

Regione: PUGLIA  
Provincia: BRINDISI  
Comune: BRINDISI

## IMPIANTO AGROFOTOVOLTAICO DELLA POTENZA NOMINALE DI 50,62 MWp

CODICE IDENTIFICATIVO PRATICA AUTORIZZAZIONE UNICA REGIONALE: 1G8YS61

**BETA LIBRA S.r.l.**  
Via Mercato, 3  
20121 Milano (MI)  
P.IVA: 11039750960

Titolo dell'Elaborato:  
**RELAZIONE GEOTECNICA**

Denominazione del file dell'Elaborato:  
**REL 11.pdf**

Elaborato:

**REL11**

Relatore:

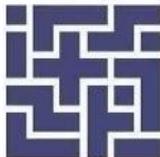
Dott.ssa Geol. Silvia Ciurlia  
Via M. Bernardini n.9  
73100 Lecce  
Mail: studiociurlia@gmail.com  
PEC: studiociurlia@epap.sicurezza postale.it

Visti / Firme / Timbri:



### SVILUPPO PROGETTO

NEXTA PROJECT HOLDCO  
2 Hilliards Court, Chester Business Park  
Chester, United Kingdom, CH4 9PX



APULIA ENERGIA S.r.l.  
Via Sasso, 15  
72023 Mesagne (BR)



Scala N.A.

Data	Revisione	DESCRIZIONE	Elaborazione	Verifica e controllo
01.07.2021	0	PRIMA EMISSIONE	Dott.ssa Silvia Ciurlia	Dott.ssa Silvia Ciurlia
<b>REVISIONI</b>				

## Sommario

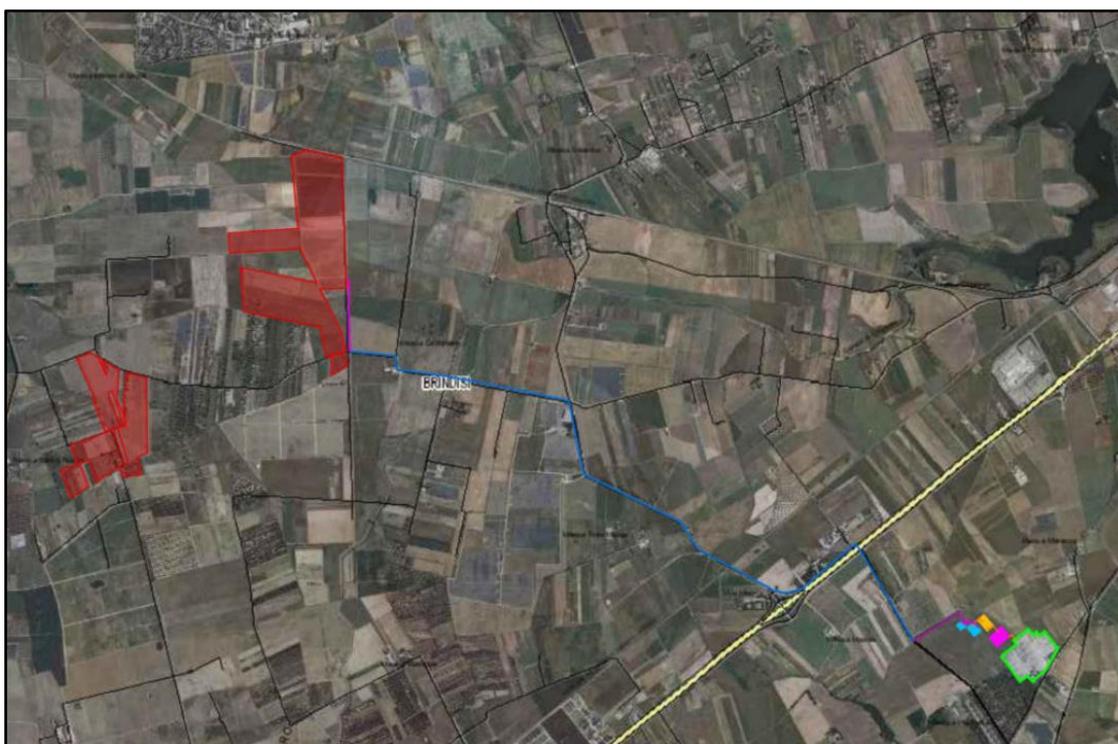
---

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>NORMATIVA DI RIFERIMENTO.....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>INQUADRAMENTO GEOLOGICO .....</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>CARATTERISTICHE GEOMORFOLOGICHE.....</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>CONFORMITÀ DELL'INTERVENTO CON IL PAI (PIANO DI BACINO PER L'ASSETTO IDROGEOLOGICO) .....</b>	<b>11</b>
<b>6</b>	<b>INDAGINI ESEGUITE - SISMICA A RIFRAZIONE .....</b>	<b>14</b>
6.1	CENNI SUL METODO .....	14
6.2	PROFILI SISMICI .....	16
<b>7</b>	<b>MODELLO LITOSTRATIGRAFICO DEL SOTTOSUOLO E PARAMETRI CARATTERISTICI DEL TERRENO .....</b>	<b>36</b>
<b>8</b>	<b>CARATTERIZZAZIONE SISMICA DELL'AREA .....</b>	<b>42</b>
8.1	PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE AI SENSI DELLE NTC .....	42
8.2	CONDIZIONI TOPOGRAFICHE .....	43
8.3	VALUTAZIONE DEI PARAMETRI SISMICI AI SENSI DELLE NTC.....	44
8.4	CLASSIFICAZIONE SISMICA .....	45
<b>9</b>	<b>CAPACITA' PORTANTE DEI DEPOSITI CHE CONDIZIONANO LE FONDAZIONI .....</b>	<b>47</b>

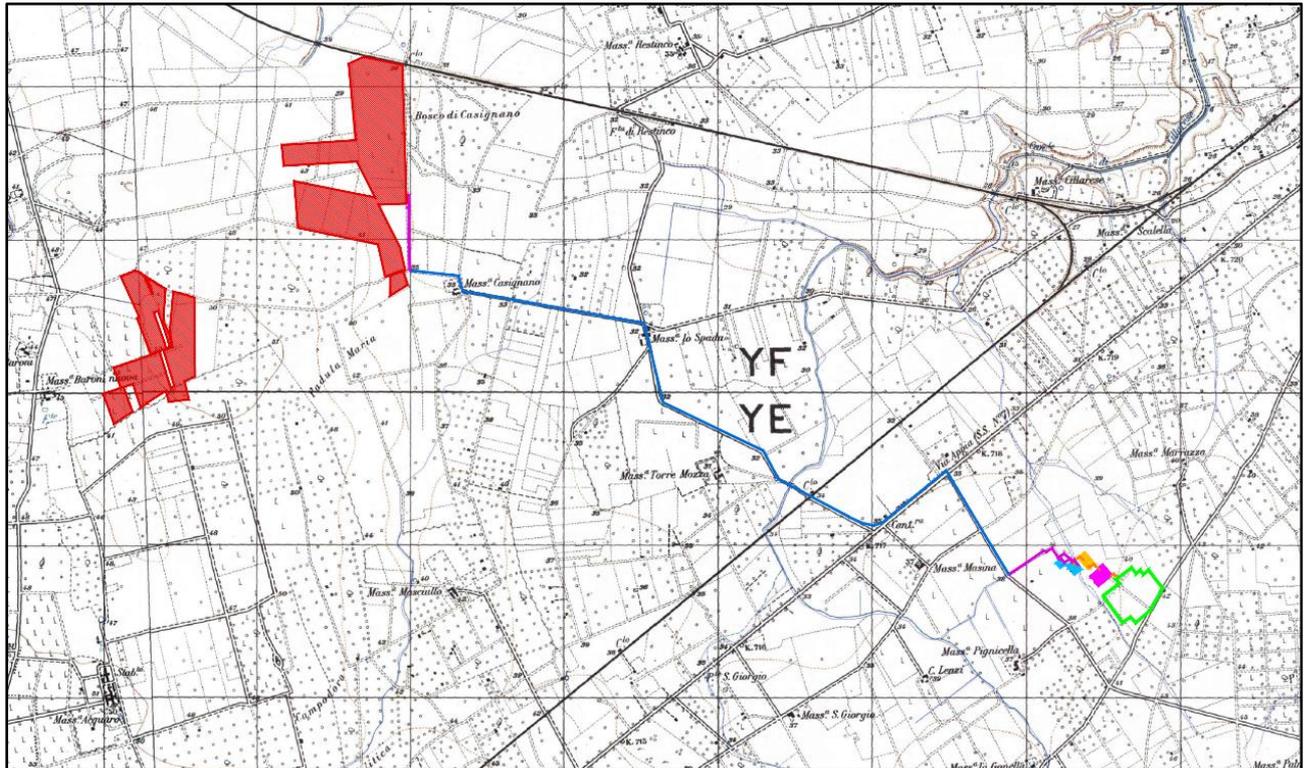
# 1 INTRODUZIONE

Con la presente la sottoscritta Dott.ssa Geol. Silvia Ciurlia ha redatto uno Studio Sismico ad orientamento Geotecnico nell'ambito del progetto per la realizzazione e messa in esercizio di un Impianto Agrofotovoltaico della potenza nominale di 50,62 MWp integrato sul lato di Media Tensione da un Sistema di Accumulo della potenza di 10 MW (41,60 MWh) in agro del Comune di Brindisi (BR), con impianti di utenza, inclusa la necessaria Sottostazione Elettrica Utente (SSEU) di elevazione M.T./A.T., e di rete per la connessione alla Rete di Trasmissione Nazionale (RTN) ricadenti anch'essi nel Comune di Brindisi (BR). La Società BETA LIBRA S.r.l., con sede in Via Mercato, 3 – 20121 Milano (MI), risulta soggetto Proponente.

L'intera area di realizzazione dell'impianto di produzione, ricadente nel territorio del Comune di Brindisi (BR), ha una superficie lorda di circa 893.000 m<sup>2</sup> e si trova a circa 6 km ad OVEST del relativo centro abitato. Essa è ubicata nello specifico in Zona E – Agricola del vigente PRG del Comune medesimo. Tale area, essendo formata da terreni non necessariamente contigui, è stata scomposta, anche dal punto di vista impiantistico in due Aree: Area 1 ed Area 2, come rappresentato negli specifici elaborati planimetrici. Le figure 1A e 1B rappresentano l'area dell'impianto di produzione e le opere infrastrutturali di distribuzione e per la connessione ad esso correlate:



**FIG 1A** - Localizzazione dell'area di intervento su ortofoto



**FIG 1B** - Localizzazione dell'area di intervento su IGM 1:25000

La connessione dell'impianto alla RTN avverrà su uno Stallo assegnato da TERNA S.p.A. nell'ampliamento della sezione a 150 kV della Stazione Elettrica RTN "BRINDISI", grazie ad un apposito accordo di condivisione dello Stallo medesimo tra più Produttori, inclusa la Proponente. L'intera opera consiste dunque nell'impianto di produzione agrofotovoltaico, nell'elettrodotto di vettoriamento dell'energia elettrica in M.T., nel Sistema di Accumulo e negli impianti di utenza per la connessione (Sottostazioni Elettriche Utente in condivisione, collegamenti in A.T.) e di rete per la connessione (Ampliamento della Stazione Elettrica RTN e Stallo in Stazione Elettrica RTN)

Per le informazioni progettuali di dettaglio si rimanda alla documentazione tecnica specifica prodotta

## 2 **NORMATIVA DI RIFERIMENTO**

Le indagini condotte hanno avuto l'obiettivo di analizzare le interazioni intercorrenti tra opere e terreno, inteso come ambiente geologico, idrogeologico e geomorfologico, al fine di fornire un insieme di elementi, sia qualitativi che quantitativi, necessari alla corretta realizzazione delle opere previste dal progetto. L'analisi geologica si è articolata in riferimento a quanto previsto dall'art.27 del D.P.R. 554/99; per ciò che riguarda l'analisi geologico-sismica ad orientamento geotecnico si è fatto riferimento alle seguenti normative:

- D.M. LL.PP. del 11/03/1988;
- Legge 18 maggio 1989 n.183 - “Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo”;
- O.P.C.M. 3274/2003;
- D.G.R. della Puglia 2 marzo 2004, n. 153, in materia di “L.R. 20/00 - O.P.C.M. 3274/03 - Individuazione delle zone sismiche del territorio regionale e delle tipologie di edifici ed opere strategici e rilevanti - Approvazione del programma temporale e delle indicazioni per le verifiche tecniche da effettuarsi sugli stessi” e ss.mm.ii;
- D.M. 14 gennaio 2008 - Nuove Norme Tecniche Per Le Costruzioni;
- D.M. 17 gennaio 2018 – Aggiornamento delle Norme Tecniche per le costruzioni;
- Circolare applicativa NTC 2018 del 21 gennaio 2019, n.7

### **3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO**

L’assetto geologico e strutturale ad ampia scala è rappresentato da potenti successioni carbonatiche di origine marina costituite da strati e banchi di calcari e dolomie del Cretaceo. Tali successioni, che rappresentano i depositi più antichi dell’area, comprendono (secondo la Carta Geologica d’Italia alla scala 1:100.000 (foglio 203 “Brindisi”) le Dolomie di Galatina e l’unità dei Calcari di Melissano. Per le analogie nei caratteri di litofacies e in accordo con la bibliografia geologica più recente (sensu Ricchetti 1988) quest’ultima formazione verrà indicata nel presente studio con il termine Calcari di Altamura.

Ai depositi cretacei si addossano lungo le scarpate, o si sovrappongono, in trasgressione, sedimenti miocenici terrigeni, tra loro parzialmente eteropici, costituiti dalla cosiddetta “Pietra leccese” e dalle Calcareniti di Andrano. Notevole diffusione hanno anche sedimenti pliocenici e pleistocenici, sia in facies costiera che continentale, rappresentati principalmente dalle Sabbie di Uggiano e dalle Calcareniti di Gravina (sensu Ricchetti 1988) (o Calcareniti del Salento (sensu CGI 1968)), anch’essi trasgressivi sui depositi più antichi. I depositi continentali olocenici sono in genere rappresentati da lembi poco estesi e potenti (sabbie, depositi eluviali e di “terra rossa”), crescenti in spessore e ampiezza procedendo verso la fascia costiera.

Il quadro geologico attuale è il risultato degli eventi tettonici che si sono succeduti a partire dal Cretaceo e che a più riprese hanno interessato l’intera Penisola Salentina. Il basamento carbonatico della penisola salentina, che come già detto in precedenza, è costituito dai Calcari di Altamura, rappresenta il settore della piattaforma apula che ha subito la maggiore attività tettonica. La penisola salentina ha

subito una tettonica distensiva dando origine ad un sistema di faglie all'interno del basamento, e generando un sistema strutturale di dorsali e depressioni tettoniche tipo horst e graben di varia grandezza ed estensione. Tali strutture hanno un andamento prevalentemente orientato in direzione Nord Ovest – Sud Est, e morfologicamente corrispondono, rispettivamente, alle attuali “serre salentine” e alle depressioni che le separano.

Nel Miocene, i movimenti tettonici hanno riportato in condizioni di sommersione le terre emerse, favorendo la sedimentazione di estesi corpi calcarenitici. Le fasi tardo mioceniche e plioceniche hanno riattivato le faglie cretacee interessando anche i terreni del Miocene. Nel corso di questi due ultimi periodi e del Pleistocene inferiore, ripetuti fenomeni di subsidenza e innalzamento hanno portato più volte ampie zone del Salento al di sotto e al di sopra del livello marino, determinando, rispettivamente, la deposizione di materiali terrigeni e l'erosione delle coperture più recenti. Nel Pleistocene medio una nuova fase tettonica ha conferito alla regione una configurazione simile all'attuale, mentre i fenomeni di ingressione e regressione marina conseguenti alle fasi glaciali (in particolare del Riss e del Wurm) hanno determinato il deposito dei sedimenti costieri in aree marginali.

Dal punto di vista litostratigrafico l'area del Comune di Mesagne e dei comuni limitrofi risulta costituita, dal basso verso l'alto, dai seguenti litotipi:

#### Depositi marini

- Calcari di Altamura (Turoniano sup. –Maastrichtiano)
- Calcarenite di Gravina (Pliocen sup.- Pleistocene inf.)
- Argille Subappennine (Pleistocene inf.)
- Depositi Marini Terrazzati (pleistocene med.-sup.)

#### Depositi continentali

- Coltre eluvio-colluviale (Olocene)

#### Calcari di Altamura

La formazione dei Calcari di Altamura è costituita prevalentemente da calcari bioclastici di colore chiaro, talora biancastro, compatti e a frattura irregolare. Associati ad essi si rinvengono calcari più scuri, calcari chiari subcristallini a frattura concoide e calcari detritici o leggermente marnosi. A tali litotipi si intercalano in modo irregolare calcari dolomitici color nocciola e subcristallini, con subordinate dolomie calcaree. Tali intercalazioni sono particolarmente evidenti nella zona a Nord del centro urbano di Nardò. Dal punto di vista petrografico, i calcari in oggetto sono costituiti prevalentemente da micriti più o meno fossilifere, talora dolomitizzate, e da subordinate biomicriti.

Il contenuto macropaleontologico è scarso; sono presenti gusci e frammenti di rudiste, in particolare *Apricardia carantonensis* (D'ORB.), e rari *Cerithium*, *Pecten*, *Cardium*. Il contenuto di carbonato di calcio subisce in genere deboli oscillazioni e può arrivare al 98-99% nei calcari, nelle dolomie calcaree invece scende fino al 60%. La stratificazione è sempre evidente, ad eccezione dei casi in cui sia presente uno sviluppato carsismo superficiale. Gli strati presentano una potenza variabile da circa 15-20 cm all'ordine del metro. Talora si nota una evidente laminazione parallela, come, ad esempio, in alcuni affioramenti della Serra di Nardò. L'ambiente di sedimentazione è di piattaforma carbonatica interessata da limitate ed episodiche emersioni. Il limite inferiore non è affiorante; il limite superiore è inconforme e discordante con le formazioni più recenti.

#### *Calcareniti di Gravina*

Depositi calcarenitici e calciruditi bioclastici di ambiente litorale. La formazione è direttamente trasgressiva sui calcari cretaci. Sono localmente rappresentate da calcareniti e calciruditi passanti a materiali sabbiosi con inclusi ciottoli che si rinvergono in spessori molto esigui. Al contatto con i calcari spesso si trovano abbondanti affioramenti di materiali residuali rossastri (terre rosse) testimoni di una lunga fase di emersione che ha preceduto la trasgressione marina quaternaria.

#### *Argille Subappenniniche*

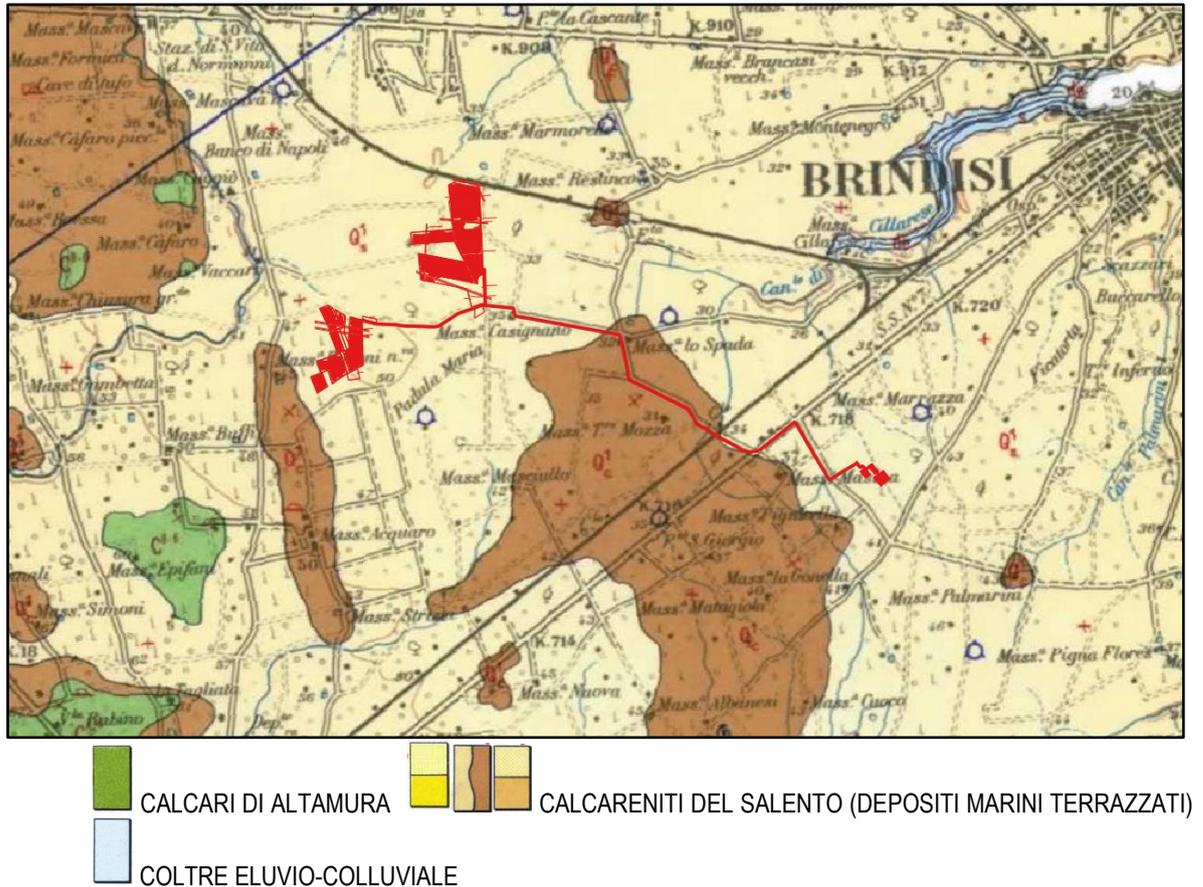
Argille limose, argille sabbiose ed argille marnose di colore grigio-azzurro, subordinatamente giallastre con sparsi, nella parte alta, ciottoli di natura calcarea o calcarenitica. Questi depositi poggiano in continuità di sedimentazione sulle Calcareniti di Gravina e localmente giacciono, lungo superfici trasgressive, direttamente sui depositi mesozoici del Calcarea di Altamura. Questi depositi non affiorano e si trovano in estese aree nel sottosuolo. Dati litostratigrafici desunti da sondaggi e pozzi eseguiti nell'area confermano la presenza al di sotto dei Depositi Marini Terrazzati. Le Argille subappenniniche rappresentano il substrato impermeabile che sostiene l'acquifero superficiale della Piana di Brindisi. Da studi realizzati si è stimato che nell'area del Comune di Latiano lo spessore di questa formazione può arrivare a 10 m.

#### *Depositi marini terrazzati*

I Depositi marini terrazzati sono costituiti essenzialmente da alternanze di sabbie quarzose giallastre e calcareniti organogene localmente a carattere litoide con a tratti intercalazioni di strati conglomeratici. Giacciono lungo superfici di abrasione marina individuate nei depositi argillosi e calcarenitici del ciclo della Fossa Bradanica e nei calcari mesozoici. In questa unità ha sede l'acquifero superficiale, generalmente sostenuto dai depositi argillosi impermeabili sottostanti. I depositi marini terrazzati affiorano nell'area di intervento (Fig.2).

### Coltre Eluvio-Colluviale

La coltre eluvio-colluviale è caratterizzata dalla presenza di terre rosse argillose, depositi alluvionali e palustri, sabbioso terrosi e subordinatamente ciottolosi di età via via più recente in relazione alla diminuzione di quota. Nei depositi più antichi sono frequenti resti scheletrici di mammalofaune (*Elephas* sp., *Rinocertus* sp., *Equus* sp., *Bos* sp.). Lo spessore è variabile da qualche metro fino ad una decina di metri.



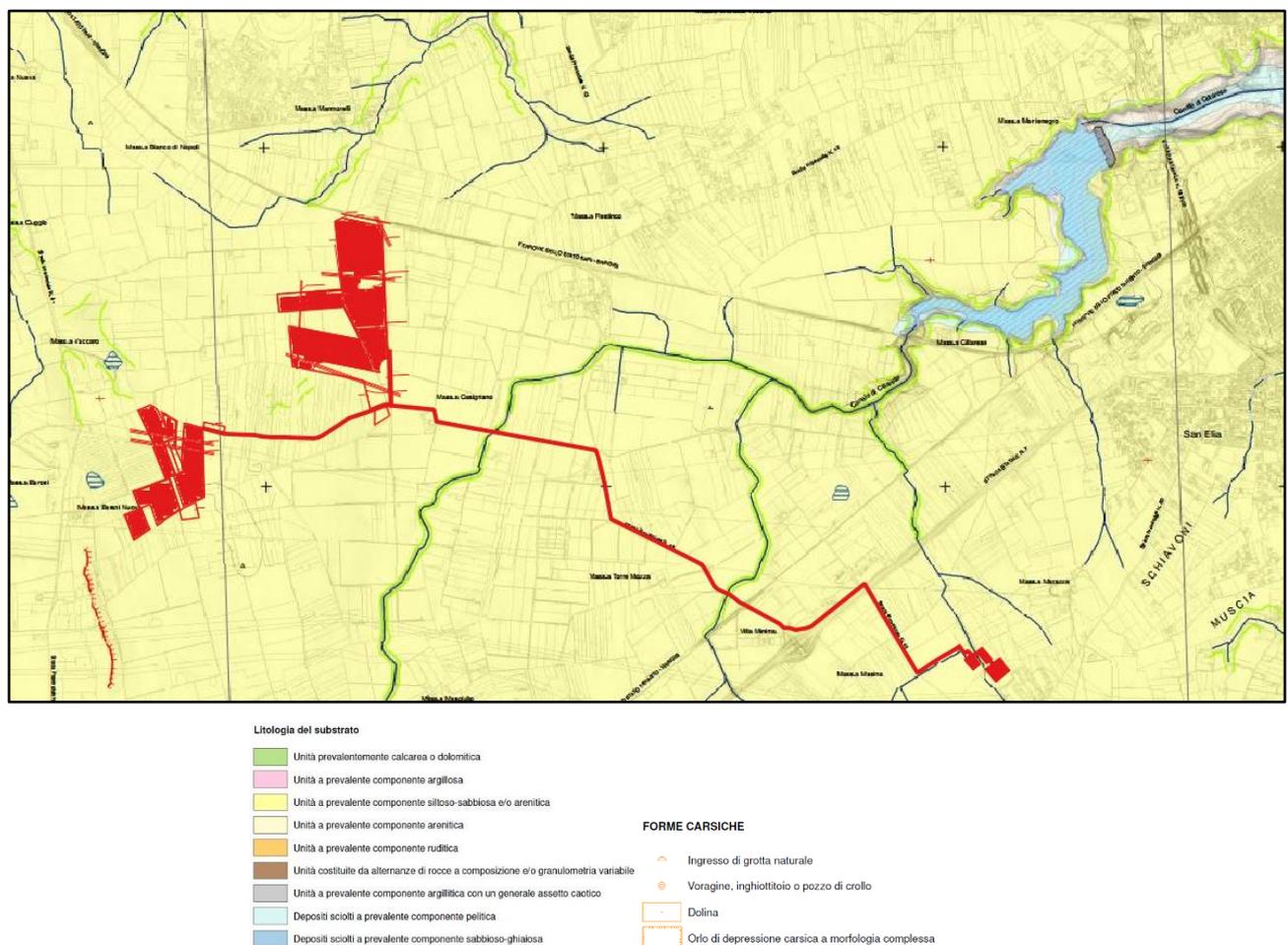
**FIG 2** – Stralcio della Carta Geologica alla scala 1:100000, foglio 203 "Brindisi". In colore rosso l'intervento

## 4 CARATTERISTICHE GEOMORFOLOGICHE

Il territorio comunale di Brindisi è ubicato nella parte orientale dell'altopiano murgiano e si estende nell'area al limite tra la porzione nord-occidentale delle Murge Tarantine e quella sudorientale delle Murge Baresi. La morfologia di questo settore pugliese è caratterizzata dalla presenza di dorsali, alture ed altipiani, che raramente si elevano a più di poche decine di metri sulle aree circostanti e che prendono il nome di "Serre". La fisiografia generale è controllata dalle caratteristiche tettoniche e strutturali dei terreni affioranti. In particolare le zone rilevate coincidono con alti strutturali di origine disgiuntiva

(horst) e plicativa (pieghe anticlinali), delimitati da scarpate morfologiche impostate sui piani di faglia o sui fianchi delle anticlinali, ed il cui andamento principale è in direzione NW- SE. I terreni più giovani, datati al Pleistocene ed all'Olocene, sono di natura alluvionale e di spiaggia, riferibili a numerose unità litostratigrafiche; esse occupano le aree più depresse (piana di Brindisi) o poggiano sulle superfici di scarpata morfologica, raccordandosi ad esse e seguendone l'andamento e l'immersione. La presenza di incisioni deboli in un sistema carsico diffuso, costituisce l'unico esempio di idrografia organizzata a regime perenne nel territorio comunale di Mesagne e in quello dei Comuni vicini. Le incisioni fluvio-carsiche minori hanno orientazioni variabili NNO-SSE e Ovest-Est e spesso recapitano le acque in aree cieche o in doline.

Di seguito si riporta uno stralcio della "Carta Idrogeomorfologica " della Regione Puglia, redatta dall'Autorità di Bacino della Puglia (AdB), oggi "Autorità di Bacino del distretto idrografico dell'appennino meridionale – Sede Puglia" (Fig.3). Nell'area oggetto di intervento, sita sud-ovest dell'abitato di Brindisi, gli elementi geomorfologici di rilievo sono rappresentati dalla presenza dall'attraversamento di vari tratti di reticolo in corrispondenza degli elettrodotti, che rimangono comunque confinati nella viabilità esistente.

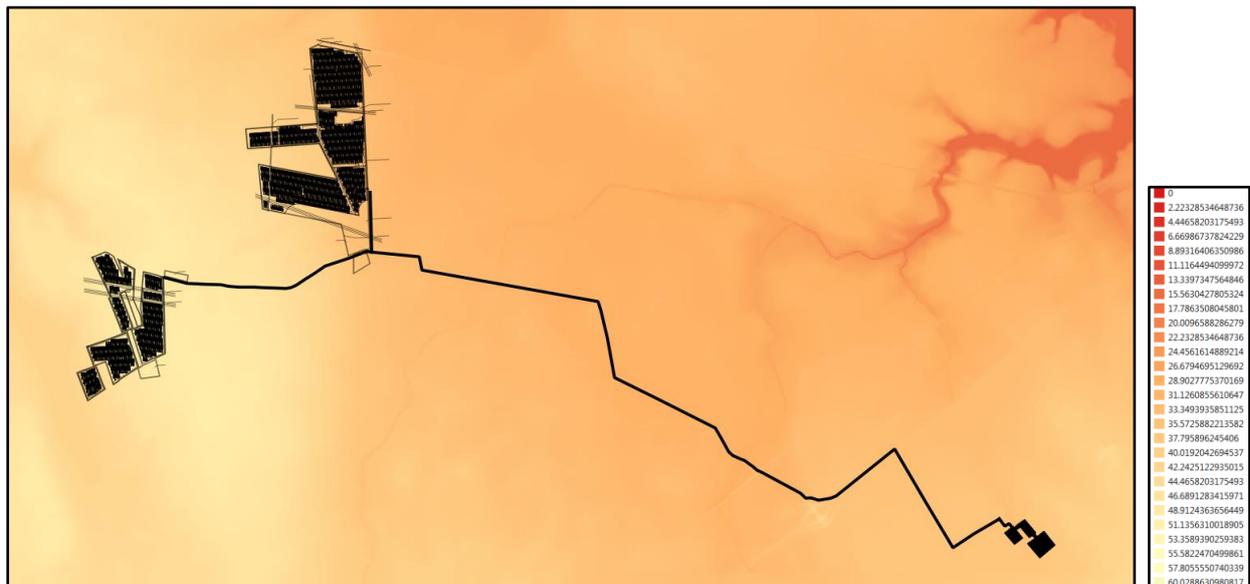




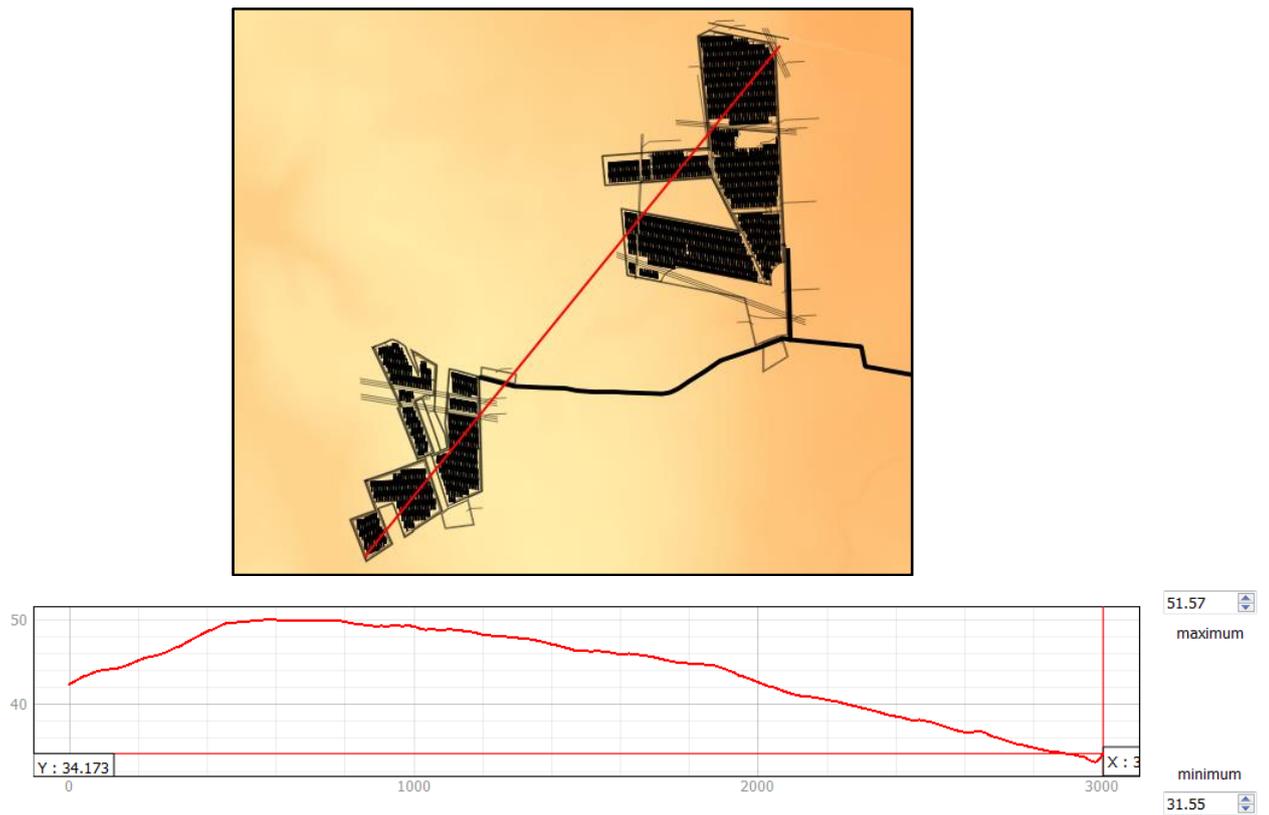
**FIG 3 – Stralcio Carta Idrogeomorfologica Regione Puglia. In colore rosso l'impianto e le opere di connessione**

Dall'analisi delle quote mediante profili altimetrici e carta delle pendenze estrapolati da un modello digitale del terreno (DTM) tramite dati della Regione Puglia, ed elaborato con software GIS, è stato possibile implementare un'analisi geomorfologica del terreno oggetto di intervento e di quelli limitrofi.

Dall'andamento topografico del terreno è possibile verificare come le quote, in corrispondenza e in prossimità dell'area di progetto, tendono a variare da un minimo di 30 m s.l. m.m. ad un massimo di circa 55 m s.l. m.m. (Fig.4 e 5)

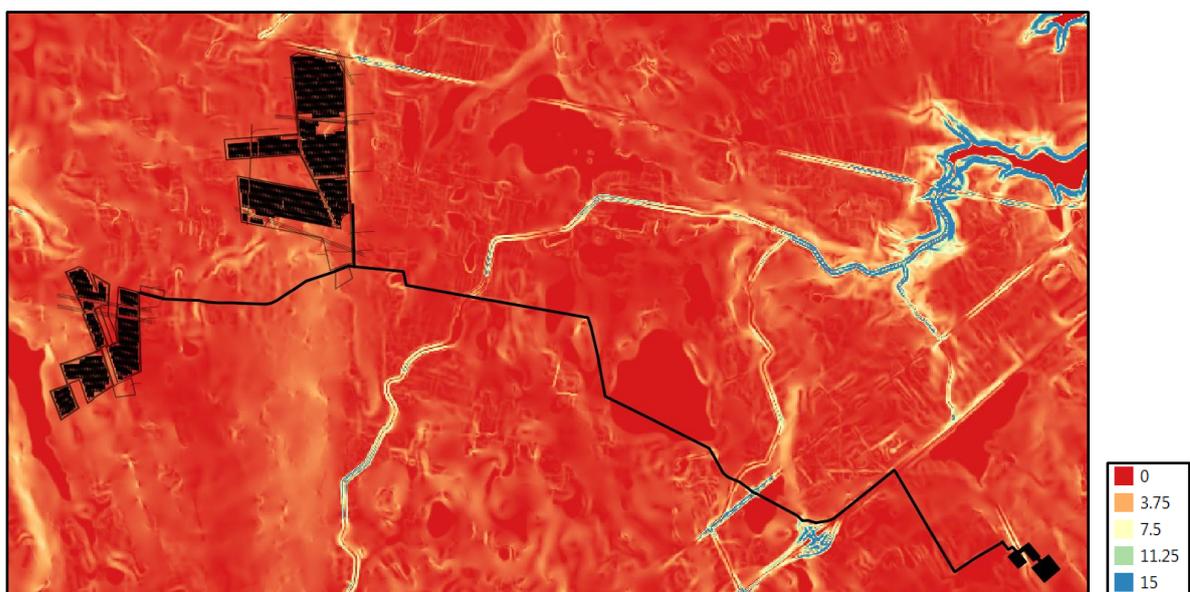


**FIG 4 – Impianto su modello digitale del terreno (DTM)**



**FIG 5** – Andamento topografico del terreno su sezione trasversale nell'area di progetto

Il DTM disponibile è stato utilizzato per l'elaborazione della carta delle pendenze che nell'area di progetto hanno valori inferiori al 10% (Fig.6).



**FIG 6** – Carta delle pendenze nell'area di intervento (valori espressi in %)

## **5 CONFORMITÀ DELL'INTERVENTO CON IL PAI (PIANO DI BACINO PER L'ASSETTO IDROGEOLOGICO)**

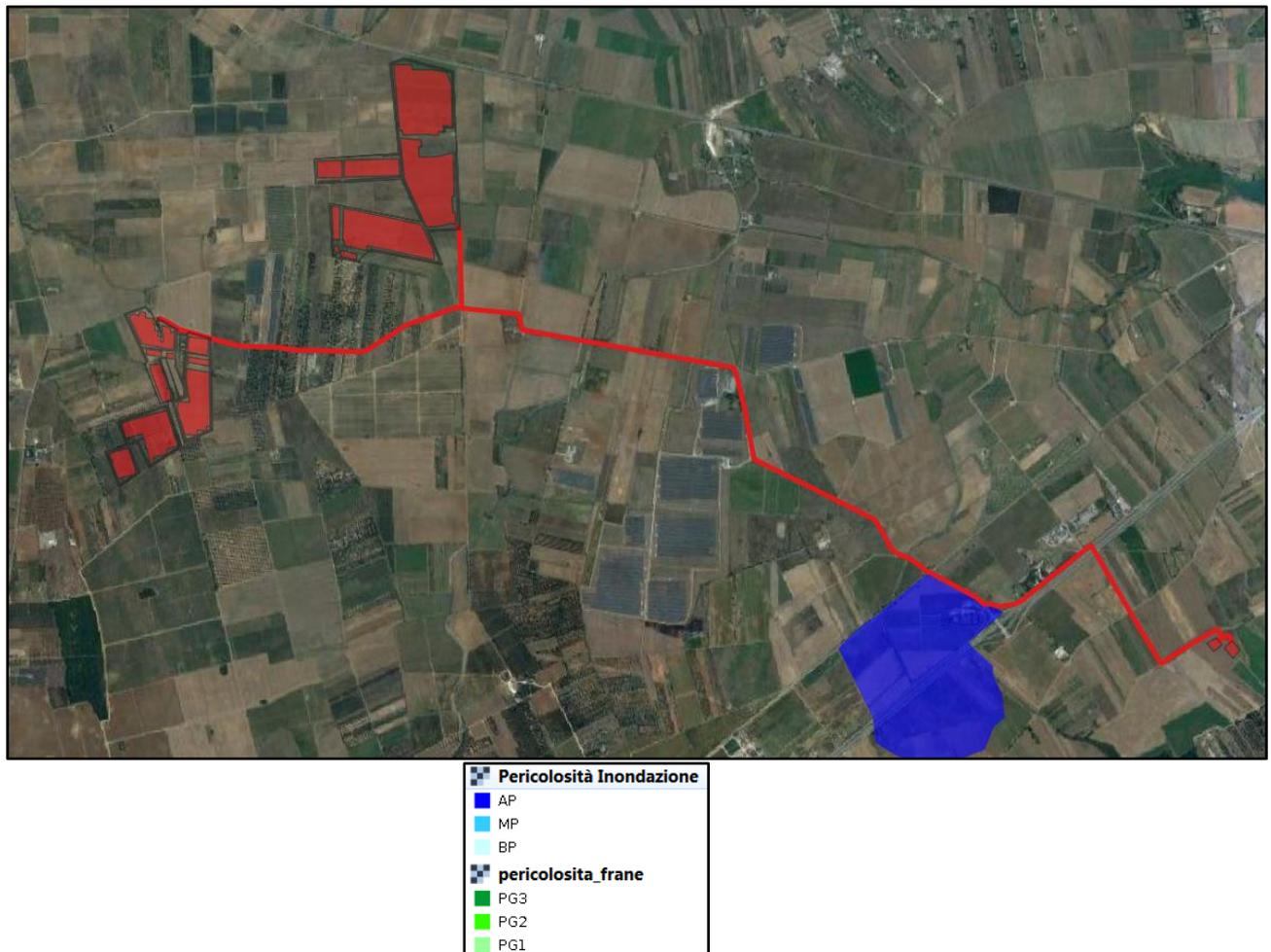
La Regione Puglia, nella veste dell'Autorità di Bacino che ha redatto il PAI (Piano di bacino stralcio per l'Assetto Idrogeologico), ha provveduto alla perimetrazione delle aree a pericolosità/rischio idraulici e geomorfologici. Il Piano di Bacino Stralcio per l'Assetto Idrogeologico dell'Autorità di Bacino della Puglia (PAI), approvato in data 30.11.2005 e successivamente aggiornato con nuove perimetrazioni, è finalizzato al miglioramento delle condizioni di regime idraulico e della stabilità geomorfologica necessario a ridurre gli attuali livelli di pericolosità e a consentire uno sviluppo sostenibile del territorio nel rispetto degli assetti naturali, della loro tendenza evolutiva e delle potenzialità d'uso.

Il PAI costituisce il Piano Stralcio del Piano di Bacino, ai sensi dall'articolo 17 comma 6 ter della Legge 18 maggio 1989, n. 183, ha valore di piano territoriale di settore ed è lo strumento conoscitivo, normativo e tecnico-operativo mediante il quale sono pianificate e programmate le azioni e le norme d'uso finalizzate alla conservazione, alla difesa e alla valorizzazione del suolo ricadente nel territorio di competenza dell'Autorità di Bacino della Puglia, oggi "Autorità di Bacino del distretto idrografico dell'Appennino Meridionale".

Nell'ambito del PAI sono state individuate aree a:

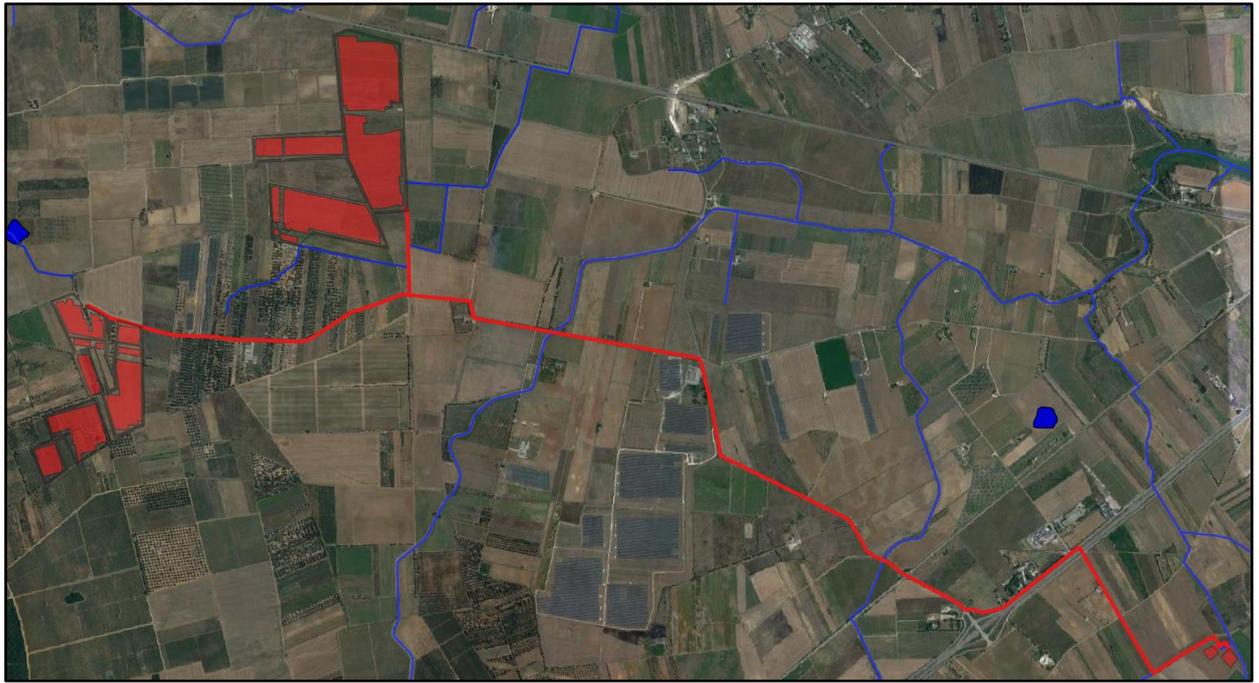
- Alta Pericolosità (AP), Media Pericolosità (MP) e Bassa Pericolosità (BP) idraulica, in funzione dei tempi di ritorno 30, 200 e 500 anni;
- Elevata Pericolosità (PG3), Media Pericolosità (PG<sup>2</sup>) e Moderata Pericolosità (PG1) al dissesto geomorfologico;
- Rischio moderato R1, medio R2, elevato R3, molto elevato R4 in funzione dei danni che sono stati causati e che potrebbero essere causati da fenomeni di allagamento e/o frana.

La zona di progetto non è interessata da perimetrazione di aree soggette a pericolosità idraulica e/o geomorfologica; solo a margine di un tratto di elettrodotto vi è la presenza di un'area ad alta pericolosità idraulica, all'interno della quale non sono previste opere (Fig. 7).

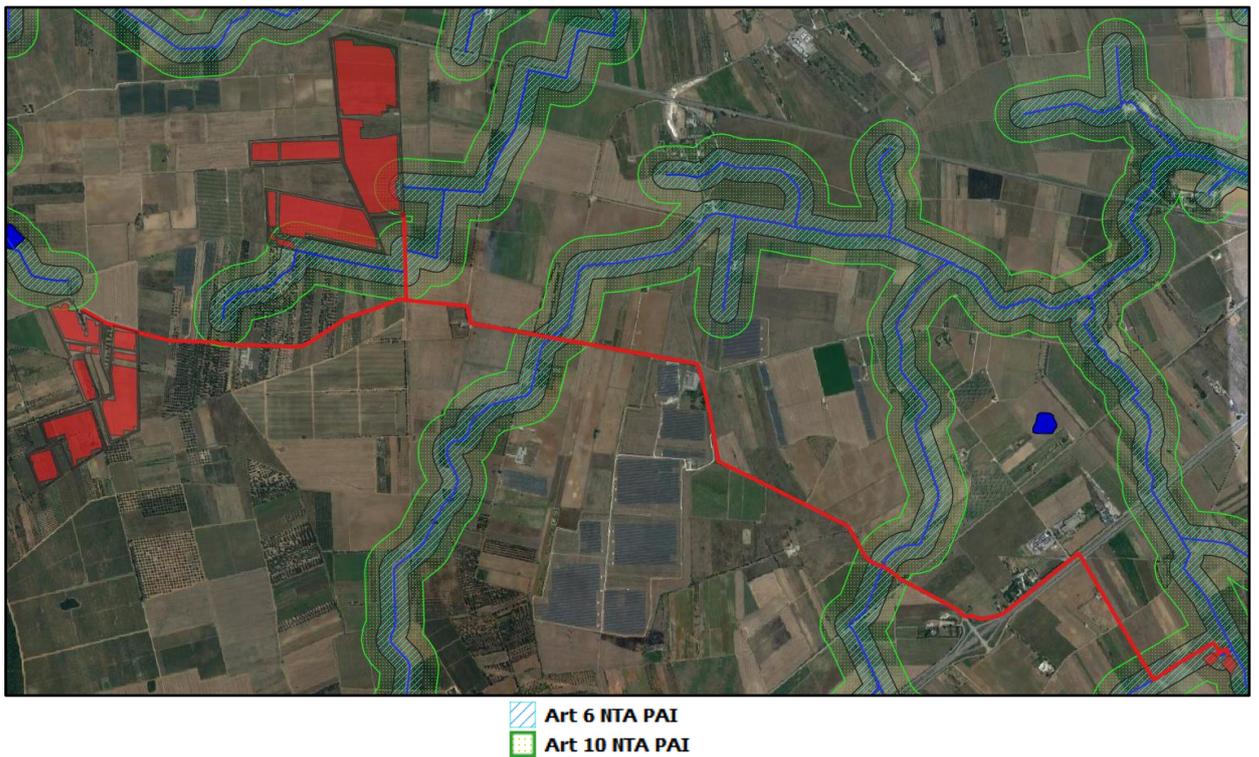


**FIG 7** – Stralcio PAI AdB Distrettuale dell'Appennino Meridionale con la rappresentazione dell'area di intervento e degli elettrodotti

Dalla carta idrogeomorfologica regionale e dalla cartografia del piano paesaggio comunale (Fonte: SIT Brindisi) è evidente la presenza di un reticolo idrografico in prossimità e in corrispondenza di alcune opere progettuali (Fig.8). Con riferimento alle NTA del PAI, applicando i relativi buffer di 75 m per la definizione dell'alveo fluviale in modellamento attivo e aree golenali (Art. 6 delle NTA) e di ulteriori 75 m per le fasce di pertinenza fluviale (Art. 10 delle NTA), si ottengono le fasce di sovrapposizione come rappresentato in Fig.9. Con riferimento alle NTA, nei primi 75 m vige un vincolo di inedificabilità, mentre nei successivi 75 m la realizzazione di interventi è possibile, previa verifica della sicurezza idraulica in uno studio di compatibilità idrologica-idraulica subordinato al parere favorevole di ADB.



**FIG 8** – Reticolo idrografico in prossimità del lotto di impianto



**FIG.9** – Art.6 e Art.10 delle NTA del PAI in prossimità del lotto di intervento di impianto

## 6 INDAGINI ESEGUITE - SISMICA A RIFRAZIONE

### 6.1 CENNI SUL METODO

Il metodo di esplorazione sismica utilizza la propagazione delle onde meccaniche per caratterizzare le proprietà elastiche del sottosuolo e quindi la geometria dei mezzi attraversati. La tecnica di base consiste nel generare delle onde meccaniche, mediante sorgenti poste in punti opportunamente scelti sulla superficie topografica, e nel misurare i tempi impiegati dalle perturbazioni elastiche per raggiungere i geofoni, anch'essi opportunamente posizionati sulla superficie topografica. In particolare, l'esplorazione eseguita con il metodo della rifrazione si basa sull'analisi del tempo di arrivo dell'onda diretta e delle onde di testa; queste ultime sono onde rifratte che si determinano nel caso in cui la velocità di propagazione delle onde è crescente con la profondità, quando l'angolo di incidenza è critico.

L'obiettivo principale del metodo sismico tomografico a rifrazione è quello di determinare la velocità e le sue variazioni nel mezzo indagato, utilizzando i tempi di viaggio ottenuti da un rilievo di sismica a rifrazione. La relazione tra velocità dell'onda sismica e tempi di viaggio del raggio sismico è, per un set di  $M$  raggi:

$$\delta \mathbf{t} = \mathbf{A} \delta \mathbf{v} \quad (1)$$

dove  $\delta \mathbf{t}$  è il vettore dei tempi di viaggio residui ( $t_{\text{osservati}} - t_{\text{calcolati}}$ ),  $\mathbf{A}$  è la matrice Jacobiana  $\partial t_i / \partial v_j$ , e  $\delta \mathbf{v}$  è il vettore velocità di perturbazione.

Un approccio alternativo è quello che introduce il concetto di lentezza dell'onda. Se si definisce la lentezza dell'onda come  $u(x) = v^{-1}(x)$ , allora la (1) diventa:

$$\mathbf{t} = \mathbf{A} \mathbf{u} \quad (2)$$

dove  $\mathbf{t}$  è il vettore dei tempi di viaggio osservati,  $\mathbf{A} = dl_{ij}$  matrice delle lunghezze dei percorsi parziali e  $\mathbf{u}$  = vettore dei valori della lentezza. Gli elementi  $A_{ij}$  rappresentano la lunghezza del percorso dell' $i$ -esimo raggio nella  $j$ -esima cella.

L'individuazione dei valori della velocità di propagazione delle onde elastiche nel mezzo attraversato consentono una caratterizzazione del mezzo stesso attraverso i parametri  $\Gamma$  (densità lineare di frattura),  $C$  (densità di frattura) e RQD (Rock Quality Designation).

Se si considera un sistema in  $R$  differenti set di fratture con orientazioni diverse; scegliendo il set  $j$ -esimo e il profilo perpendicolare alla direzione delle fratture di tale set, si definisce densità lineare di frattura  $\Gamma$  il numero di fratture presenti per unità di lunghezza lungo il profilo stesso.

Un altro parametro della roccia fratturata che può essere usato per caratterizzare il suo stato meccanico ed idraulico, è la densità di frattura  $C$  definita come:

$$C = \frac{\Gamma}{\langle \cos \theta_j \rangle (1 - \ln r_{\min})}$$

dove  $\theta_j$  è l'orientazione del  $j$ -esimo set di fratture rispetto alla perpendicolare, verso il basso, al profilo preso in considerazione ( $\theta = 0^\circ$  per fratture verticali),  $\langle \cdot \rangle$  denota il valore medio,  $\Gamma$  è la densità di frattura lineare,  $r_{\min}$  è la lunghezza della frattura più piccola.

Un altro parametro importante è il fattore di qualità della roccia RDQ (Rock Quality Designation), definito come il rapporto tra la somma delle distanze (superiori a 10 cm) fra le fratture lungo il profilo, e la lunghezza del profilo stesso; tale rapporto è espresso in termini percentuali. Questo "indice di qualità", può fornire una valutazione preliminare delle principali caratteristiche fisiche e meccaniche di una formazione rocciosa (Tab.1).

RDQ %	QUALITA' DELLA ROCCIA
0-25	Molto scadente
25-50	Scadente
50-75	Discreta
75-90	Buona
90-100	Eccellente

TAB. 1 Classificazione della qualità della roccia secondo l'indice RDQ

Esistono delle relazioni empiriche che legano i parametri di frattura di una formazione rocciosa alle velocità di propagazione delle onde P ed S. Per questo motivo, note le velocità di propagazione delle onde elastiche nel sottosuolo è possibile stabilire la qualità di una formazione rocciosa.

Attraverso l'utilizzo delle velocità di propagazione delle onde P ed S, è anche possibile stimare i valori di densità di massa ( $\rho$ ) delle formazioni rocciose indagate. La relazione empirica utilizzata per la stima di  $\rho$  è:

$$\rho = 0.23V_p^{0.25}$$

Con le formule di seguito è possibile il calcolo del coefficiente di Poisson ( $\sigma$ ), del modulo di Young (E) e del modulo di taglio (G).

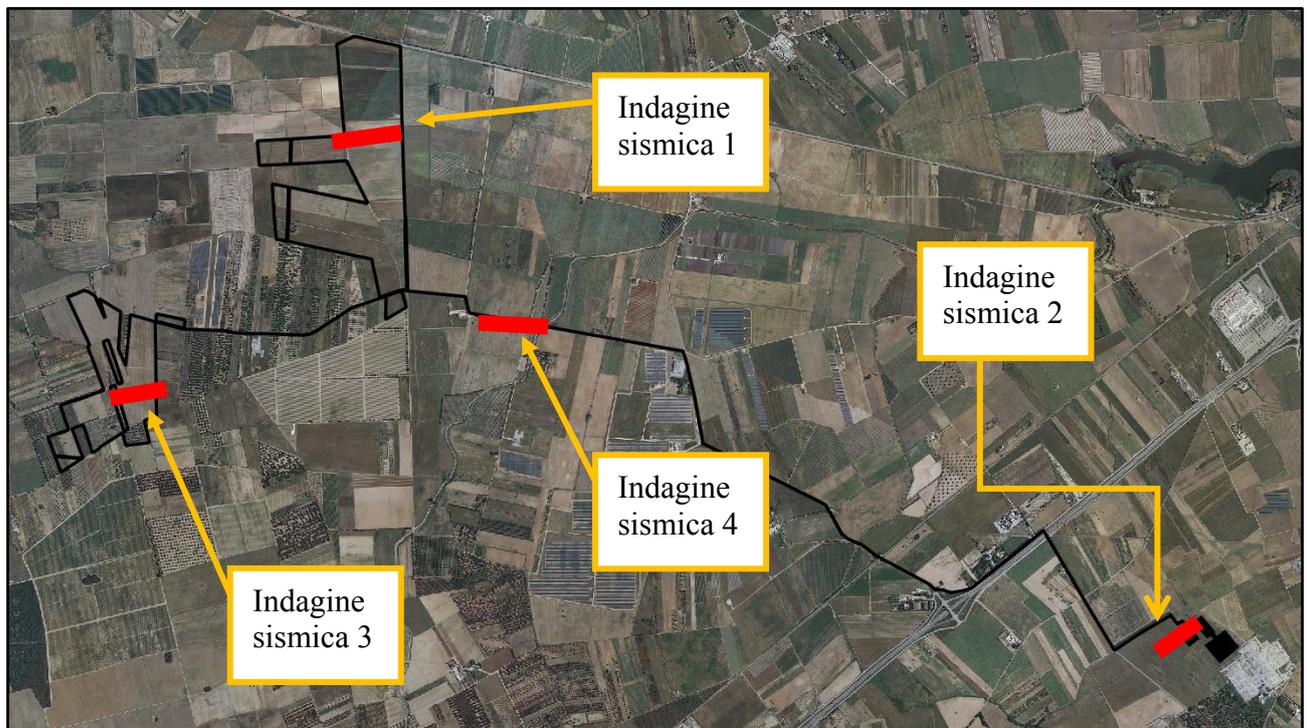
$$\sigma = \frac{0.5 \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1}{\left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1}$$

$$E = 2\rho V_p^2 (1 + \sigma)$$

$$G = \rho V_s^2$$

## 6.2 PROFILI SISMICI

Per indagare gli strati formazionali presenti nel terreno oggetto di intervento, sono stati presi in considerazione quattro profili sismici a rifrazione effettuati in corrispondenza dell'area di intervento e dell'elettrodotto (Fig.10). I profili sono rappresentativi dell'intera area progettuale, caratterizzata da una successione stratigrafica e un substrato roccioso pressoché omogeneo.



**FIG.10** – Ubicazione Indagini su ortofoto (linee di colore rosso)



**FIG 11 – Foto Indagine**



**FIG 12 – Foto Indagine**



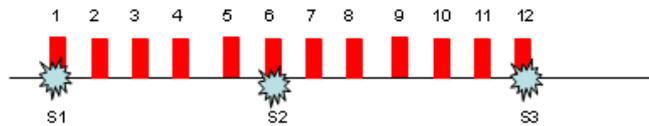
**FIG 13** – Foto Indagine



**FIG 14** – Foto Indagine

Le indagini sono state eseguite con un sismografo Doremi con 12 canali e geofoni verticali con frequenza propria di 4.5Hz; l'energizzazione è stata eseguita con un martello da 5kg. Scopo delle indagini era mettere in evidenza possibili variazioni del campo di velocità dell'onda P eventualmente correlabili ai parametri caratterizzanti una formazione rocciosa. Per tentare di stimare la distribuzione di  $V_p$  è stata utilizzata una tecnica di acquisizione tomografica che fa uso di una opportuna disposizione in superficie di  $n$  geofoni ed  $m$  sorgenti. La geometria scelta per l'acquisizione è stata organizzata

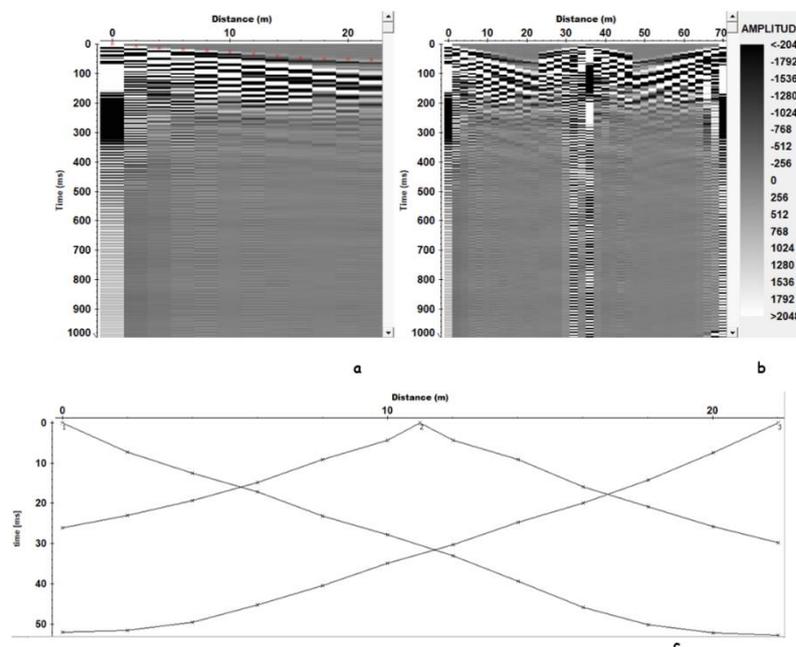
mediante un allineamento di 12 geofoni distanti tra di loro 3m: sull'allineamento sono stati posizionati  $n=3$  punti di energizzazione (Fig. 15). La tecnica di acquisizione ha consentito di determinare la velocità media di propagazione in ognuna delle  $N$  ( $N \leq nxm$ ) celle elementari occupanti la superficie indagata.



**FIG. 15** - Geometria di acquisizione del rilievo sismico tomografico a rifrazione: geofoni: 1, 2,....., 12; punti di energizzazione S1, S2, S3.

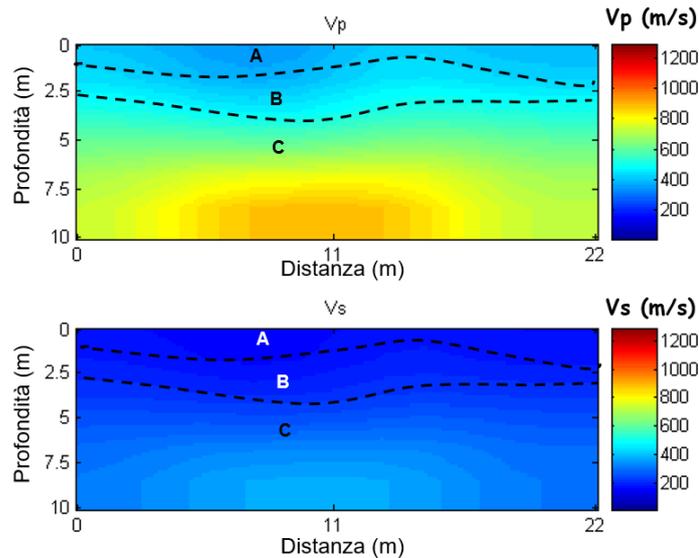
### Indagine sismica 1

La lettura dei tempi di primo arrivo (picking) (Fig. 16b), per ogni traccia, su ciascun sismogramma (Fig.16a), ha generato le dromocrone riportate in Fig.16c.



**FIG. 16** - a) sismogrammi delle 3 energizzazioni; b) esempio di picking dei primi arrivi; c) Dromocrone relative al profilo sismico.

L'elaborazione delle dromocrone mediante algoritmi sofisticati ha permesso il raggiungimento del modello di distribuzione delle velocità  $V_p$  e  $V_s$  (Fig. 17).



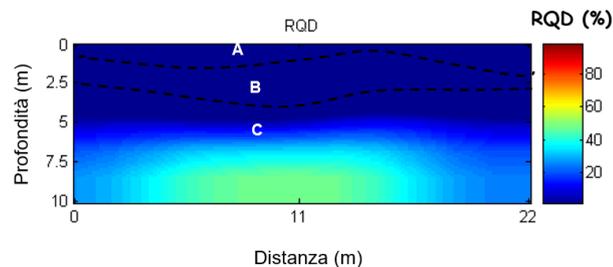
**FIG.17** - Modello di distribuzione delle velocità  $V_p$  e  $V_s$  a varie profondità.

Interpretando la Fig. 17 si evince che i valori di  $V_p$  sono generalmente compresi tra 300m/s e 1100 m/s mentre valori di  $V_s$  sono generalmente compresi tra 200m/s e 600m/s.

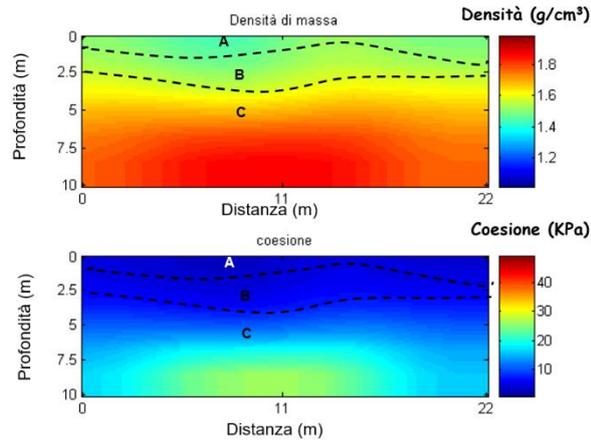
In particolare è possibile distinguere

- Strato "A":  $V_p=300\text{m/s}$  ( $V_s=200\text{m/s}$ ); strato superficiale da 0.8m a 1.2m circa di profondità;
- Strato "B":  $500 < V_p < 700\text{m/s}$  ( $300 < V_s < 400\text{m/s}$ ); probabile presenza di materiale compatto da 2.5m a 4.0m circa di profondità;
- Strato "C":  $800 < V_p < 1100\text{m/s}$  ( $500 < V_s < 600\text{m/s}$ ); probabile presenza di materiale piú compatto.

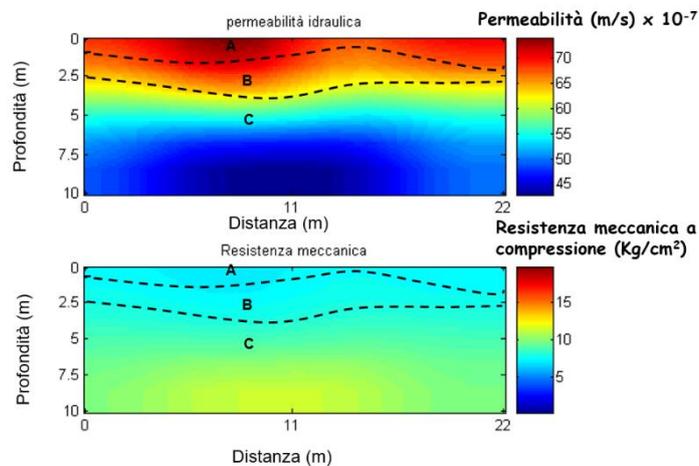
Attraverso l'impiego delle relazioni empiriche precedentemente descritte sono stati ottenuti i modelli di distribuzione dei parametri RQD (Fig.18), densità di massa, coesione (Fig.19), permeabilità e resistenza meccanica a compressione (Fig. 20).



**FIG.18** - Modello di distribuzione di RQD a varie profondità



**FIG. 19** - Modello di distribuzione della densità di massa e della coesione a varie profondità



**FIG. 20** - Modello di distribuzione della permeabilità e resistenza meccanica a compressione a varie profondità.

Nelle tabelle di seguito i dati schematizzati, relativi alle figure precedenti.

Strato	RQD (%)	Densità (g/cm <sup>3</sup> )	Coesione (KPa)	Permeabilità (m/s) x 10 <sup>-5</sup>	Resistenza meccanica a compressione (kg/cm <sup>2</sup> )
A	<10	1.5	10	70	
B	<10	1.8	15	65	8
C	40-60	2.1	30	50	10

Successivamente i valori del coefficiente di Poisson ( $\sigma$ ), del modulo di Young (E) e del modulo di taglio (G)

Strato	$\sigma$	E (MPa)	G (MPa)	Lamè (MPa)	Bulk (MPa)
A	0.35	348	129	300	386

<b>B</b>	0.35	371	137	321	412
<b>C</b>	0.34	569	581	1355	1743

### Determinazione della Velocità Equivalente $V_{s,eq}$ con la procedura MASW

La velocità equivalente delle onde di taglio è data dalla seguente espressione:

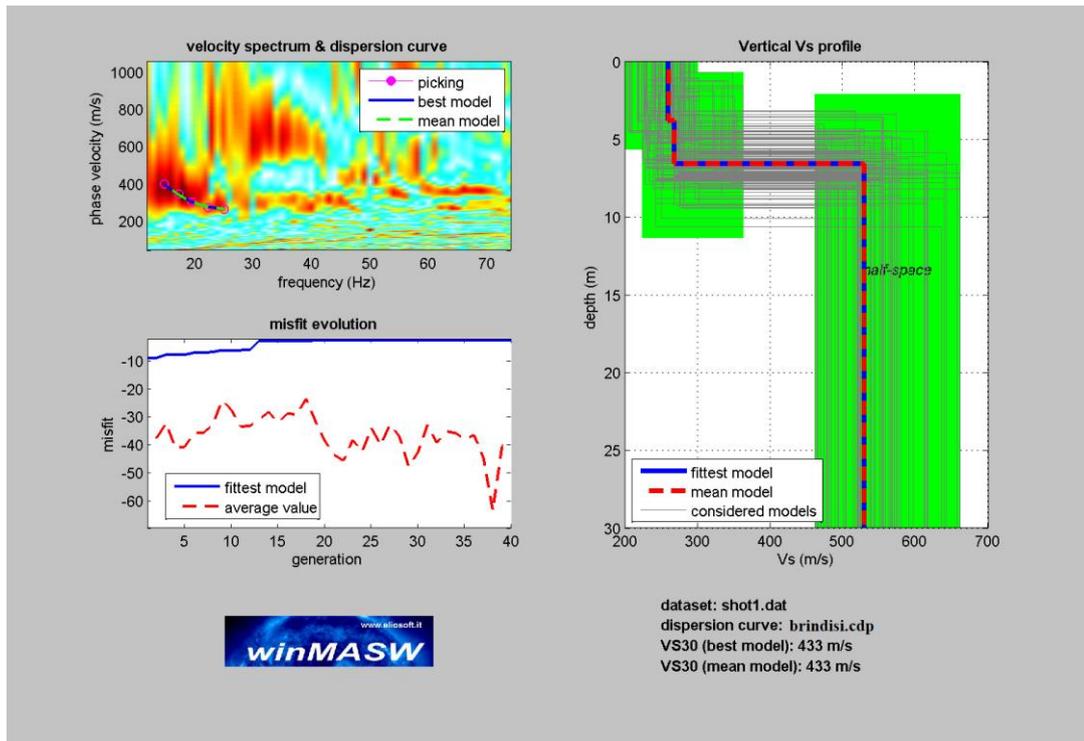
$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}}$$

Dove N è il numero di strati individuabili nei primi metri di suolo, ciascuno caratterizzato dallo spessore  $h$ (strato) e dalla velocità delle onde S  $V_s$ (strato). Per H si intende la 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 depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio  $V_{s,eq}$  è definita dal parametro  $V_{s30}$ , ottenuto ponendo  $H=30$  m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità. La configurazione base di campo e la routine di acquisizione per la procedura MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) sono generalmente le stesse utilizzate in una convenzionale indagine a rifrazione. MASW può essere efficace anche con solo dodici canali di registrazione collegati a geofoni verticali a bassa frequenza (4.5 Hz). Le componenti a bassa frequenza (lunghezze d'onda maggiori), sono caratterizzate da forte energia e grande capacità di penetrazione, mentre le componenti ad alta frequenza (lunghezze d'onda corte), hanno meno energia e una penetrazione superficiale. Grazie a queste proprietà, una metodologia che utilizzi le onde superficiali può fornire informazioni sulle variazioni delle proprietà elastiche dei materiali prossimi alla superficie al variare della profondità. La velocità delle onde S ( $V_s$ ) è il fattore dominante che governa le caratteristiche della dispersione.

La procedura MASW può sintetizzarsi in tre stadi distinti:

- § acquisizione dei dati sperimentali;
- § estrazione della curva di dispersione;
- § inversione della curva di dispersione per ottenere il profilo verticale delle  $V_s$  (profilo 1-D), che descrive la variazione di  $V_s$  con la profondità.

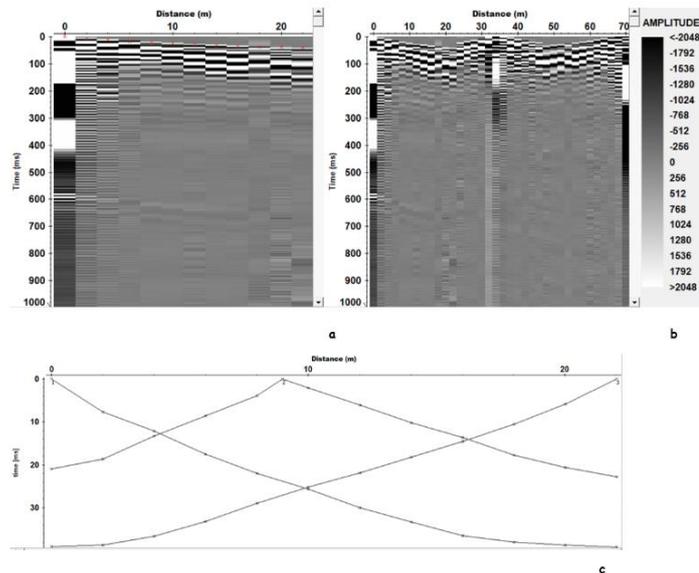
In Fig. 23 viene riportata la curva di dispersione per il sito in studio assieme al modello di stratificazione utilizzato per il calcolo della  $V_{s30}$ .



**FIG.21** - Curva di dispersione con profilo verticale della velocità Vs al variare della profondità.

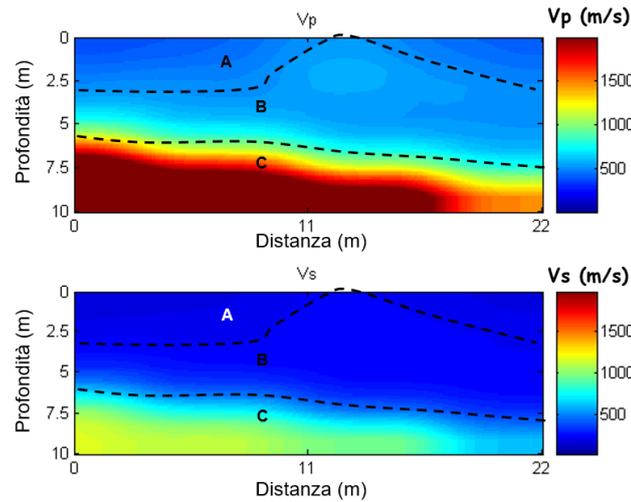
### Indagine sismica 2

La lettura dei tempi di primo arrivo (picking) (Fig. 22b), per ogni traccia, su ciascun sismogramma (Fig.22a), ha generato le dromocrone riportate in Fig.22c.



**FIG. 22** - a) sismogrammi delle 3 energizzazioni; b) esempio di picking dei primi arrivi; c) Dromocrone relative al profilo sismico.

L'elaborazione delle dromocrone mediante algoritmi sofisticati ha permesso il raggiungimento del modello di distribuzione delle velocità Vp e Vs (Fig. 23).



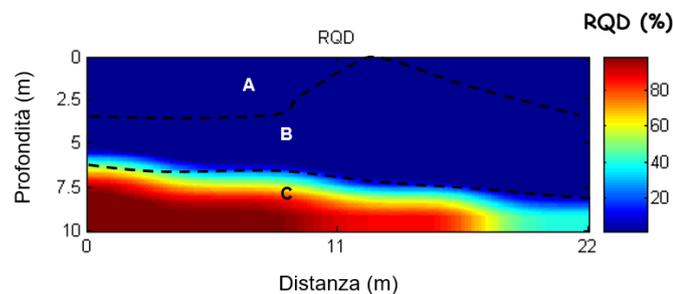
**FIG.23** - Modello di distribuzione delle velocità  $V_p$  e  $V_s$  a varie profondità.

Interpretando la Fig.23 si evince che i valori di  $V_p$  sono generalmente compresi tra 400m/s e 2000m/s mentre valori di  $V_s$  sono generalmente compresi tra 200m/s e 800m/s.

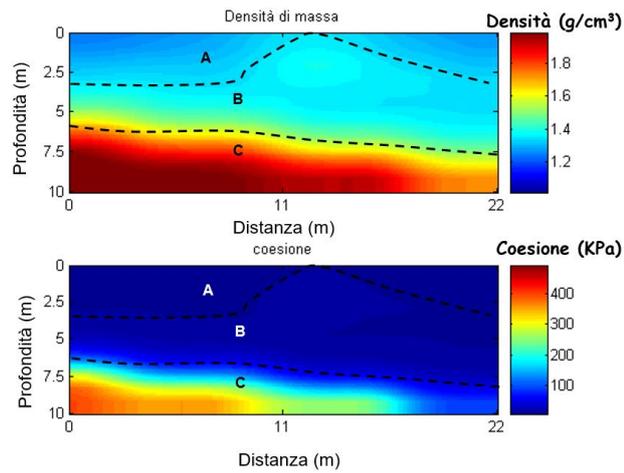
In particolare è possibile distinguere

- Strato "A":  $V_p=300\text{m/s}$  ( $V_s=200\text{m/s}$ ); strato superficiale da 0.0m a 2.7m circa di profondità;
- Strato "B":  $700 < V_p < 800\text{m/s}$  ( $300 < V_s < 400\text{m/s}$ ); probabile presenza di materiale compatto da 5.5m a 7.0m circa di profondità;
- Strato "C":  $1800 < V_p < 2000\text{m/s}$  ( $700 < V_s < 800\text{m/s}$ ); probabile presenza di materiale più compatto.

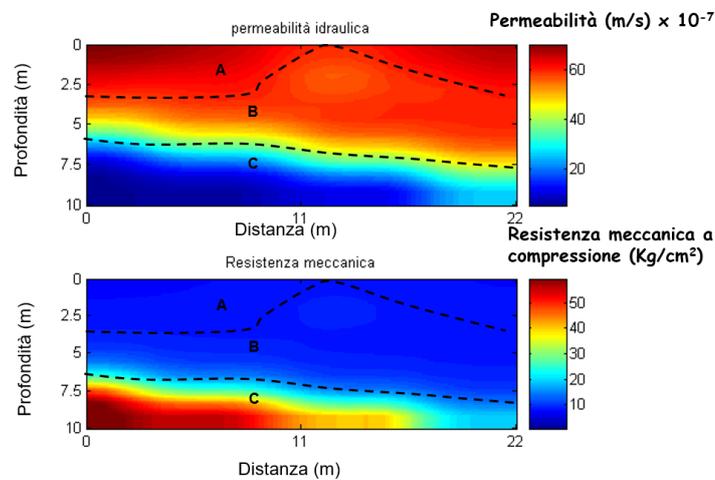
Attraverso l'impiego delle relazioni empiriche precedentemente descritte sono stati ottenuti i modelli di distribuzione dei parametri RQD (Fig.24), densità di massa, coesione (Fig.25), permeabilità e resistenza meccanica a compressione (Fig. 26).



**FIG.24** - Modello di distribuzione di RQD a varie profondità



**FIG.25** - Modello di distribuzione della densità di massa e della coesione a varie profondità



**FIG. 26** - Modello di distribuzione della permeabilità e resistenza meccanica a compressione a varie profondità.

Nelle tabelle di seguito i dati schematizzati, relativi alle figure precedenti.

Strato	RQD (%)	Densità (g/cm <sup>3</sup> )	Coesione (KPa)	Permeabilità (m/s) x 10 <sup>-5</sup>	Resistenza meccanica a compressione (kg/cm <sup>2</sup> )
<b>A</b>	<10	1.5	50	70	
<b>B</b>	<10	1.6	100	60	10
<b>C</b>	70-80	2.2	350	20	45

Successivamente i valori del coefficiente di Poisson ( $\sigma$ ), del modulo di Young (E) e del modulo di taglio (G)

Strato	$\sigma$	E (MPa)	G (MPa)	Lamè (MPa)	Bulk (MPa)
<b>A</b>	0.35	322	119	273	316

<b>B</b>	0.35	378	145	303	425
<b>C</b>	0.35	1346	474	1175	1479

### Determinazione della Velocità Equivalente $V_{s,eq}$ con la procedura MASW

La velocità equivalente delle onde di taglio è data dalla seguente espressione:

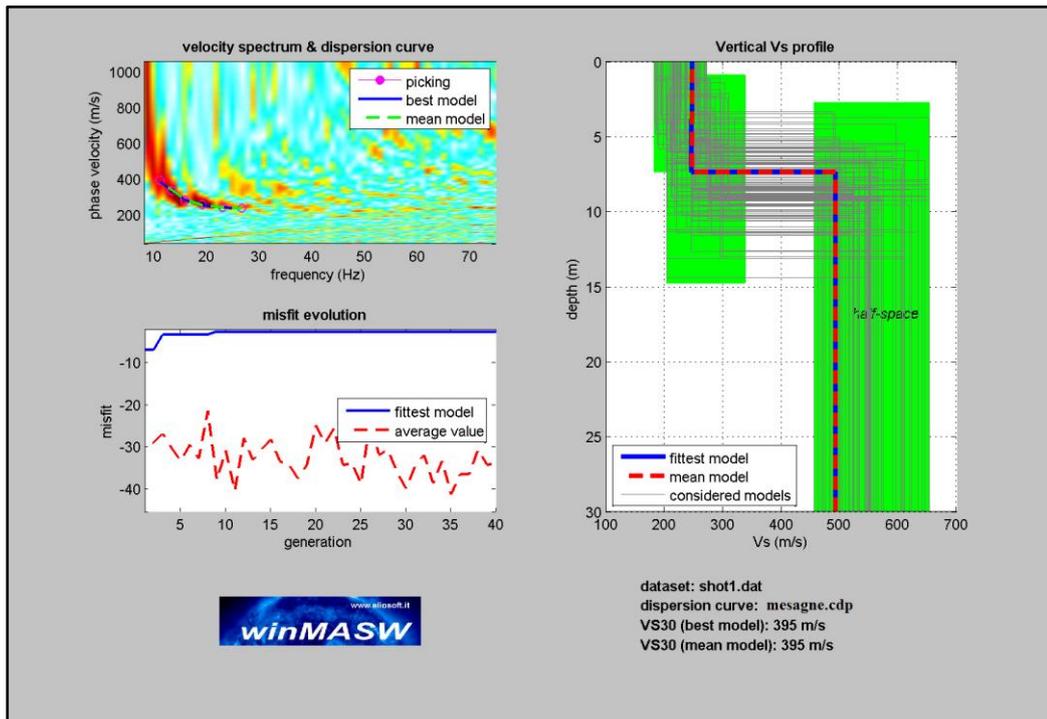
$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}}$$

Dove N è il numero di strati individuabili nei primi metri di suolo, ciascuno caratterizzato dallo spessore  $h$ (strato) e dalla velocità delle onde S  $V_s$ (strato). Per H si intende la 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 depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio  $V_{s,eq}$  è definita dal parametro  $V_{s30}$ , ottenuto ponendo  $H=30$  m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità. La configurazione base di campo e la routine di acquisizione per la procedura MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) sono generalmente le stesse utilizzate in una convenzionale indagine a rifrazione. MASW può essere efficace anche con solo dodici canali di registrazione collegati a geofoni verticali a bassa frequenza (4.5 Hz). Le componenti a bassa frequenza (lunghezze d'onda maggiori), sono caratterizzate da forte energia e grande capacità di penetrazione, mentre le componenti ad alta frequenza (lunghezze d'onda corte), hanno meno energia e una penetrazione superficiale. Grazie a queste proprietà, una metodologia che utilizzi le onde superficiali può fornire informazioni sulle variazioni delle proprietà elastiche dei materiali prossimi alla superficie al variare della profondità. La velocità delle onde S ( $V_s$ ) è il fattore dominante che governa le caratteristiche della dispersione.

La procedura MASW può sintetizzarsi in tre stadi distinti:

- § acquisizione dei dati sperimentali;
- § estrazione della curva di dispersione;
- § inversione della curva di dispersione per ottenere il profilo verticale delle  $V_s$  (profilo 1-D), che descrive la variazione di  $V_s$  con la profondità.

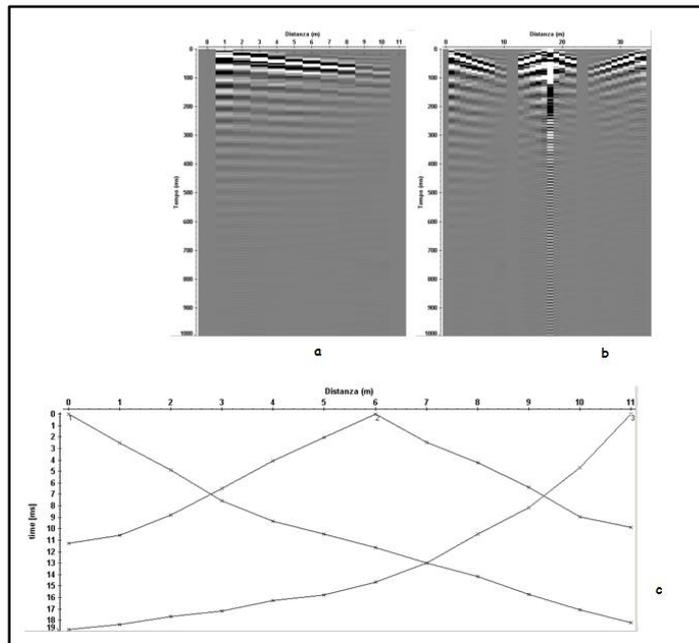
In Fig. 27 viene riportata la curva di dispersione per il sito in studio assieme al modello di stratificazione utilizzato per il calcolo della  $V_{s30}$ .



**FIG.27** - Curva di dispersione con profilo verticale della velocità  $V_s$  al variare della profondità.

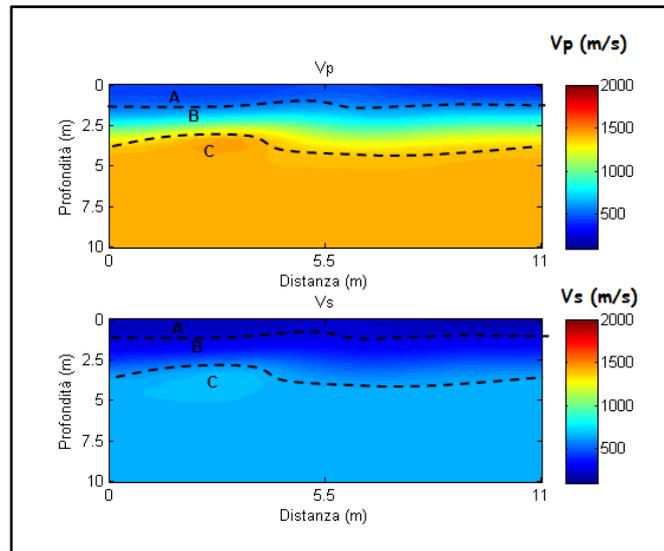
### Indagine sismica 3

La lettura dei tempi di primo arrivo (picking) (Fig. 28b), per ogni traccia, su ciascun sismogramma (Fig.28a), ha generato le dromocrone riportate in Fig.28c.



**FIG. 28** - a) sismogrammi delle 3 energizzazioni; b) esempio di picking dei primi arrivi; c) Dromocrone relative al profilo sismico.

L'elaborazione delle dromocrone mediante algoritmi sofisticati ha permesso il raggiungimento del modello di distribuzione delle velocità  $V_p$  e  $V_s$  (Fig. 29).



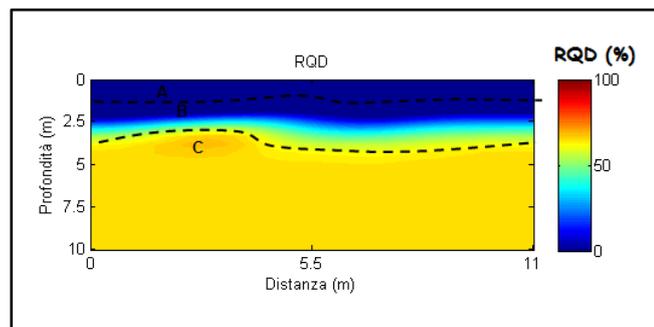
**FIG.29** - Modello di distribuzione delle velocità  $V_p$  e  $V_s$  a varie profondità.

Interpretando la Fig. 29 si evince che i valori di  $V_p$  sono generalmente compresi tra 400m/s e 1400m/s mentre valori di  $V_s$  sono generalmente compresi tra 200m/s e 800m/s.

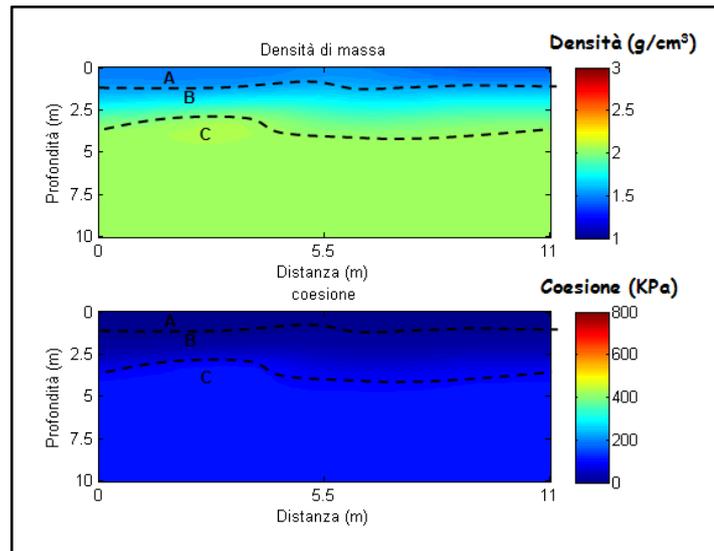
In particolare è possibile discernere la seguente stratigrafia:

- Strato "A":  $V_p=400\text{m/s}$  ( $V_s=200\text{m/s}$ ); strato superficiale da 1.5m a 1.7m circa di profondità;
- Strato "B":  $1000 < V_p < 1100\text{m/s}$  ( $500 < V_s < 600\text{m/s}$ ); probabile presenza di materiale compatto che raggiunge una profondità compresa tra 4.2m e 4.5m circa;
- Strato "C":  $1200 < V_p < 1400\text{m/s}$  ( $700 < V_s < 800\text{m/s}$ ); probabile presenza di materiale più compatto che raggiunge una profondità compresa tra 3.2m e 4.2m circa;

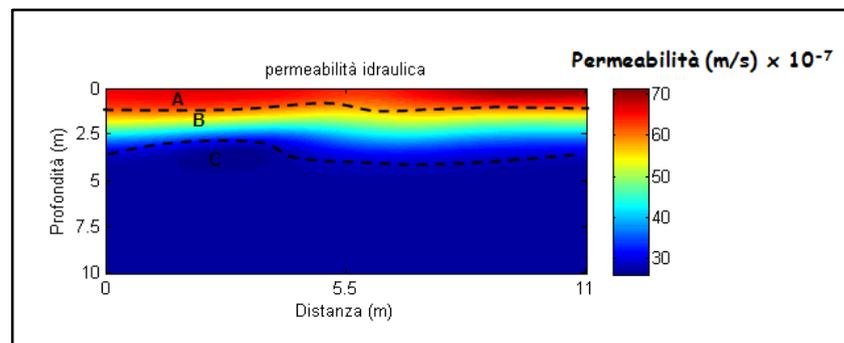
Attraverso l'impiego delle relazioni empiriche precedentemente descritte sono stati ottenuti i modelli di distribuzione dei parametri RQD (Fig. 30), densità di massa, coesione (Fig.31) e permeabilità (Fig. 32).



**FIG.30** - Modello di distribuzione di RQD a varie profondità.



**FIG.31** - Modello di distribuzione della densità di massa e della coesione a varie profondità.



**FIG. 32** - Modello di distribuzione della permeabilità e della resistenza meccanica a compressione a varie profondità.

Nelle tabelle di seguito i dati schematizzati, relativi alle figure precedenti.

Strato	RQD (%)	Densità (g/cm <sup>3</sup> )	Coesione (KPa)	Permeabilità (m/s) x 10 <sup>-5</sup>
A	<10	1.8	30	70
B	20	2.0	80	40-50
C	60	2.2	150	<10

Successivamente i valori del coefficiente di Poisson ( $\sigma$ ), del modulo di Young (E) e del modulo di taglio (G)

Strato	$\sigma$	E (MPa)	G (MPa)	Lamè (MPa)	Bulk (MPa)
A	0.35	72	27	62	80
B	0.35	94	35	82	105

<b>C</b>	0.35	736	273	635	817
----------	------	-----	-----	-----	-----

### Determinazione della Velocità Equivalente $V_{s,eq}$ con la procedura MASW

La velocità equivalente delle onde di taglio è data dalla seguente espressione:

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

Dove:

N = numero degli strati

$h_i$  = spessore dello strato i-esimo

$V_{s,i}$  = velocità delle onde di taglio nello strato i-esimo

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

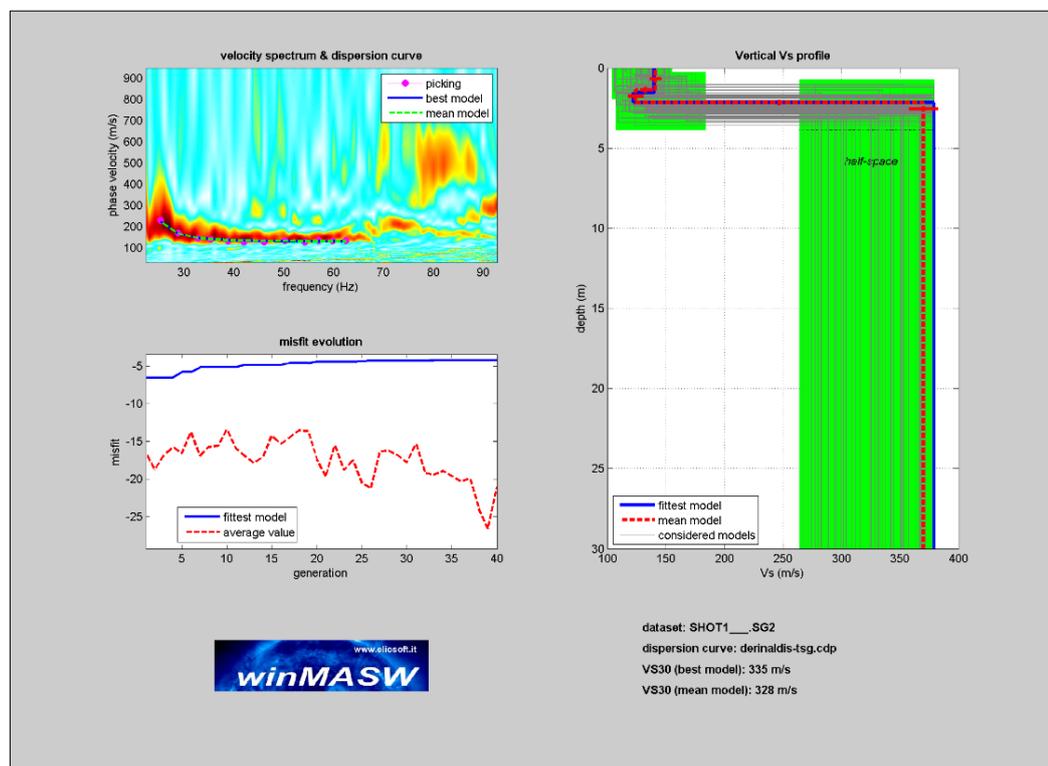
Nelle prospezioni sismiche per le quali si utilizzano le onde di tipo P, la maggior parte dell'energia sismica totale generata si propaga come onde superficiali di tipo Rayleigh. Ipotizzando una variazione di velocità dei terreni in senso verticale, ciascuna componente in frequenza di queste onde è caratterizzata da una diversa velocità di propagazione (chiamata velocità di fase) e quindi da una diversa lunghezza d'onda. Questa proprietà si chiama dispersione. Sebbene le onde superficiali siano considerate rumore per le indagini sismiche che utilizzano le onde di volume (riflessione e rifrazione), la loro proprietà dispersiva può essere utilizzata per studiare le proprietà elastiche dei terreni superficiali. La costruzione di un profilo verticale di velocità delle onde di taglio (Vs), ottenuto dall'analisi delle onde piane della modalità fondamentale delle onde di Rayleigh è una delle pratiche più comuni per utilizzare le proprietà dispersive delle onde superficiali. Per ottenere un profilo verticale di velocità Vs bisogna produrre un treno d'onde superficiali a banda larga e registrarlo minimizzando il rumore. Una molteplicità di tecniche diverse sono state utilizzate nel tempo per ricavare la curva di dispersione, ciascuna con i suoi vantaggi e svantaggi. La configurazione base di campo e la routine di acquisizione per la procedura MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) sono generalmente le stesse utilizzate in una convenzionale indagine a rifrazione. MASW può essere efficace anche con solo dodici canali di registrazione collegati a geofoni verticali a bassa frequenza (4.5 Hz). Le componenti a bassa frequenza (lunghezze d'onda maggiori), sono caratterizzate da forte energia e grande capacità di penetrazione, mentre le componenti ad alta frequenza (lunghezze d'onda corte), hanno meno energia e una penetrazione superficiale. Grazie a queste proprietà, una metodologia che utilizzi le onde superficiali

può fornire informazioni sulle variazioni delle proprietà elastiche dei materiali prossimi alla superficie al variare della profondità. La velocità delle onde S ( $V_s$ ) è il fattore dominante che governa le caratteristiche della dispersione.

La procedura MASW può sintetizzarsi in tre stadi distinti:

- acquisizione dei dati sperimentali;
- estrazione della curva di dispersione;
- inversione della curva di dispersione per ottenere il profilo verticale delle  $V_s$  (profilo 1-D), che descrive la variazione di  $V_s$  con la profondità.

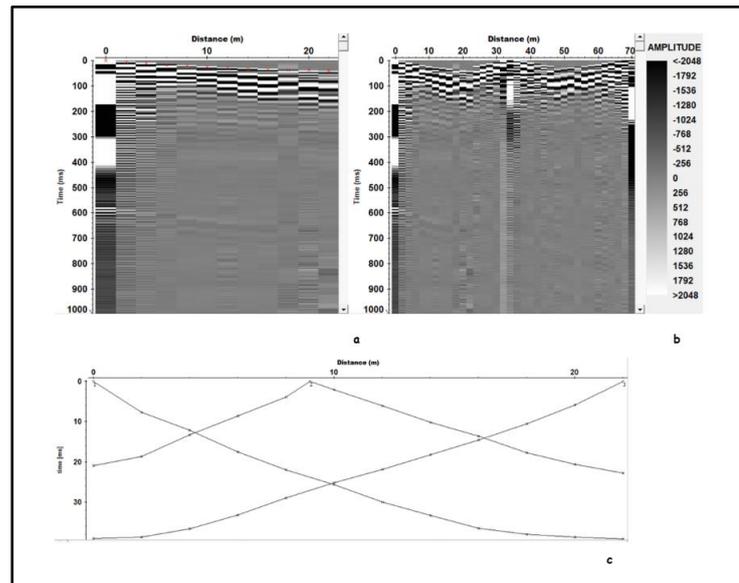
In Fig 33 viene riportata la curva di dispersione per il sito in studio assieme al modello di stratificazione utilizzato per il calcolo della Velocità Equivalente.



**FIG.33** - Curva di dispersione con profilo verticale della velocità  $V_s$  al variare della profondità.

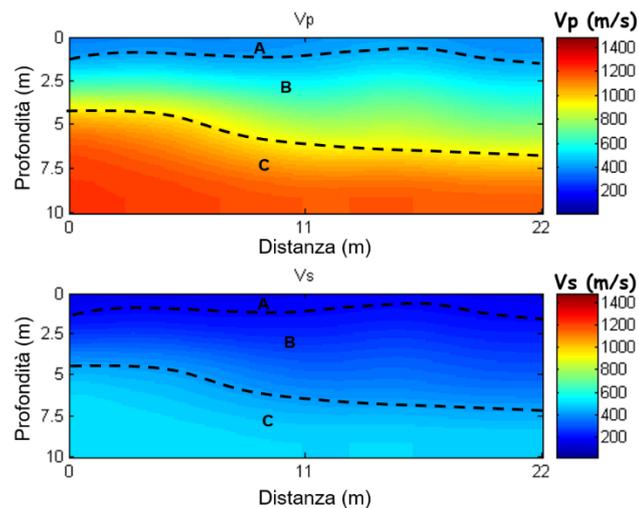
#### Indagine sismica 4

La lettura dei tempi di primo arrivo (picking) (Fig. 34b), per ogni traccia, su ciascun sismogramma (Fig.34a), ha generato le dromocrone riportate in Fig.34c.



**FIG. 34** - a) sismogrammi delle 3 energizzazioni; b) esempio di picking dei primi arrivi; c) Dromocrone relative al profilo sismico.

L'elaborazione delle dromocrone mediante algoritmi sofisticati ha permesso il raggiungimento del modello di distribuzione delle velocità  $V_p$  e  $V_s$  (Fig. 35).



**FIG.35** - Modello di distribuzione delle velocità  $V_p$  e  $V_s$  a varie profondità.

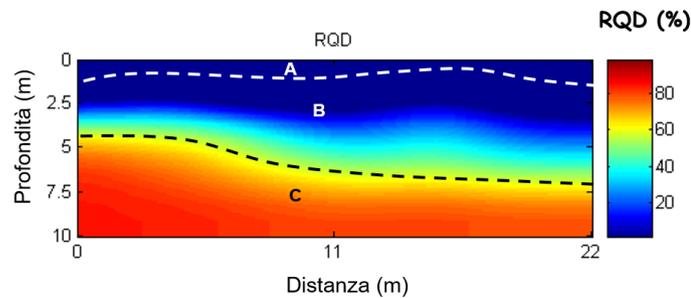
Interpretando la Fig. 35 si evince che i valori di  $V_p$  sono generalmente compresi tra 400m/s e 1300m/s mentre valori di  $V_s$  sono generalmente compresi tra 200m/s e 600m/s.

In particolare è possibile individuare la seguente stratigrafia:

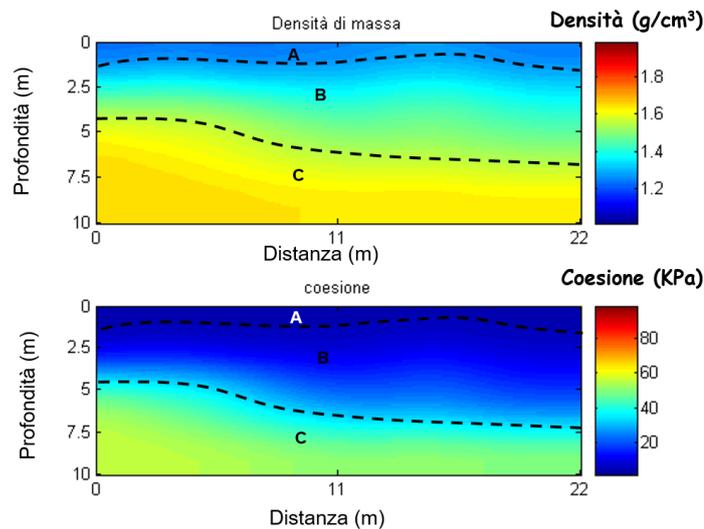
- Strato "A":  $V_p=300$  m/s ( $V_s=200$ m/s); strato superficiale da 0.5m a 1.0m circa di profondità;
- Strato "B":  $800 < V_p < 1000$ m/s ( $300 < V_s < 400$ m/s); probabile presenza di materiale compatto da 5.0m a 7.0m circa di profondità;

- Strato "C":  $1000 < V_p < 1300 \text{ m/s}$  ( $500 < V_s < 600 \text{ m/s}$ ); da 7.0m circa di profondità; probabile presenza di materiale più compatto.

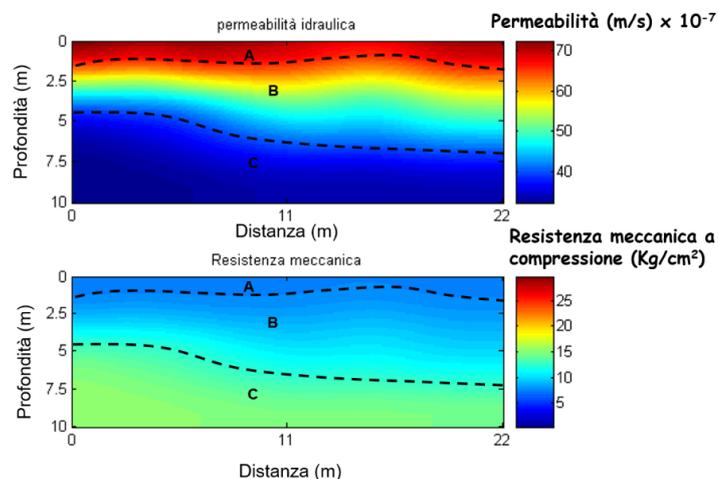
Attraverso l'impiego delle relazioni empiriche precedentemente descritte sono stati ottenuti i modelli di distribuzione dei parametri RQD (Fig. 36), densità di massa, coesione (Fig.37), permeabilità idraulica e resistenza meccanica a compressione (Fig. 38).



**FIG.36** - Modello di distribuzione di RQD a varie profondità.



**FIG.37** - Modello di distribuzione della densità di massa e della coesione a varie profondità.



**FIG. 38** - Modello di distribuzione della permeabilità e resistenza meccanica a compressione a varie profondità.

Nelle tabelle di seguito i dati schematizzati, relativi alle figure precedenti.

Strato	RQD (%)	Densità (g/cm <sup>3</sup> )	Coesione (KPa)	Permeabilità (m/s) x 10 <sup>-5</sup>	Resistenza meccanica a compressione (kg/cm <sup>2</sup> )
<b>A</b>	<10	1.4	20	70	
<b>B</b>	10-40	1.6	30	50	10
<b>C</b>	60-70	1.8	50	20	15

Successivamente i valori del coefficiente di Poisson ( $\sigma$ ), del modulo di Young (E) e del modulo di taglio (G)

Strato	$\sigma$	E (MPa)	G (MPa)	Lamè (MPa)	Bulk (MPa)
<b>A</b>	0.35	312	115	269	346
<b>B</b>	0.35	371	137	321	412
<b>C</b>	0.33	1346	499	1163	1495

#### Determinazione della Velocità Equivalente $V_{s,eq}$ con la procedura MASW

La velocità equivalente delle onde di taglio è data dalla seguente espressione:

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

Dove:

N = numero degli strati

$h_i$  = spessore dello strato i-esimo

$V_{s,i}$  = velocità delle onde di taglio nello strato i-esimo

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

Nelle prospezioni sismiche per le quali si utilizzano le onde di tipo P, la maggior parte dell'energia sismica totale generata si propaga come onde superficiali di tipo Rayleigh. Ipotizzando una variazione di velocità dei terreni in senso verticale, ciascuna componente in frequenza di queste onde è caratterizzata da una diversa velocità di propagazione (chiamata velocità di fase) e quindi da una diversa lunghezza d'onda. Questa proprietà si chiama dispersione. Sebbene le onde superficiali siano considerate rumore per le indagini sismiche che utilizzano le onde di volume (riflessione e rifrazione), la loro proprietà dispersiva può essere utilizzata per studiare le proprietà elastiche dei terreni superficiali.

La costruzione di un profilo verticale di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ), ottenuto dall'analisi delle onde piane della modalità fondamentale delle onde di Rayleigh è una delle pratiche più comuni per utilizzare le proprietà dispersive delle onde superficiali. Per ottenere un profilo verticale di velocità  $V_s$  bisogna produrre un treno d'onde superficiali a banda larga e registrarlo minimizzando il rumore. Una molteplicità di tecniche diverse sono state utilizzate nel tempo per ricavare la curva di dispersione, ciascuna con i suoi vantaggi e svantaggi.

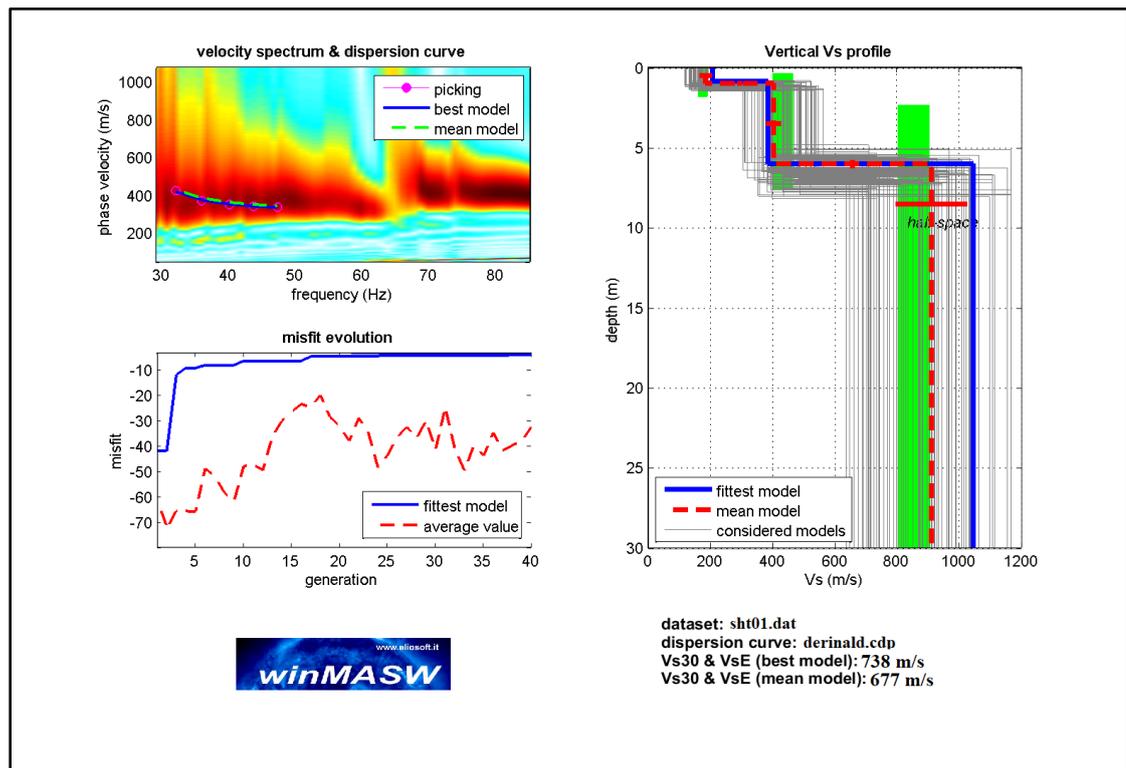
La configurazione base di campo e la routine di acquisizione per la procedura MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) sono generalmente le stesse utilizzate in una convenzionale indagine a rifrazione. MASW può essere efficace anche con solo dodici canali di registrazione collegati a geofoni verticali a bassa frequenza (4.5 Hz).

Le componenti a bassa frequenza (lunghezze d'onda maggiori), sono caratterizzate da forte energia e grande capacità di penetrazione, mentre le componenti ad alta frequenza (lunghezze d'onda corte), hanno meno energia e una penetrazione superficiale. Grazie a queste proprietà, una metodologia che utilizzi le onde superficiali può fornire informazioni sulle variazioni delle proprietà elastiche dei materiali prossimi alla superficie al variare della profondità. La velocità delle onde S ( $V_s$ ) è il fattore dominante che governa le caratteristiche della dispersione.

La procedura MASW può sintetizzarsi in tre stadi distinti:

- acquisizione dei dati sperimentali;
- estrazione della curva di dispersione;
- inversione della curva di dispersione per ottenere il profilo verticale delle  $V_s$  (profilo 1-D), che descrive la variazione di  $V_s$  con la profondità.

In Fig 39 viene riportata la curva di dispersione per il sito in studio assieme al modello di stratificazione utilizzato per il calcolo della Velocità Equivalente.



**FIG.39** - Curva di dispersione con profilo verticale della velocità Vs al variare della profondità.

## 7 MODELLO LITOSTRATIGRAFICO DEL SOTTOSUOLO E PARAMETRI CARATTERISTICI DEL TERRENO

La ricostruzione del modello litostratigrafico del sottosuolo è stata effettuata mediante l'utilizzo dei dati rilevati dalle indagini eseguite nonché dal censimento di dati stratigrafici esistenti nelle aree vicine (Fig.40).



**FIG.40** – Localizzazione delle perforazioni con stratigrafia in corrispondenza e in prossimità dell’area di intervento (Fonte: Ispra)

Dal punto di vista stratigrafico i terreni di fondazione sono caratterizzati dalla presenza di “depositi argillosi e sabbiosi”.

Di seguito il modello litostratigrafico in corrispondenza e in prossimità dell’area indagata dall’indagine sismica n.1:

Strato	Profondità dal P.C.		Descrizione
Livello A	0.0 m– 0.8/1.2 m		Copertura superficiale assimilabile a limi sabbiosi e argillosi
Livello B	0.8/1.2 m – 2.5/4.0 m		Materiale compatto assimilabile a depositi argillosi e sabbiosi
Livello C	> 4 m		Materiale più compatto assimilabile a depositi argillosi alternati a calcareniti

Di seguito i parametri geotecnici relativi al Livello B (fondazionale):

### **Livello B**

Peso di Volume (KN/m<sup>3</sup>) = 22

Angolo di attrito interno ( $\phi$ ) = 24°

Densità (Y) (g/cm<sup>3</sup>) = 1.8

Coesione (KPa) = 15

RQD = <10%

Permeabilità =  $65 \text{ m/sec} \times 10^{-5}$

C.Poisson = 0,35

Modulo di deformazione al taglio (G) (MPa) = 137

Modulo di Young (E) (MPa) = 371

Lamè (MPa) = 321

Bulk (MPa) = 412

Resistenza meccanica a compressione ( $\text{Kg/cm}^2$ ) = 10

L'elaborazione della prova sismica MASW ha permesso di determinare la categoria sismica del terreno di fondazione; il valore di  $V_{s30}$  è di 433 m/sec, per cui il terreno rientra nella **Categoria Sismica B** (anche se di poco superiore alla Categoria Sismica C): 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.

Di seguito il modello litostratigrafico in corrispondenza e in prossimità dell'area indagata dall'indagine sismica n.2:

Strato	Profondità dal P.C.		Descrizione
Livello A	0.0 m– 2.7 m		Copertura superficiale assimilabile a limi sabbiosi e argillosi
Livello B	2.7 m – 5.5/7.0 m		Materiale compatto assimilabile a depositi argillosi e sabbiosi
Livello C	> 5.5/7.0 m		Materiale più compatto assimilabile a depositi argillosi alternati a calcareniti

Di seguito i parametri geotecnici relativi al Livello B (fondazionale):

### **Livello B**

Peso di Volume ( $\text{KN/m}^3$ ) = 22

Angolo di attrito interno ( $\phi$ ) =  $20^\circ$

Densità ( $\gamma$ ) ( $\text{g/cm}^3$ ) = 1.6

Coesione (KPa) = 100

RQD (%) = <10%

Permeabilità =  $60 \text{ m/sec} \times 10^{-5}$

C.Poisson = 0,35

Modulo di deformazione al taglio (G) (MPa) = 145

Modulo di Young (E) (MPa) = 378

Lamè (MPa) = 303

Bulk (MPa) = 425

Resistenza meccanica a compressione ( $\text{Kg/cm}^2$ ) = 10

L'elaborazione della prova sismica MASW ha permesso di determinare la categoria sismica del terreno di fondazione; il valore di  $V_{s30}$  è di 395 m/sec, per cui il terreno rientra nella **Categoria Sismica 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.

Di seguito il modello litostratigrafico in corrispondenza e in prossimità dell'area indagata dall'indagine sismica n.3:

Strato	Profondità dal P.C.		Descrizione
Livello A	0.0 m– 1.5/1.7 m		Copertura superficiale assimilabile a limi sabbiosi e argillosi
Livello B	1.5/1.7 m – 4.2/4.5 m		Materiale compatto assimilabile a depositi argillosi e sabbiosi
Livello C	> 4 m		Materiale più compatto assimilabile a depositi argillosi alternati a calcareniti

Di seguito i parametri geotecnici relativi al Livello B (fondazionale):

### **Livello B**

Peso di Volume ( $\text{KN/m}^3$ ) = 21

Angolo di attrito interno ( $\phi$ ) =  $20^\circ$

Densità ( $\gamma$ ) ( $\text{g/cm}^3$ ) = 2.0

Coesione (KPa) = 80

RQD (%) = 20

Permeabilità =  $40\text{-}50 \text{ m/sec} \times 10^{-5}$

C.Poisson = 0,35

Modulo di deformazione al taglio (G) (MPa) = 35

Modulo di Young (E) (MPa) = 94

Lamè (MPa) = 82

Bulk (MPa) = 105

L'elaborazione della prova sismica MASW ha permesso di determinare la categoria sismica del terreno di fondazione; il valore di Vs30 è di 335 m/sec, per cui il terreno rientra nella **Categoria Sismica C**: 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.

Di seguito il modello litostratigrafico in corrispondenza e in prossimità dell'area indagata dall'indagine sismica n.4:

Strato	Profondità dal P.C.		Descrizione
Livello A	0.0 m– 0.5/1.0 m		Copertura superficiale assimilabile a limi sabbiosi e argillosi
Livello B	0.5/1.0 m – 5.5/7.0 m		Materiale compatto assimilabile a depositi argillosi e sabbiosi
Livello C	> 5.5/7.0 m		Materiale più compatto assimilabile a depositi argillosi alternati a calcareniti

Di seguito i parametri geotecnici relativi al Livello B (fondazionale):

### **Livello B**

Peso di Volume (KN/m<sup>3</sup>) = 22

Angolo di attrito interno (  $\phi$  ) = 20°

Densità (Y) (g/cm<sup>3</sup>) = 1.6

Coesione (KPa) = 30

RQD (%) = 10-40

Permeabilità = 50 m/sec X 10<sup>-5</sup>

C.Poisson = 0,35

Modulo di deformazione al taglio (G) (MPa) = 137

Modulo di Young (E) (MPa) = 371

Lamè (MPa) = 321

Bulk (MPa) = 412

Resistenza meccanica a compressione (Kg/cm<sup>2</sup>) = 10

L'elaborazione della prova sismica MASW ha permesso di determinare la categoria sismica del terreno di fondazione; il valore di Vs30 è di 677 m/sec, per cui il terreno rientra nella **Categoria Sismica 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.

Secondo le NTC 2018 la classificazione dei suoli per la definizione dell'azione sismica di progetto è in 5 categorie (A-B-C-D-E); di seguito la loro descrizione.

**Categoria A** – 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.

**Categoria 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.

**Categoria C** – Depositati 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.

**Categoria D** – Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.

**Categoria E** – 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.

## **8 CARATTERIZZAZIONE SISMICA DELL'AREA**

### **8.1 PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE AI SENSI DELLE NTC**

Le azioni sismiche di progetto, in base alle quali valutare il rispetto dei diversi stati limite considerati, si definiscono a partire dalla “pericolosità sismica di base” del sito di costruzione. Essa costituisce l'elemento di conoscenza primario per la determinazione delle azioni sismiche.

La pericolosità sismica è definita in termine di accelerazione orizzontale massima attesa  $a_g$  in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale, nonché di ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente  $S_e(T)$ , con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza  $P_{VR}$ , nel periodo di riferimento  $V_R$ . In alternativa è ammesso l'uso di accelerogrammi, purché correttamente commisurati alla pericolosità sismica del sito. Come riportato nelle NTC 2018, la pericolosità sismica in un sito generico deve essere descritta in modo da renderla compatibile con le NTC e da dotarla di un sufficiente livello di dettaglio, sia in termini geografici che in termini temporali; tali condizioni possono ritenersi soddisfatte se i risultati dello studio di pericolosità sono forniti:

- in termini di valori di accelerazione orizzontale massima  $a_g$  e dei parametri che permettono di definire gli spettri di risposta ai sensi delle NTC, nelle condizioni di sito di riferimento rigido orizzontale sopraccitate;
- in corrispondenza dei punti di un reticolo (reticolo di riferimento) i cui nodi sono sufficientemente vicini fra loro (distanti non più di 10 km);
- per diverse probabilità di superamento in 50 anni e/o diversi periodi di ritorno dell'azione sismica TR ricadenti in un intervallo di riferimento compreso almeno tra 30 e 2475 anni, estremi inclusi.

L'azione sismica così individuata viene successivamente variata, nei modi precisati in seguito (e specificati nelle NTC), per tener conto delle modifiche prodotte dalle condizioni locali stratigrafiche nel sottosuolo effettivamente presente nel sito di costruzione e dalla morfologia della superficie. Tali modifiche caratterizzano la risposta sismica locale. Allo stato attuale la “pericolosità sismica di base” è stata definita su tutto il territorio nazionale dall'INGV attraverso un reticolo di riferimento con una maglia avente passo <10 km per periodi di ritorno ricadenti in un intervallo di riferimento compreso fra 30 e 2475 anni, estremi inclusi. I dati sono consultabili sul sito web <http://esse1.mi.ingv.it>.

Le azioni di progetto si ricavano quindi, ai sensi delle NTC, dalle accelerazioni  $a_g$  e dalle relative forme spettrali. Le forme spettrali previste nella vigente normativa (NTC) sono definite, per ciascuna delle

probabilità di superamento nel periodo di riferimento  $P_{VR}$ , su sito di riferimento rigido orizzontale, in funzione dei tre parametri seguenti:

- $a_g$ : accelerazione orizzontale massima al sito;
- $F_0$ : valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro di accelerazione orizzontale;
- $T_c^*$ : periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

I suddetti parametri si determinano sulla base del reticolo definendo, innanzitutto, la vita di riferimento  $V_R$  (dipende dalla vita nominale e dalla classe d'uso in una costruzione) e la probabilità di eccedenza nella vita  $P_{VR}$  di riferimento associate a ciascuno degli stati limite considerati e quindi calcolando il periodo di ritorno di riferimento  $T_R$ . Le probabilità di superamento nel periodo di riferimento  $P_{VR}$  cui riferirsi per individuare l'azione sismica agente in ciascuno degli stati limite considerati nella Normativa, sono riportate nella tabella seguente:

Stati Limite		PVR: Probabilità di superamento nel periodo di riferimento VR
Stati limite di esercizio (SLE)	SLO	81%
	SLD	63%
Stati limite ultimi (SLU)	SLV	10%
	SLC	5%

Qualora la protezione nei confronti degli stati limite di esercizio sia di prioritaria importanza, i valori di  $P_{VR}$  forniti in tabella devono essere ridotti in funzione del grado di protezione che si vuole raggiungere.

## 8.2 CONDIZIONI TOPOGRAFICHE

Nell'ambito delle condizioni topografiche semplici viene adottata la classificazione della tabella seguente:

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

Tenendo conto delle condizioni topografiche in assenza di specifiche analisi di risposta sismica locale, si utilizzano i valori del coefficiente topografico  $S_T$  riportati nella Tabella successiva, funzione delle categorie topografiche definite e dell'ubicazione dell'opera o dell'intervento.

Categoria topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento	$S_T$
T1	-	1,0
T2	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2
T3	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,2
T4	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,4

Nell'area di intervento la categoria di riferimento è la T1, da cui  $S_T = 1,0$

### 8.3 VALUTAZIONE DEI PARAMETRI SISMICI AI SENSI DELLE NTC

Per qualunque punto del territorio non ricadente nei nodi di riferimento, i valori dei parametri di interesse per la definizione dell'azione sismica di progetto ( $F_0$ ,  $a_g$  e  $T_c^*$ ) possono essere calcolati come media pesata dei valori assunti da tali parametri nei quattro vertici della maglia elementare del reticolo di riferimento contenente il punto in esame secondo quanto indicato nell'Allegato delle NTC. La determinazione dei parametri sismici può essere effettuata mediante l'utilizzo di alcuni software come "Spettri di risposta 1.03" (disponibile all'indirizzo web <http://www.infrastrutture.gov.it>) oppure il software "Geostru PS" (disponibile all'indirizzo web <https://geoapp.eu/parametrisismici2018/>) che permettono di ottenere i dati sismici relativi inserendo le coordinate geografiche dell'area in esame, la classe d'uso dell'opera e la sua vita nominale.

Nel caso in esame sono stati desunti i parametri riportati di seguito sulla base dei dati in input:

- Coordinate geografiche nel tratto centrale dell'area di impianto (sistema di coordinate geografiche WGS84): Latitudine 40.621699° – Longitudine 17.837500°
- Vita nominale = 50 anni
- Classe d'uso = I (Presenza occasionale di persone)
- Coefficiente d'uso  $CU = 0,7$
- Categoria sottosuolo = B
- Categoria Topografica = T1

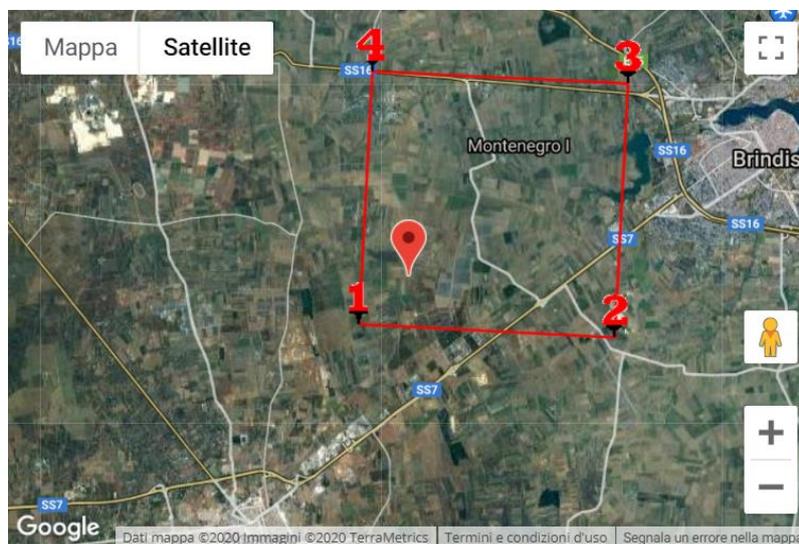
Di seguito si riportano i relativi parametri sismici associati ai diversi stati limite.

PARAMETRI SISMICI				
SL	Tr (anni)	$A_g$ (g)	$F_0$	$T_c^*$ (s)
Operatività SLO	30	0,014	2,337	0,155
Danno SLD	35	0,016	2,342	0,171
Salvaguardia della vita SLV	332	0,041	2,501	0,412

<b>Prevenzione del collasso SLC</b>	682	0,051	2,604	0,472
<b>Periodo di riferimento per l'azione sismica</b>	35			

<b>COEFFICIENTI SISMICI</b>			
<b>SL</b>	<b>Ss</b>	<b>Cc</b>	<b>St</b>
<b>SLO</b>	1,20	1,60	1,00
<b>SLD</b>	1,20	1,57	1,00
<b>SLV</b>	1,20	1,31	1,00
<b>SLC</b>	1,20	1,28	1,00

<b>COEFFICIENTI SISMICI</b>				
<b>SL</b>	<b>Kh</b>	<b>Kv</b>	<b>Amax(m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>Beta</b>
<b>SLO</b>	0,003	0,002	0,170	0,180
<b>SLD</b>	0,003	0,002	0,185	0,180
<b>SLV</b>	0,009	0,004	0,485	0,180
<b>SLC</b>	0,011	0,005	0,595	0,180



#### **8.4 CLASSIFICAZIONE SISMICA**

Nel 2003 sono stati emanati i criteri di nuova classificazione sismica del territorio nazionale, basati sugli studi e le elaborazioni più recenti relative alla pericolosità sismica del territorio. A tal fine è stata pubblicata l'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo

2003, sulla Gazzetta Ufficiale n. 105 dell'8 maggio 2003. Il provvedimento detta i principi generali sulla base dei quali le Regioni, a cui lo Stato ha delegato l'adozione della classificazione sismica del territorio (D.lgs 112/98 e DPR 380/01 - "Testo Unico delle Norme per l'Edilizia"), hanno compilato l'elenco dei comuni con la relativa attribuzione ad una delle 4 zone. Le aree nelle quali è stato riclassificato il territorio nazionale sono a severità decrescente (zona 1, zona 2, zona 3, zona 4).

<b>LA CLASSIFICAZIONE SISMICA ATTUALE</b>	
<b>ZONA 1</b>	E' la zona più pericolosa, dove in passato si sono avuti danni gravissimi a causa di forti terremoti
<b>ZONA 2</b>	Nei comuni inseriti in questa zona in passato si sono avuti danni rilevanti a causa di terremoti abbastanza forti
<b>ZONA 3</b>	I comuni inseriti in questa zona hanno avuto in passato pochi danni. Si possono avere scuotimenti comunque in grado di produrre danni significativi
<b>ZONA 4</b>	E' la meno pericolosa. Nei comuni inseriti in questa zona le possibilità di danni sismici sono basse

Nelle norme tecniche allegata all'ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274/2003 ogni zona sismica è contrassegnata da un diverso valore del parametro  $a_g$  (accelerazione orizzontale massima su suolo di categoria A).

Zona	Accelerazione orizzontale con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni
1	$>0.25$
2	0.15-0.25
3	0.05-0.15
4	$<0.05$

L'area oggetto di intervento, come l'intero Comune di Brindisi (BR), ricade in zona sismica 4 (Fig.41)



**FIG 41** - Classificazione sismica della Puglia

## 9 CAPACITA' PORTANTE DEI DEPOSITI CHE CONDIZIONANO LE FONDAZIONI

Il carico limite del terreno, applicato alla fondazione, produce la rottura del complesso terreno-opera di fondazione; dipendente dalle caratteristiche fisiche e di resistenza del terreno nonché dalla geometria della fondazione. Conoscendo i parametri appena menzionati è possibile calcolare i valori delle capacità portanti dei terreni che condizionano la costruzione, al fine di verificare se sono compatibili con i carichi presunti e previsti in fase progettuale, utilizzando una o più formule (ad es. Terzaghi, Meyerhof, Hansen, Vesic). I diversi autori propongono formule trinomie in cui ciascun termine è legato rispettivamente alla coesione, all'angolo di attrito e al peso specifico del terreno, differendo per l'introduzione di fattori correttivi che tengono conto della profondità della fondazione rispetto al piano campagna nonché di eventuali eccentricità e inclinazione dei carichi.

Nel caso in esame La formula utilizzata è quella proposta da Terzaghi, opportunamente modificata per il calcolo della portanza su rocce litoidi con l'introduzione del parametro RQD e, ai fini fondazionali, i parametri geotecnici caratteristici del terreno sono quelli appartenenti allo strato sismografico 1

$$q_1 = cN_c S_c + \gamma D N_q + 0.5 \gamma B N_{\gamma} S_{\gamma} \quad (a)$$

$$q_2 = q_1 (RQD)^2 \quad (b)$$

Nella relazione (a)  $S_c = 1.0$  e  $S_{\gamma} = 1.0$  nel caso di trave di fondazione;  $B$  è la larghezza della fondazione,  $D$  è la profondità del piano di posa;  $\gamma$  peso di volume,  $c$  coesione e  $\phi$  angolo di attrito interno sono i

valori caratteristici della resistenza del terreno che, combinati con opportuni coefficienti riduttivi, forniscono i valori di progetto di resistenza del terreno.

$N_c$ ,  $N_q$  e  $N_\gamma$  sono i fattori di capacità portante che secondo STAGG e ZIENKIEWICZ per una roccia litoide valgono:

$$N_q = \tan^6 (45^\circ + \varphi/2); N_c = 5 \tan^4 (45^\circ + \varphi/2); N_\gamma = N_q + 1$$

Applicando le formule su menzionate al piano di posa delle fondazioni si ottiene un valore di carico ammissibile uguale a:  $Q_{amm} = 1,8 \text{ Kg/cm}^2$ .