare..

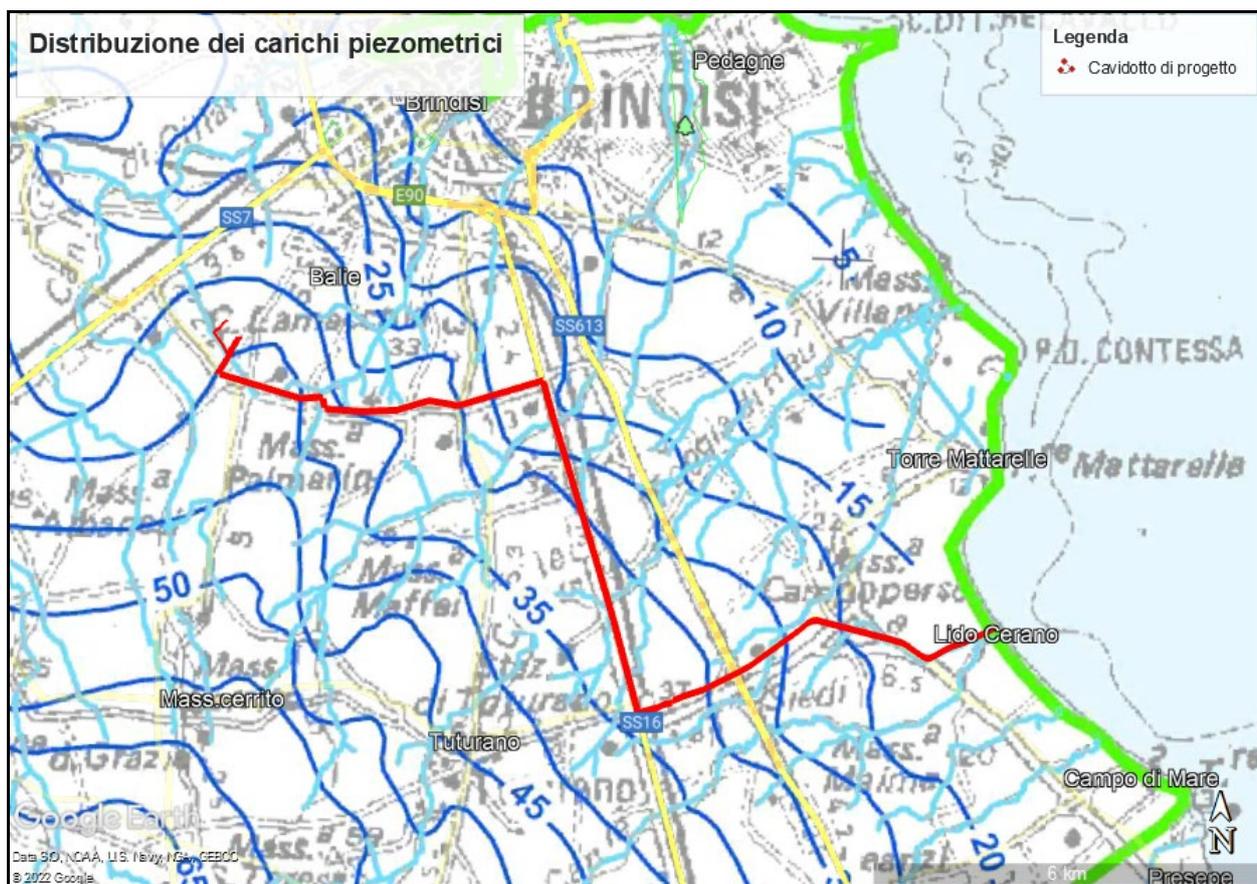


Fig. 5 – Andamento dei carichi piezometrici – Tav. 6.3.2 del PTA

## Legenda

- Distribuzione media dei carichi piezometrici (m s.l.m.)
- Elementi idrografici
- ACQUIFERO DELL'AREA BRINDISINA

## 6. Morfologia e idrografia superficiale

L'area d'indagine è del tutto pianeggiante e priva di quei fenomeni morfogenetici e tettonici che hanno interessato la piattaforma carbonatica posta sull'horst della "Conca di Brindisi"; la tabularità del terreno in studio fa intendere all'appartenenza dei terreni al "graben" della "Conca" e quindi rappresentata da una successione stratigrafica tipica del riempimento della struttura tettonica. Gli elementi idromorfologici più ricorrenti nell'area di indagine sono costituiti da (fig. 6):

- ripa d'erosione;
- corsi d'acqua.

Dall'analisi della carta idrogeomorfologica si evince la presenza di un reticolo idrografico superficiale, le cui linee di deflusso sono dirette sostanzialmente verso la linea di costa.

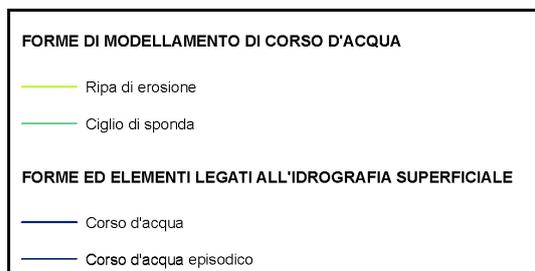
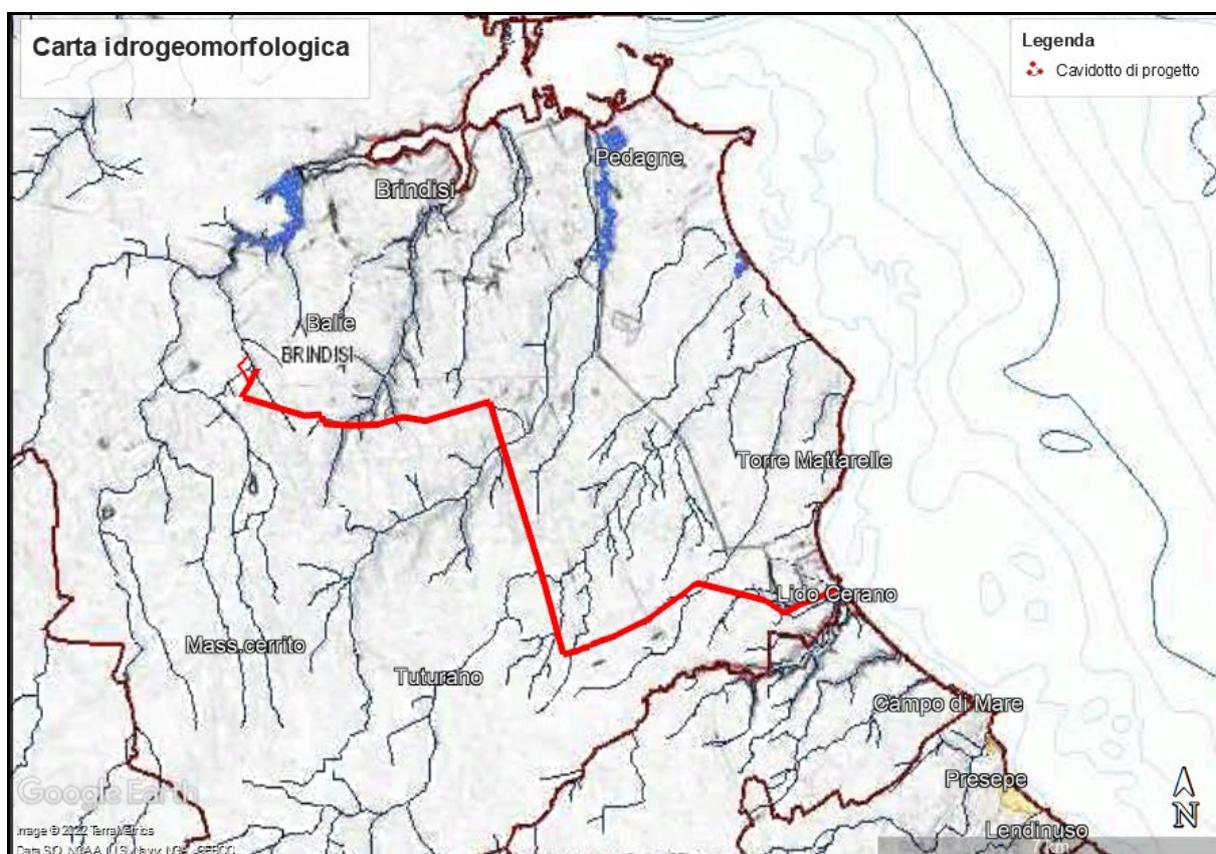


Fig. 6 - Carta Idrogeomorfologica della Puglia– <http://www.adb.puglia.it/>

## 7. Sismicità dell'area

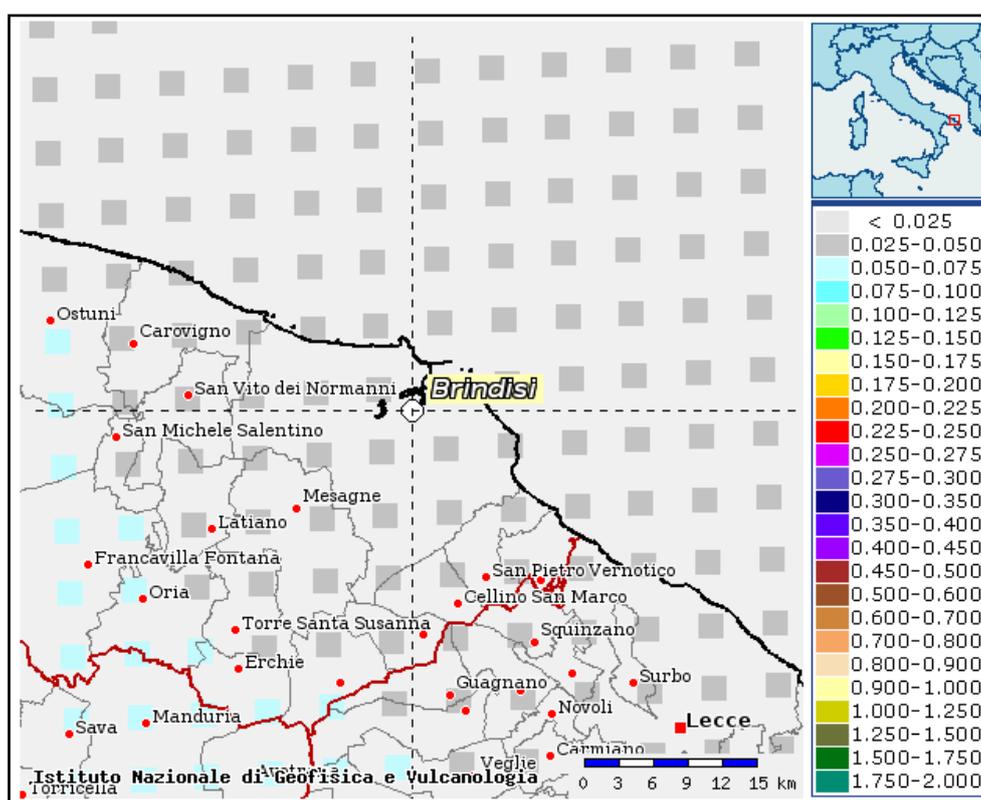
L'area in esame è stata classificata, in base all'O.P.C.M. 3274 del 2003 e successivo aggiornamento in base all'O.P.C.M. 3519 del 2006, nella zona sismica di 4° categoria, pertanto andranno altresì considerati gli aspetti sismici connessi alla normativa.

Zona sismica di riferimento	Intervallo di pertinenza della PGA (10% in 50 anni)	$a_{g,max}$
1	$0,25 < a_g \leq 0,35$ g	0,35 g
2	$0,15 < a_g \leq 0,25$ g	0,25 g
3	$0,05 < a_g \leq 0,15$ g	0,15 g
4	$a_g \leq 0,05$ g	0,05 g

Si riporta in seguito la zonazione sismica del territorio eseguita da parte dell'INGV da cui si evincono le accelerazioni del suolo (INGV) in termini di frazioni di "g" (accelerazione di gravità), in caso di evento sismico.

L'area in esame è caratterizzata da un'accelerazione sismica compresa tra 0,025 e 0,050g (fig. 7).

Si riporta inoltre, al fine di fare una caratterizzazione storica della sismicità del sito, una tabella con gli eventi sismici storici e delle relative intensità che hanno coinvolto il comune di Brindisi (fig. 8).



**Storia sismica di Brindisi**  
**[40.637, 17.945]**

Numero di eventi: 21

Effetti

In occasione del terremoto del:

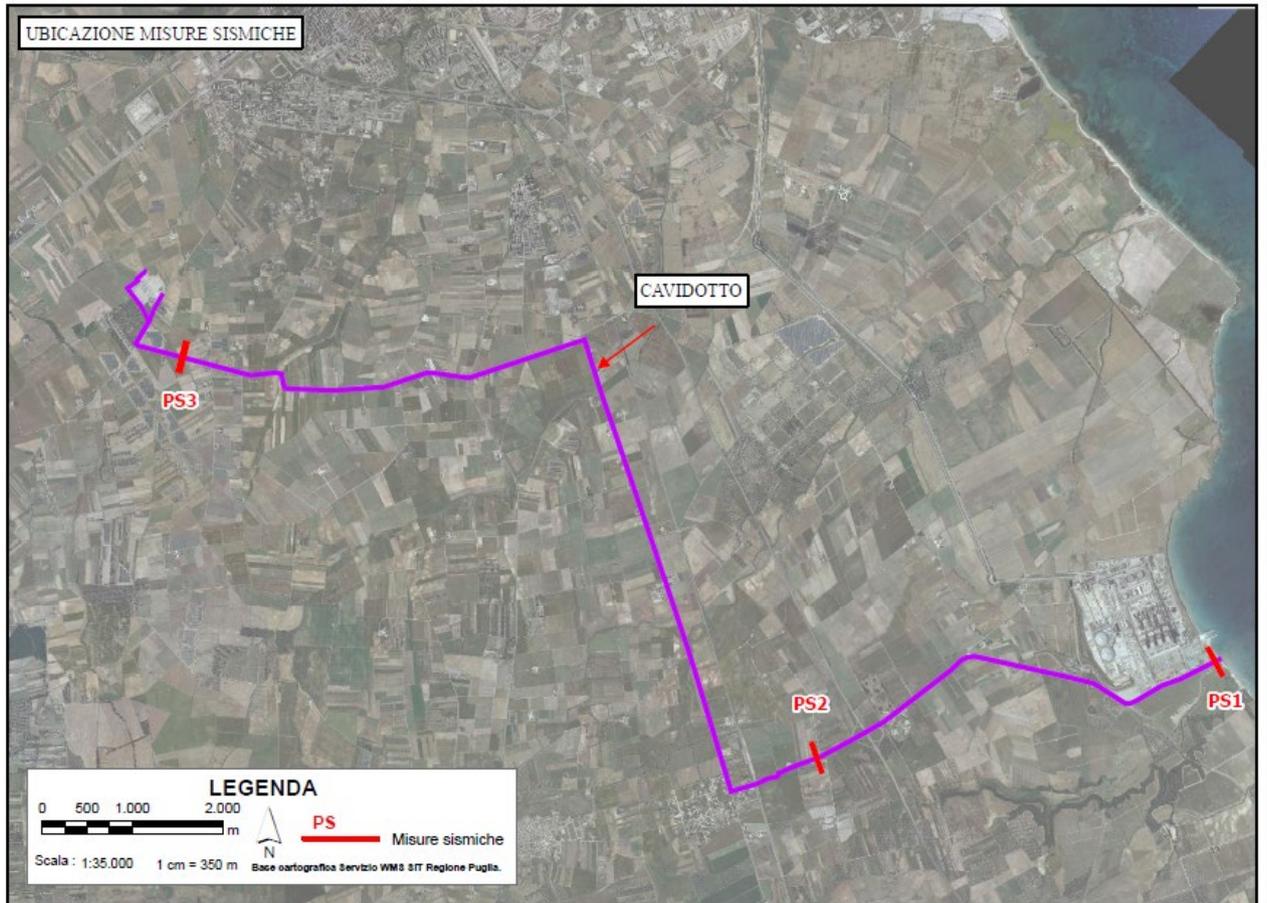
I [MCS]	Data	Ax	Np	Io Mw
6	1456 12 05	MOLISE	199	11 7.22 ±0.13
5	1694 09 08 11:40	Irpinia-Basilicata	251	10 6.79 ±0.10
6-7	1731 03 20 03:00	Foggiano	50	9 6.53 ±0.25
8	1743 02 20 16:30	Basso Ionio	77	9 7.13 ±0.19
5	1777 06 06 16:15	CALABRIA	9	
2-3	1857 12 16 21:15	Basilicata	340	11 7.03 ±0.08
5	1875 12 06	S.MARCO IN LAMIS	97	8 5.98 ±0.16
4	1889 12 08	APRICENA	122	7 5.69 ±0.13
3	1905 09 08 01:43	Calabria meridionale	895	7.04 ±0.16
EE	1908 12 28 04:2	Calabria meridionale-Messina	800	11 7.10 ±0.15
4	1909 01 20 19:58	Salento	32	
NF	1910 06 07 02:04	Irpinia-Basilicata	376	8 5.73 ±0.09
NF	1913 06 28 08:5	Calabria settentrionale	151	8 5.66 ±0.14
NF	1915 01 13 06:52	Avezzano	1041	11 7.00 ±0.09
F	1930 07 23 00:0	Irpinia	547	10 6.62 ±0.09
NF	1947 05 11 06:3	Calabria centrale	254	8 5.70 ±0.13
NF	1951 01 16 01:1	Gargano	73	7 5.35 ±0.20
2	1978 09 25 10:08	Matera	120	6 4.88 ±0.13
5	1980 11 23 18:3	Irpinia-Basilicata	1394	10 6.89 ±0.09
NF	1984 04 29 05:0	GUBBIO/VALFABBRICA	709	7 5.65 ±0.09
3-4	1990 05 05 07:2	Potentino	1374	5.80 ±0.09



**Fig. 8 - Terremoti storici e intensità registrata - <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11/>**

## 8. INDAGINI SUL SUOLO

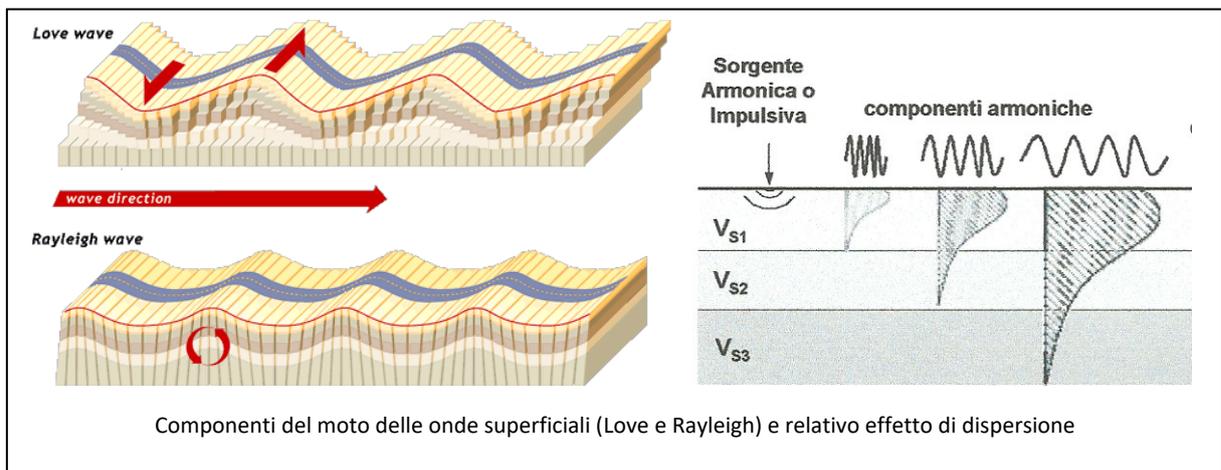
- Esecuzione di 3 prospezioni sismiche a rifrazione in onde P per determinare i parametri elasto-meccanici dei terreni;
- Esecuzione di 3 prospezione sismica mediante la tecnica MASW per classificare il suolo di fondazione secondo le NTC 2018.



Ubicazione misure sismiche

## 8.1 Prospezione MASW

Il metodo Re.Mi. (Refraction Microtremor) è una tecnica di indagine MASW non invasiva che individua il profilo di velocità delle onde di taglio verticali  $V_s$ , basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori (nel nostro caso geofoni) posti sulla superficie del suolo. Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidezza della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde. In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive, cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase o detto in maniera equivalente la velocità di fase (o di gruppo) apparente delle onde di Rayleigh dipende dalla frequenza di propagazione.



La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazioni sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi del suolo.

### 8.1.2 Attrezzature e tecniche operative

Per le misure eseguite sono state utilizzate le seguenti attrezzature:

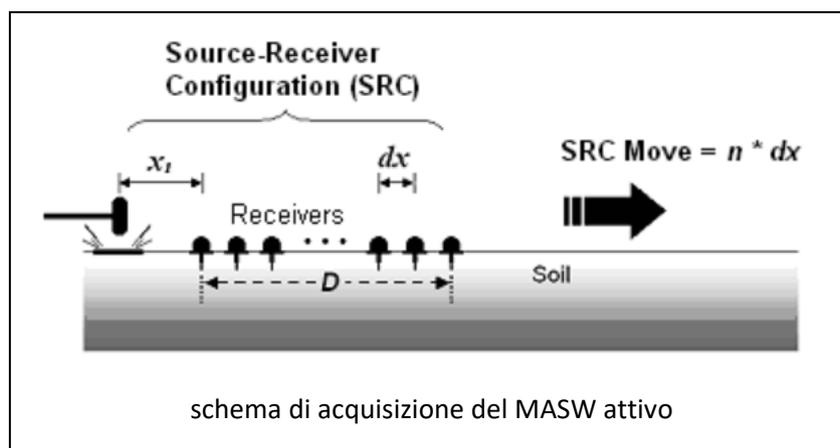
Un sismografo DAQ LINK – III a 24 bit della “Seismic Source Co” con intervallo minimo di campionamento di 0.0208 ms e altissima risoluzione (118 db).



- Un cavo con 24 collegamenti per i geofoni.
- 24 geofoni a componente verticale con frequenza di 4.5 Hz.
- SurfSeis v.3 della Kansas Geological Survey per il MASW “attivo”.
- Un piattello in alluminio;
- Un martello di 8 Kg dotato di trigger.

In questa indagine è stato utilizzato il “metodo attivo”. Le caratteristiche geometriche del profilo sono tabellate e schematizzate di seguito:

Denominazione	Lunghezza profilo	Distanza intergeofonica (dx)	Offset ( $x_t$ )
MASW 1	60 m	2,5 m	5.0 m
MASW 2	48 m	2,0 m	4.0 m
MASW 2	48 m	2,0 m	4.0 m



I sismogrammi sono stati elaborati con una trasformazione bidimensionale dal dominio tempo-distanza (t-x), al dominio velocità di fase-frequenza (p-f). E' stato così possibile analizzare l'energia di propagazione lungo la linea sismica e riconoscere le onde superficiali con carattere dispersivo. Da questa analisi è stato ottenuto lo spettro risultante e sono stati individuati una serie di punti al centro dell'area ad alta energia (piking). E' stato poi calcolato un modello ottimale di velocità di onde trasversali mediante il "fitting" tra curva di dispersione e valori sperimentali. Sismogrammi e risultati sono riportati nell'allegato "indagine sismica".

### 8.1.3 Risultati

I modelli di Vs-profondità, ottenuti mediante l'analisi MASW, sono schematizzati qui di seguito:

MASW 1		MASW 2		MASW 3	
Z (m)	Vs (m/s)	Z (m)	Vs (m/s)	Z (m)	Vs (m/s)
-1.04	217.81	-1.15	333.72	-1.18	182.46
-2.34	211.71	-2.58	324.03	-2.66	308.52
-3.97	231.58	-4.36	315.58	-4.51	319.65
-6.01	281.46	-6.60	347.92	-6.81	324.49
-8.55	329.87	-9.39	365.16	-9.70	312.54
-11.73	398.11	-12.89	355.50	-13.30	313.78
-15.71	497.75	-17.25	385.28	-17.81	366.08
-20.67	601.99	-22.71	454.79	-23.45	452.09
-26.88	688.37	-29.53	525.97	-30.49	528.54
-33.61	1084.15	-36.92	787.43	-38.11	805.07

In conformità al D.M. 17/01/2018 "Norme tecniche per le costruzioni" la classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio,  $V_{S,eq}$  (in m/s), definita dall'espressione:

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

dove:

$h_i$  spessore dell'i-esimo strato;

$V_{S,i}$  velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato;

$N$  numero di strati;

$H$  profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da  $V_s$  non inferiore a 800 m/s.

Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali. Nel caso di opere di sostegno di terreni naturali, la profondità è riferita alla testa dell'opera. Per muri di sostegno di terrapieni, la profondità è riferita al piano di imposta della fondazione.

Per depositi con profondità  $H$  del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio  $V_{S,eq}$  è definita dal parametro  $V_{S,30}$  ottenuto ponendo  $H=30$  m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Poiché le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni sono chiaramente riconducibili alle categorie definite nella Tab. 3.2.II (di seguito), si può fare riferimento a un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio,  $V_S$ .

Pertanto il sito in esame rientra in **categoria di sottosuolo B**, vedi la seguente tabella 3.2.II (NTC 2018).

**Tab. 3.2.II – Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.**

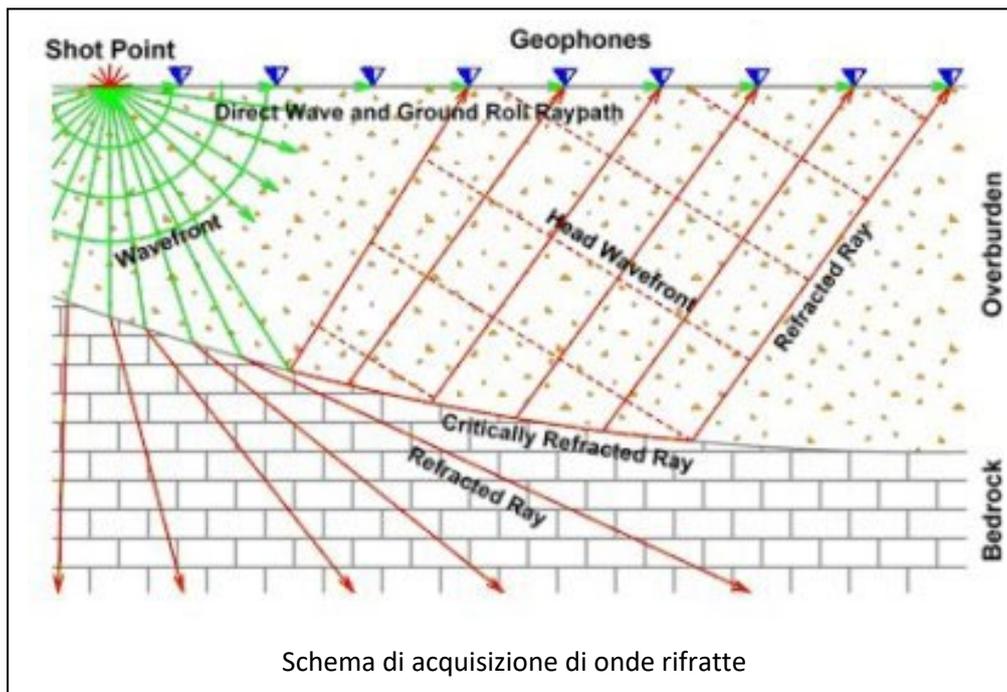
Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo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

## 8.2 Prospezione sismica a rifrazione

La tecnica di prospezione sismica a rifrazione consiste nella misura dei tempi di primo arrivo delle onde sismiche generate in un punto in superficie (punto sorgente), in corrispondenza di una molteplicità di punti disposti allineati sulla superficie topografica (geofoni). Lo studio della propagazione delle onde sismiche consente di valutare le proprietà geometriche e fisico-meccaniche dei terreni.

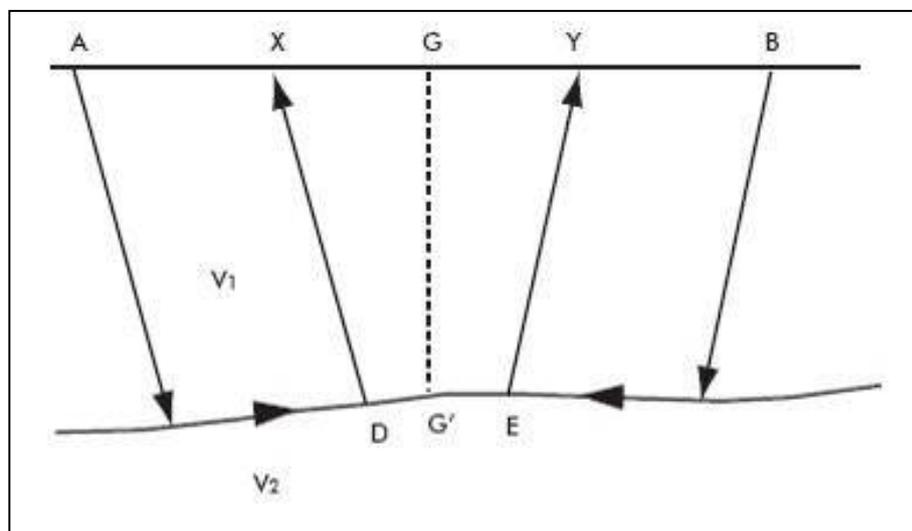
Mediante questo tipo di indagine si può risalire alla composizione litologica di massima dei terreni, al loro grado di fratturazione, alla geometria delle prime unità sottostanti la coltre superficiale, alla profondità in cui si trova la roccia di fondo ("bedrock").

L'unica condizione per eseguire studi di sismica a rifrazione è che la successione rocciosa da investigare sia caratterizzata da velocità sismiche crescenti all'aumentare della profondità.



Normalmente il sottosuolo è caratterizzato da strati piano-paralleli con velocità crescente all'aumentare della profondità. In contesti più complessi (inversioni di velocità o presenza di corpi non stratificati) bisogna tener conto del modello tridimensionale del sottosuolo ed intervenire con indagini più specifiche (misure sismiche in foro), per non incorrere in errori interpretativi.

Il metodo di elaborazione utilizzato nel corso delle analisi dei dati a rifrazione è stato il Generalized Reciprocal Method (GRM: Palmer - 1980). L'analisi GRM (metodo reciproco generalizzato) si basa sulla determinazione del tempo di tragitto delle onde sismiche tra due geofoni separati da una distanza variabile XY ottimale per la quale i segmenti dei raggi che viaggiano verso l'alto e arrivano a ciascun geofono, emergano quasi dallo stesso punto del riflettore (G'). Ciò permette di valutare tutte le eventuali variazioni laterali di velocità del rifrattore, e quindi di ricostruire anche morfologie complesse.



Successivamente, con l'ausilio del software "Rayfract" della Intelligent Resources Inc., si è proceduti all'analisi del sottosuolo in tomografia sismica. Il software, utilizzando i tempi d'arrivo delle onde lette sui sismogrammi sperimentali, permette di eseguire delle ottimizzazioni del modello di velocità. Tali interpretazioni danno modo di rappresentare le velocità sismiche sia secondo sismostrati e sia secondo un'imaging bidimensionale a colori.

## 8.2.1 Attrezzature e tecniche operative

Per i profili eseguiti sono state utilizzate le seguenti attrezzature:

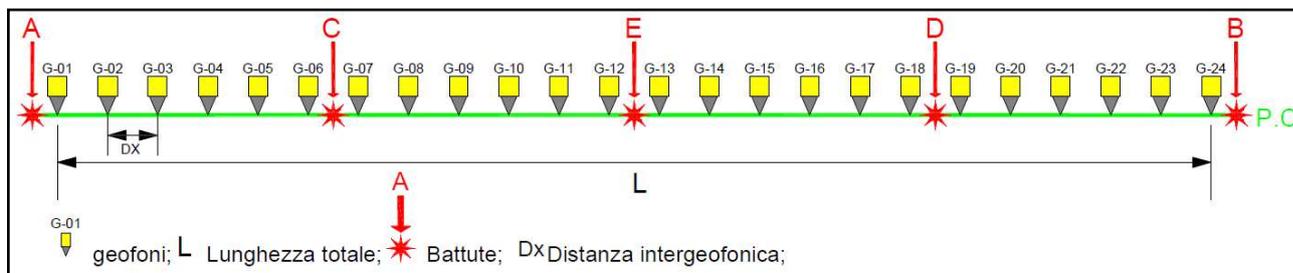
- Un sismografo DAQ LINK – III a 24 bit della “Seismic Source Co” con intervallo minimo di campionamento di 0.0208 ms e altissima risoluzione (118 db).



- Un cavo con 24 collegamenti per i geofoni;
- Ventiquattro geofoni a componente verticale con frequenza di 14 Hz;
- Un piattello in alluminio;
- Un martello di 8 Kg dotato di trigger;

Denominazione	Lunghezza (metri)	Distanza geofonica (metri)	n. battute	n. geofoni
Profilo 1	60	2,5	5	24
Profilo 2	48	2,0	5	24
Profilo 2	48	2,0	5	24

Di seguito è mostrato lo schema geometrico di acquisizione:



Il picking delle onde sismiche è stato effettuato sui sismogrammi sperimentali (vedi allegato) mediante il software TomTime della Geotom, LCC, dopo un opportuno filtraggio delle tracce. I primi arrivi sono riportati nei diagrammi tempo-distanza “dromocrone” (vedi allegato).

### 8.2.2 Risultati

L’elaborazione dei dati ha permesso di ricostruire il sottosuolo secondo 2 “sismostrati”, così caratterizzati:

1. **Il primo sismostrato** (con una profondità compresa tra 3,0 m e 5.5 m dal p.c.) ha velocità  $V_p$  compresa tra 630-810 m/s e  $V_s$  compresa tra 236-330 m/s;
2. **Il substrato rifrattore** ha velocità  $V_p$  compresa tra 1260-1560 m/s e  $V_s$  compresa tra 330-408 m/s.

Per ciò che concerne la correlazione delle caratteristiche fisico-dinamiche con quelle geologico-tecniche del sottosuolo esplorato, si può ritenere che:

1. **Il primo sismostrato** è associabile a *depositi alluvionali sabbiosi poco cementati*;
2. **Il substrato rifrattore** è associabile a *sabbie limoso argillose*.

Nel profilo 3 è stato rinvenuto uno strato superficiale areato correlabile a terreno agrario.

Nella tabella che segue sono mostrati tutti i valori delle velocità sismiche, il coefficiente di Poisson ed i valori dei moduli dinamici  $E$  (di Young),  $G$  (di taglio) e  $K$  (di compressibilità), espressi in  $\text{Kg/cm}^2$ . Questi valori sono calcolati considerando un peso di volume unitario.

Le velocità  $V_s$  medie sono state ricavate dall’indagine MASW precedentemente descritta.

**Profilo 1**

<b>Profondità media (m)</b>	<b>Vp</b>	<b>Vs</b>	<b>v</b>	<b><math>\gamma</math></b>	<b>E</b>	<b>G</b>	<b>K</b>
1° sismostrato 0÷4.5	630	236	0.42	1.00	1612	568	3292
substrato rifrattore >4.5	1560	408	0.46	1.00	4971	1699	22568

**Profilo 2**

<b>Profondità media (m)</b>	<b>Vp</b>	<b>Vs</b>	<b>v</b>	<b><math>\gamma</math></b>	<b>E</b>	<b>G</b>	<b>K</b>
1° sismostrato 0÷3.0	740	330	0.38	1.00	3058	1111	4106
substrato rifrattore >3.0	1480	346	0.47	1.00	3594	1222	20722

**Profilo 3**

<b>Profondità media (m)</b>	<b>Vp</b>	<b>Vs</b>	<b>v</b>	<b><math>\gamma</math></b>	<b>E</b>	<b>G</b>	<b>K</b>
1° sismostrato 0÷1.0	530	182	0.43	1.00	969	338	2416
2° sismostrato 1.0÷4.5	810	314	0.41	1.00	2840	1006	5353
substrato rifrattore >4.5	1260	330	0.46	1.00	3252	1111	14718

*Vp = velocità onde longitudinali in m/s*

*Vs = velocità onde trasversali in m/s*

*$\sigma$  = coefficiente di Poisson*

*$\gamma$  = peso di volume in g/cm<sup>3</sup>*

*E = modulo dinamico di Young in Kg/cm<sup>2</sup>*

*G = modulo dinamico di taglio in Kg/cm<sup>2</sup>*

*K = modulo dinamico di compressibilità in Kg/cm<sup>2</sup>*

## 9. Modello del sottosuolo di posa del cavidotto

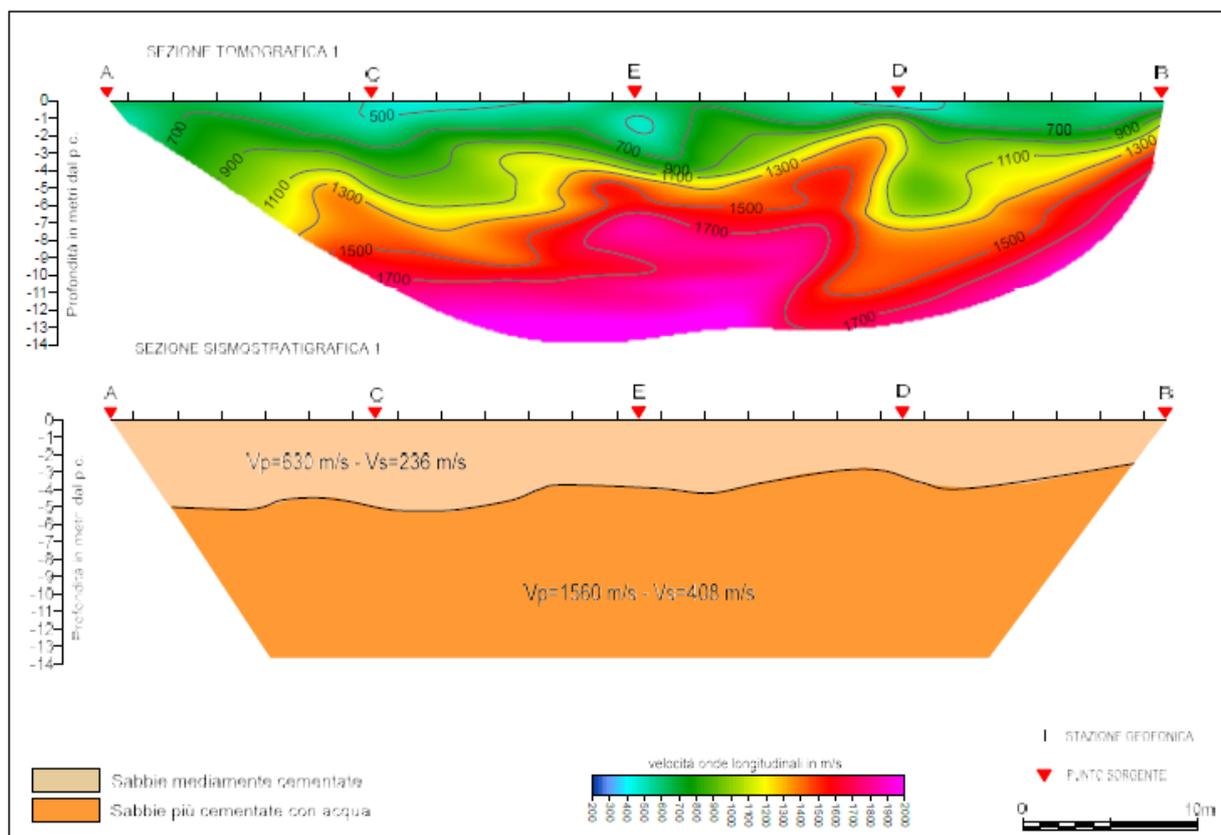
La valutazione del modello geologico e del modello geologico-tecnico dei terreni interessati dalle opere in progetto è stata effettuata nel rispetto della normativa vigente, quali il D.M. 17/01/2018 e il D.P.R. n. 328 del 5 Giugno 2001.

Per la ricostruzione di entrambi i modelli del sottosuolo è stato necessario definire i principali parametri geofisici e geologico-tecnici dell'area di progetto a partire dai risultati della campagna d'indagine geofisica e in base ad un sopralluogo svolto dallo scrivente nell'areale.

Le ubicazioni delle indagini e tutti gli elaborati numerici e grafici sono riportati in allegato.

### 9.1 Modello geologico-tecnico

Il modello geologico scaturito dalle osservazioni e dalle indagini si traduce in un sottosuolo costituito prevalentemente da sabbie e sabbie limose debolmente cementate.



Sulla base dei parametri elastici ricavati dalla campagna geofisica effettuata e dei dati di laboratorio ottenuti dai campioni analizzati per la stessa formazione è possibile attribuire i seguenti parametri geologico-tecnici mediati e corretti, ai terreni interessati dalle opere in progetto.

<b>Peso di volume <math>\gamma</math></b>	<b>17,00 kN/m<sup>3</sup></b>
<b>Angolo di attrito <math>\phi</math></b>	<b>28°</b>
<b>Coesione <math>c</math></b>	<b>0,1 kg/cm<sup>2</sup></b>

Si stima, dai dati geofisici ottenuti dalle indagini effettuate, che i terreni appartengono alla **categoria di suolo B con Vs30 = 406 m/sec.**

<b>Profondità media (m)</b>	<b>Vp</b>	<b>Vs</b>	<b>v</b>	<b><math>\gamma</math></b>	<b>E</b>	<b>G</b>	<b>K</b>
<b>1° sismostrato 0+5,00</b>	<b>630</b>	<b>236</b>	<b>0.42</b>	<b>1.70</b>	<b>2741</b>	<b>966</b>	<b>5597</b>
<b>Substrato rifratore &gt;5,0</b>	<b>1560</b>	<b>408</b>	<b>0.46</b>	<b>1.70</b>	<b>8451</b>	<b>2888</b>	<b>38365</b>

Vp = velocità onde longitudinali in m/s

Vs = velocità onde trasversali in m/s

v = coefficiente di Poisson

$\gamma$  = peso di volume in g/cm<sup>3</sup>

E = modulo dinamico di Young in Kg/cm<sup>2</sup>

G = modulo dinamico di taglio in Kg/cm<sup>2</sup>

K = modulo dinamico di compressibilità in Kg/cm<sup>2</sup>

## 9. INDAGINI IN MARE



**Area di studio**

Come detto in premessa nell'ambito dello stesso progetto sono state effettuate delle indagini marine per appurare la stratigrafia, la biocenosi e la morfo-batimetria del fondale marino.

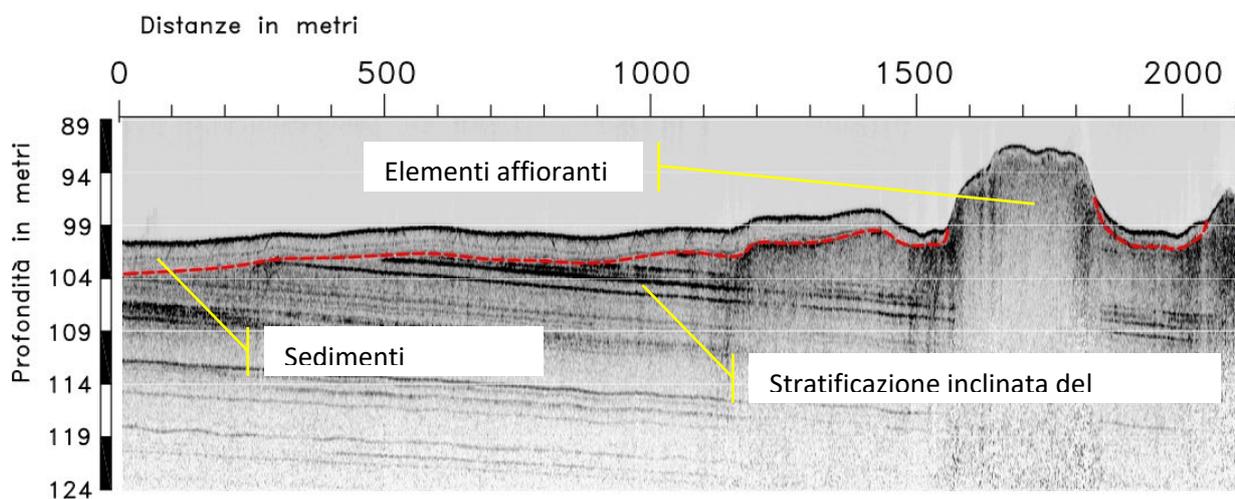
Le indagini stratigrafiche mediante sub-bottom profiler hanno permesso di ricostruire la struttura del fondale marino come mostrato nelle seguenti immagini. La prima parte grigia omogenea rappresenta il tirante d'acqua, mentre la prima linea nera marcata rappresenta il tetto topografico del fondale marino.

Al di sotto della prima linea sono visibili i sedimenti superficiali, piuttosto omogenei, nei quali è presente una stratificazione circa piano parallela (profilo 17) rispetto al fondale marino. La sedimentazione superficiale talora è interrotta dalla presenza di elementi affioranti, di probabile natura rocciosa (profilo 14).

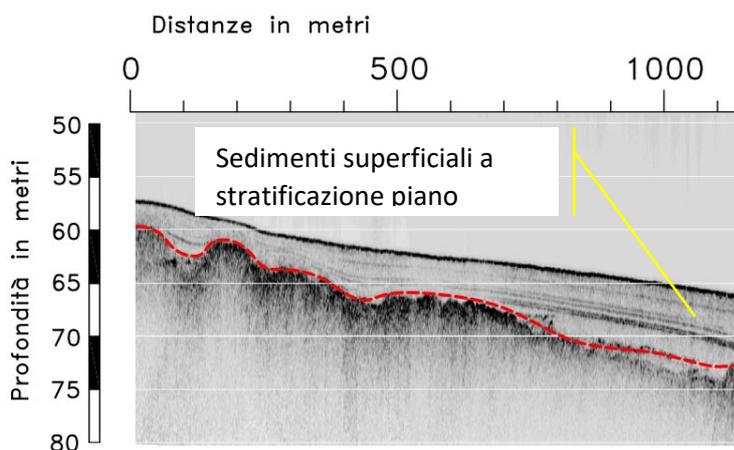
Lo spessore sedimentario superficiale è variabile da meno di un metro fino ad un massimo di circa 10 metri, valutato nel profilo 17. Il tipo di segnale omogeneo e la stratificazione piano parallela fanno supporre la presenza di sedimenti sciolti.

Al di sotto della copertura sedimentaria sono presenti segnali con stratificazione inclinata (profilo 14) delimitati da un passaggio che spesso si presenta frastagliato (profilo 17), talora con presenza di anomalie di riflessione a forma di iperbole (profilo 10). Gli elementi individuati in quello

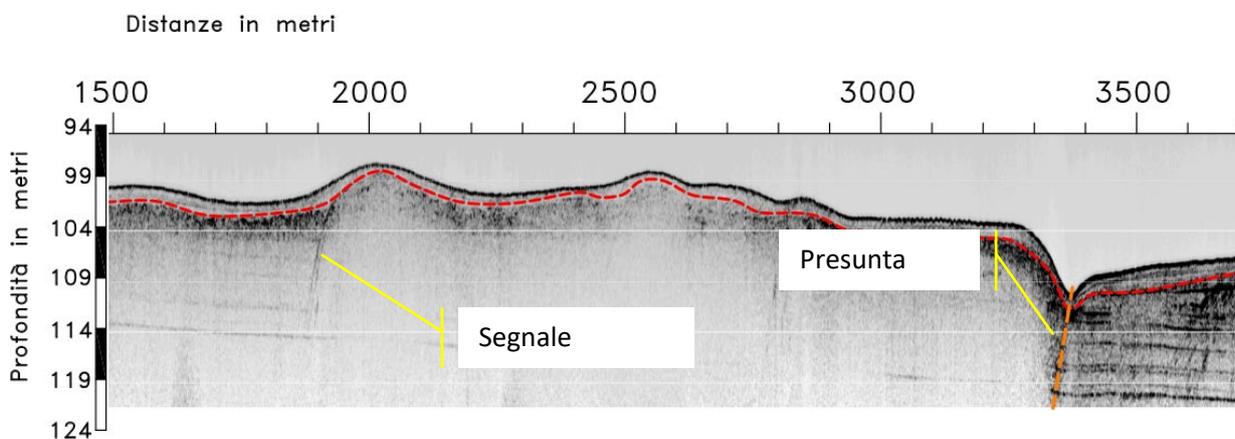
che definiamo “basamento” fanno supporre che trattasi di sedimenti di natura rocciosa o comunque sedimenti cementati; infatti, nel profilo 10, è stata individuata una presunta faglia, solitamente presente in formazioni rocciose.



**Profilo 14**



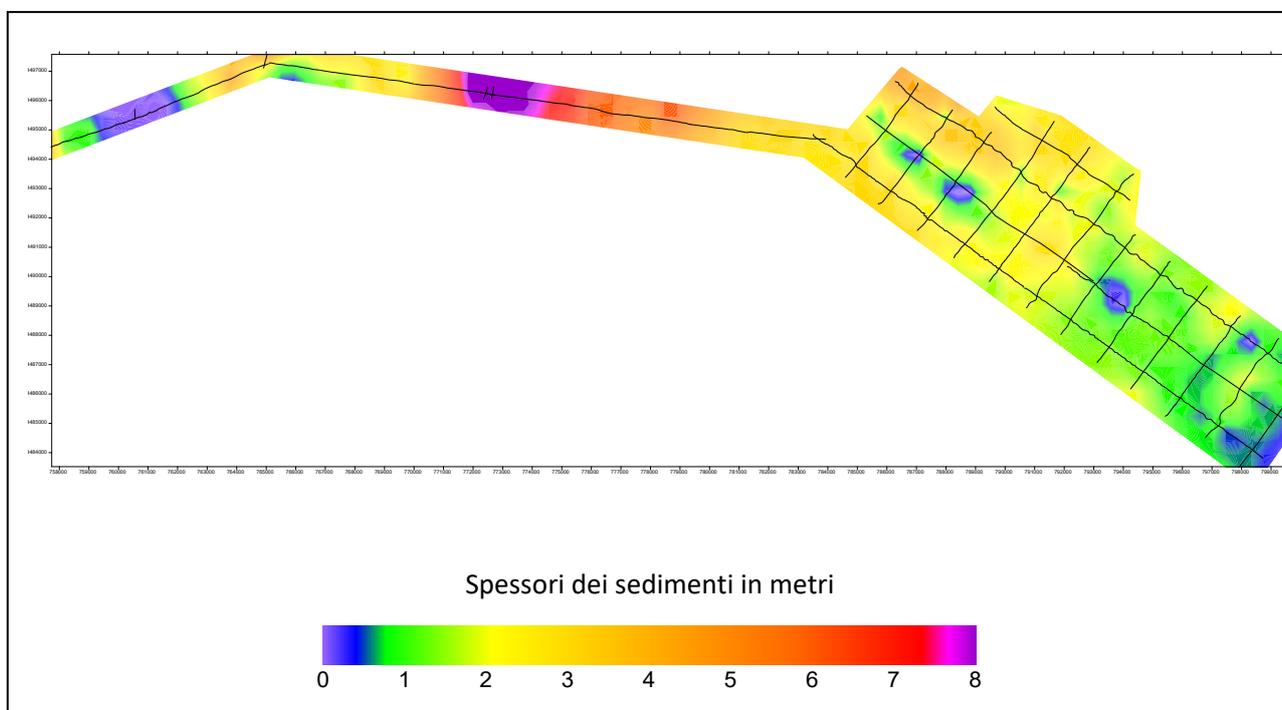
**Profilo 17**



**Profilo 10**

In quasi tutti i profili la stratificazione del substrato, presumibilmente roccioso, risulta debolmente inclinata con immersione S-E, nei profili paralleli alla costa, e N-E in quelli trasversali alla costa.

A corredo dell'indagine e per una visione complessiva dei risultati è stata realizzata una carta degli spessori delle coperture sedimentarie, nella quale, mediante operazioni di contouring, gli spessori sono rappresentati con una scala di colori. Dalla carta si evince che gli spessori di copertura si aggirano mediamente intorno a 2-3 metri; sono presenti delle zone sparse con roccia affiorante (in blu) mentre gli spessori massimi rinvenuti, nella parte centrale del profilo 17, raggiungono gli 8 metri.



Per ciò che riguarda lo studio della biocenosi l'area di indagine destinata ad ospitare l'impianto eolico off-shore risulta caratterizzata prevalentemente da biocenosi dei fondi molli (più dell'86%).

Habitat	Area_ha	Percentuale
Biocenosi dei Fanghi Terrigeni Costieri	6.407,3	86,1%
Mosaico di Coralligeno e Fanghi Terrigeni Costieri	1.034,5	13,9 %

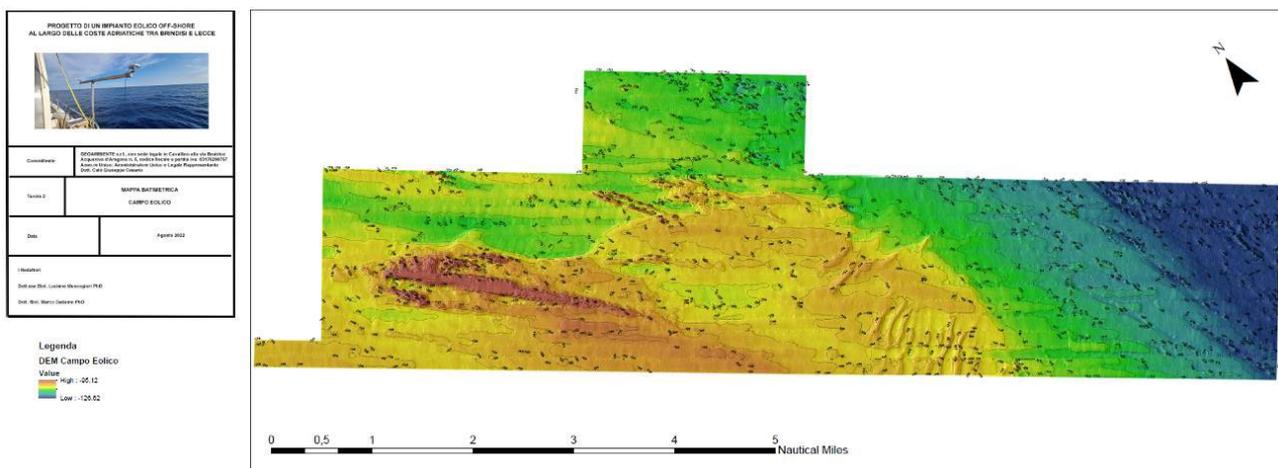
L'analisi delle prospezioni multibeam ha evidenziato la presenza di strutture in rilievo sia in forma isolata che aggregata. Per il principio di massima precauzione tali strutture sono state tutte

identificate e digitalizzate nella classe “Mosaico di Coralligeno e Fanghi Terrigeni Costieri” della mappa biocenotica.

Anche l’area di indagine destinata ad ospitare il cavidotto risulta caratterizzata prevalentemente da biocenosi dei fondi molli (più dell’72%). L’analisi dei dati mette in evidenza un evidente gradiente di biodiversità che trova il suo maggior valore all’interno della ZSC Bosco Tramazzone - IT9140001.

L’analisi dei rilievi Side Scan Sonar, infatti, sembrerebbe evidenziare la presenza di numerosi rilievi del fondale compatibili con la presenza di matte morta. Se confermata, tale analisi consentirebbe di modificare la mappatura presentata diminuendo l’estensione delle praterie di Posidonia oceanica nell’area di interesse.

I rilievi effettuati tramite multibeam hanno permesso di elaborare, in ambiente GIS, la mappa delle batimetrie dell’area di studio. L’elaborazione spaziale di questo tematismo ha consentito la produzione delle isobate ogni metro di profondità (Figura seguente).



La profondità media riscontrata nello specchio acqueo destinato ad ospitare il campo eolico è pari a 110,19 m, la profondità massima rilevata è pari a 126,62 m, quella minima è di 95,12 m (Figura 18).

## 11. Considerazioni conclusive

L'analisi delle tematiche geologiche e geologico-tecniche attinenti agli interventi da realizzare, ha permesso di ottenere un attendibile modello geologico e geotecnico dei terreni interessati alla realizzazione del progetto.

Le osservazioni e le ricerche svolte hanno evidenziato un modello geologico così articolato:

- ✓ **Sabbie poco cementate** rinvenute mediamente da 0,0 – 10,0 metri circa dal p.c. Da un punto di vista litostratigrafico e sismostratigrafico tali terreni si attribuiscono all'**ORIZZONTE A**:
- ✓ **Rocce calcaree mediamente fratturate e carsificate** rinvenute mediamente da 1.5 a 10,0 metri circa fino alle massime profondità indagate 20,0m circa. Da un punto di vista litostratigrafico e sismostratigrafico tali terreni si attribuiscono all'**ORIZZONTE B**.

I parametri elastici e geologico-tecnici attribuibili ai terreni di fondazione degli interventi sono riportati nel Capitolo 9.1.

L'indagine sismica ha escluso forme e disturbi carsici di rilievo; in particolare non sono state mai rilevate cadute laterali violente di velocità sismiche che potrebbero far pensare a fasce, rotture tettoniche o vuoti consistenti.

In merito alla classificazione sismica, l'area interessata dalle opere in oggetto ricade in zona 3 (O.P.C.M. 3274 e successivo aggiornamento O.P.C.M. 3519) con un'accelerazione orizzontale massima convenzionale (ag), su suolo compresa tra 0,050 e 0,075g.

L'indagine sismica effettuata colloca questo sito nella **categoria di sottosuolo B**, in conformità al D.M. 17/01/2018 "Norme tecniche per le costruzioni".

L'area a rischio PG2-PG3 su cui ricadrà il tratto finale del cavidotto prima dell'immersione in mare si presenta morfologicamente instabile; sarà sicuramente necessario procedere con opere di stabilizzazione. Vedi foto seguenti.: 1;2;3;4.

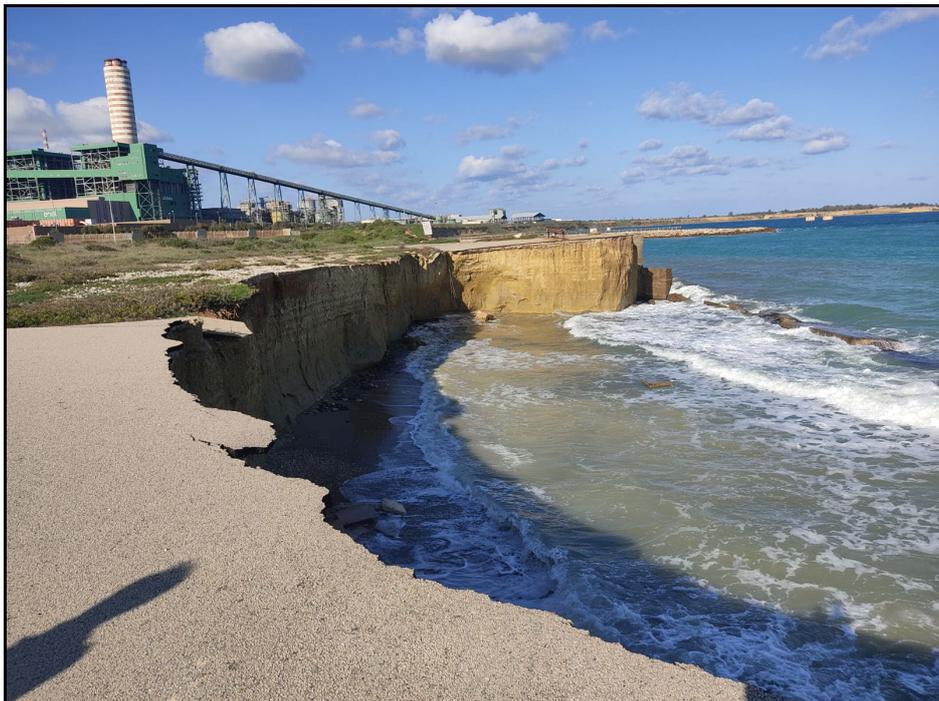
A conclusione della campagna geognostica e geofisica e dell'attività di rilievo svolta, in questa area PG3 è possibile evidenziare le seguenti peculiarità:

- da un punto di vista geo-litologico il sottosuolo è contraddistinto, da un deposito sabbioso stratificato e poco cementato avente uno spessore che non supera i 6 metri, sovrapposto stratigraficamente ad un deposito calcareo mediamente consistente non alterato;

- da un punto di vista sismico il sottosuolo è stato classificato come suolo di categoria "B"

- La tomografia sismica in onde P eseguita mostra un assetto sub-orizzontale dei litotipi presenti.

Alla luce di quanto esposto, sarà necessario prevedere sia la stabilizzazione della falesia e sia la protezione del piede della stessa dall'aggressione marina.



**Foto 1**



Foto 2



Foto 3



**Foto 4**

Le considerazioni fin qui fatte mostrano che i terreni sulla Terra Ferma interessati dal progetto sono, per i loro caratteri geologici, morfologici, idrogeologici e geotecnici, idonei al progetto.

In prossimità della costa, come già detto, dovranno essere considerati tutti gli aspetti relativi alla stabilità dei versanti della falesia sul mare che sarà attraversata dal cavidotto.

Le indagini marine svolte per la definizione della stratigrafia, la biocenosi e la morfobatimetria del fondale marino hanno messo in evidenza la fattibilità di tutte le opere progettuali ricadenti a mare, così come illustrato nel Cap.: 10. INDAGINI A MARE.

Detto ciò, considerando la natura eterogenea delle litologie rilevate, qualora le condizioni in fase di realizzazione dell'opera lo richiedessero, si consiglia la realizzazione di approfondimenti geognostici di altra natura per verificare l'omogeneità e le proprietà dei terreni in posto.

Bari, Dicembre 2022

Il Geologo

Dott. Mario Frate