



REGIONE PUGLIA
 PROVINCIA DI BRINDISI
 COMUNE DI CEGLIE MESSAPICA



Progetto: SPV 39 Impianto Agrivoltaico ubicato nell'agro del Comune di Ceglie Messapica (Br), sui terreni censiti nel N.C.T di Ceglie Messapica come da tabella riportata a destra.

Potenza ai fini della connessione 45 MW.
 Potenza di Picco della Cen.le Agrivoltaica 50,4 Mw
 Cod. Rint. da Definire a Cura di Terna S.p.A. 202402966

Piano Particellare Progetto			
ID Foglio Catastale	ID Particella	Nota	Ditta/Proprietà
Foglio 77		3 Parte	Ricci Pasquale
Foglio 77		2 Parte	Ricci Pasquale
Foglio 77		116 Parte	Ricci Pasquale
Foglio 78		6 Completa	Ricci Pasquale
Foglio 78		7 Completa	Ricci Pasquale
Foglio 78		8 Completa	Ricci Pasquale
Foglio 77		1 Completa	Ricci Pasquale
Foglio 78		1 Completa	Ricci Pasquale
Foglio 78		4 Completa	Ricci Pasquale
Foglio 78		5 Completa	Ricci Pasquale
Foglio 77		11 Completa	Ricci Pasquale
Foglio 77		12 Completa	Ricci Pasquale
Foglio 77		208 Completa	Ricci Pasquale
SOMMANO MQ		8084723	

NELLA DISPONIBILITA' DEL PROPONENTE GIUSTO CONTRATTO PRELIMINARE PER LA COSTITUZIONE DI DIRITTO DI SUPERFICIE N. 13648/11327 DEL 11/07/2024 BRINDISI

Codice elaborato	PROGETTO DEFINITIVO	FEBBRAIO 2025
-------------------------	----------------------------	----------------------

CAS.SP39.R17	Relazione geotecnica
Scala. Non Applic.	

DATA	MOTIVO REVISIONE	REDATTO	APPROVATO
19/02/2025	//	ING. FRANCESCO CIRACI'	ING. FRANCESCO CIRACI'

COMMITTENTE: FFK SPV 1 S.R.L.



VIA DURINI 4
 20122 - MILANO (MI)
 P.IVA 13119050964 (IT)

**Relazione Specialistica a cura di:
 Dott.ssa Rossana BALDASSARRE**



PROGETTISTA

Studio di Ingegneria di Ciraci Francesco

Sede legale: San Lorenzo n. 2,
 Ceglie Messapica (Br), 72013,
 Cell.3382328300

Email: ciracifrancesco@gmail.com



Sommario

Premessa	3
Caratteristiche morfo-strutturali	6
Caratteristiche Geologiche generali.....	6
Idrografia superficiale dell'area	7
Caratteristiche idrogeologiche dell'area	8
Indagini geognostiche e caratterizzazione geotecnica	9
Classificazione geomeccanica dell'ammasso roccioso	9
Indagine sismica	14
Profili sismici a rifrazione	15
Profili sismici MASW	18
Valutazione dell'azione sismica.....	21
Elaborazione dei dati	23
Criterio di rottura di Hoek-Brown e metodo equivalente di Mohr-Coulomb.....	25
Modello Geologico-Geotecnico.....	29
Conclusioni	31

Premessa

La scrivente geologa dott.ssa Baldassarre Rossana, regolarmente iscritta all'albo professionale dei Geologi della Regione Puglia, sez A, con il n. 146, è stata incaricata di relazionare in merito alla caratterizzazione geotecnica di un'area ubicata in Comune di Ceglie Messapica (Br), in corrispondenza della quale la ditta "FFK SPV I SR.L." con sede legale a Milano in via Durini 4, intende realizzare un campo agrivoltaico per la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili.

In particolare l'area interessata dal presente studio, si estende per circa 80,84 Ha nelle campagne a est dell'abitato di Ceglie Messapica (vedi: "Stralcio Aerofotogrammetrico"), in adiacenza alla strada provinciale n. 581 per San Michele Salentino.

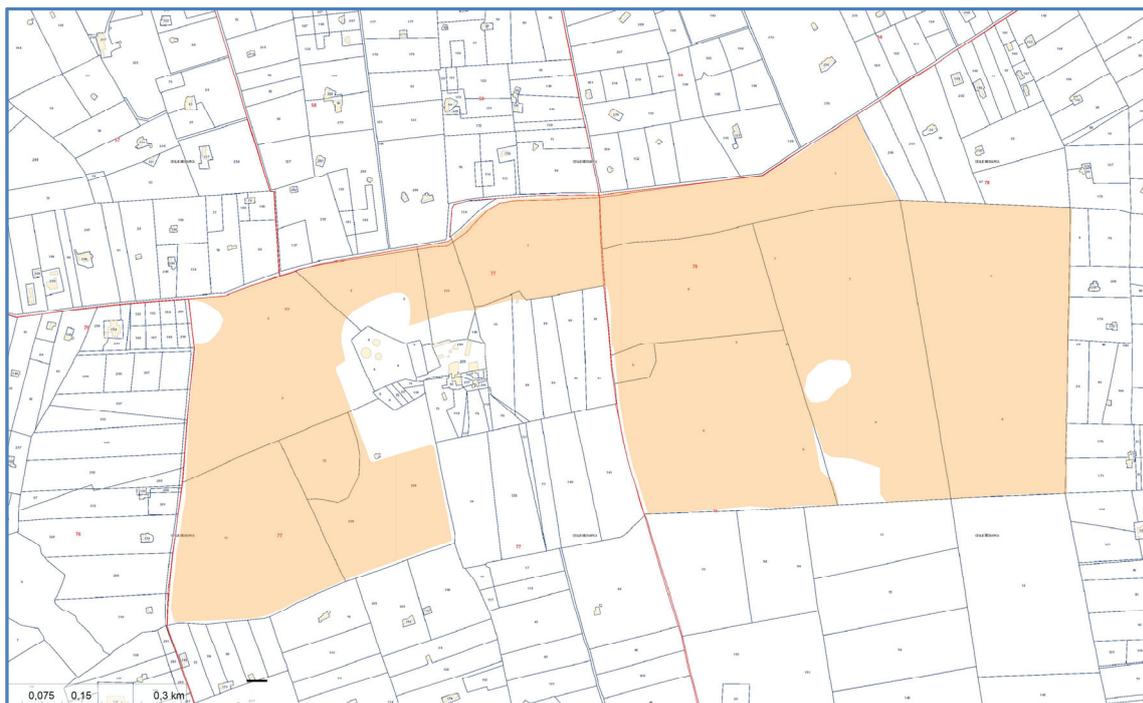


Stralcio Aerofotogrammetrico – C.T.R. Puglia

Catastalmente viene riferita nell'ambito dei fogli n. 77 e 78 del Comune di Ceglie Messapica (vedi: "Stralcio Catastale"), rispettivamente con le particelle:

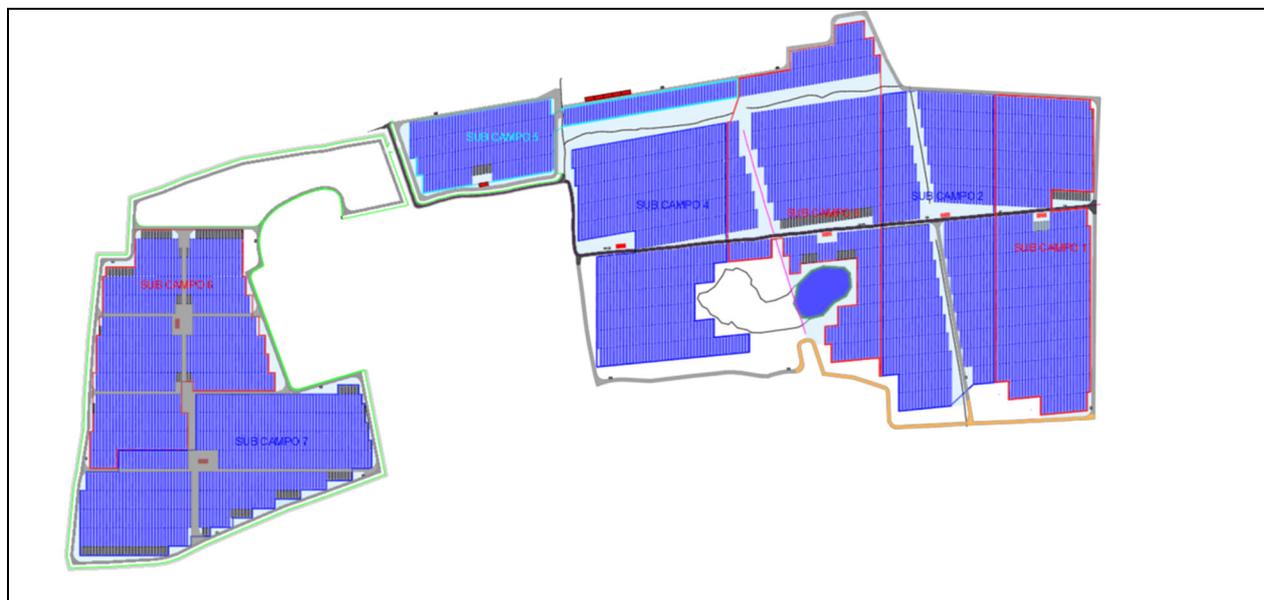
Foglio 77: p.lla n 1, 2, 3, 11, 12, 116 e 208.

Foglio 78: p.lla n. 1, 4, 5, 6, 7 e 8.



Stralcio Catastale

L'impianto agrivoltaico di progetto è suddiviso in 7 sub-campi su cui saranno posizionati 75264 moduli fotovoltaici di potenza unitaria di picco pari a 670 W, i quali genereranno una potenza complessiva pari a 50,4 MW (45,00 MW in uscita) (vedi: "Layout di Progetto").



Layout di Progetto

L'impianto sarà connesso alla rete elettrica di distribuzione nazionale per il tramite della stazione elettrica, mediazione cavidotto in alta tensione a 150 kV di connessione tra detta stazione elettrica e la stazione di utenza; dalle cabine di raccolta (previste sul lato

Nord dell'impianto Agrivoltaico) fino alla stazione di utenza la potenza verrà trasportata tramite un cavidotto a 30 kV in MT con frequenza 50 Hz.

I campi su cui saranno collocati i pannelli saranno interessati anche dalla presenza di colture di alberi di fico perfettamente integrate nel territorio.

Il presente studio, svolto in conformità a quanto previsto dal D.M. LL.PP. 11/03/88 e dalle N.T.C./2018, riferisce in merito a:

- identificazione delle formazioni presenti nel sito;
- tipi litologici;
- struttura e caratteri fisici del sottosuolo;
- aspetti stratigrafici-strutturali-idrogeologici-geomorfologici-litotecnici e fisici;
- indagini geognostiche in situ
- modello geotecnico del sottosuolo;

A tal fine, un accurato rilevamento geologico di superficie ha portato all'identificazione delle formazioni e dei tipi litologici che condizionano il sottosuolo.

Si è proceduto, quindi, con la valutazione delle caratteristiche fisiche e meccaniche dei suddetti litotipi per definire un modello geologico-geotecnico dell'area di interesse.

Per tale finalità sono state analizzate le risultanze di quattro profili sismici eseguiti in situ, sia a rifrazione sia con metodologia masw.

Questi hanno consentito anche una valutazione delle caratteristiche elastiche dei depositi sedimentari presenti e la definizione della risposta sismica locale.

Caratteristiche morfo-strutturali

Il territorio entro cui si sviluppa l'area di interesse, si estende su una superficie morfologica caratterizzata da evidenti ondulazioni della superficie del suolo con quote topografiche che variano tra 170 m e 190 m s.l.m.

In particolare si evidenzia un generale abbassamento della quota topografica della superficie del suolo, procedendo da ovest verso est e sudest.

Il territorio entro cui è ubicata l'area di interesse progettuale, è caratterizzato dalla presenza di piccoli bacini chiusi a reticolo centripeto di cui due nel contesto dell'area stessa. Due doline, infatti, condizionano parte dei lotti di studio.

Le aree occupate da dette evidenze idrogeomorfologiche non saranno interessate dal posizionamento dei pannelli fotovoltaici.

Caratteristiche Geologiche generali

L'area di studio si colloca in corrispondenza della parte più meridionale di una struttura rialzata da fenomeni tettonici distensivi e che costituisce il massiccio carbonatico mesozoico della "Murgia". Su tutta l'area in esame affiorano, quindi, depositi calcarei e calcareo-dolomitici riferibili alla formazione del Calcarea di Altamura che costituisce l'ossatura di gran parte del territorio Pugliese.

La successione stratigrafica nel territorio di interesse comprende dal basso verso l'alto i seguenti termini (vedi: "Rilievo Geologico di superficie"):

- . - *Calcari di Altamura*
- . - *Depositi colluviali ed eluviali*

La formazione geologica che condiziona l'intera area, è rappresentata dai Calcari di Altamura di età cretacea.

Trattasi di calcari bioclastici, bianchi o grigiastri di norma sub-cristallini e tenaci, a frattura concoide. La stratificazione è sempre evidente con strati di spessore variabile da 20 a 50 cm, talora si rinvengono banchi fino a 1.5 metri.

Frequenti sono le intercalazioni, all'interno della stratificazione calcarea, costituite da livelli più sottili o, talora, da argille e marne.

In genere si osserva un elevato grado di fratturazione, che localmente diviene altamente pervasivo ed a spaziatura estremamente ravvicinata (pochi cm) in corrispondenza di fasce tettoniche a maggiore disturbo.

Localmente, lo sviluppo della fratturazione risulta tale da creare una fitta rete di discontinuità nell'ammasso roccioso.

All'interno della formazione carbonatica è presente una estesa falda di acqua dolce, denominata “profonda” o “carsica”, che circola a pelo libero, alla profondità di circa 130 m dal piano campagna.

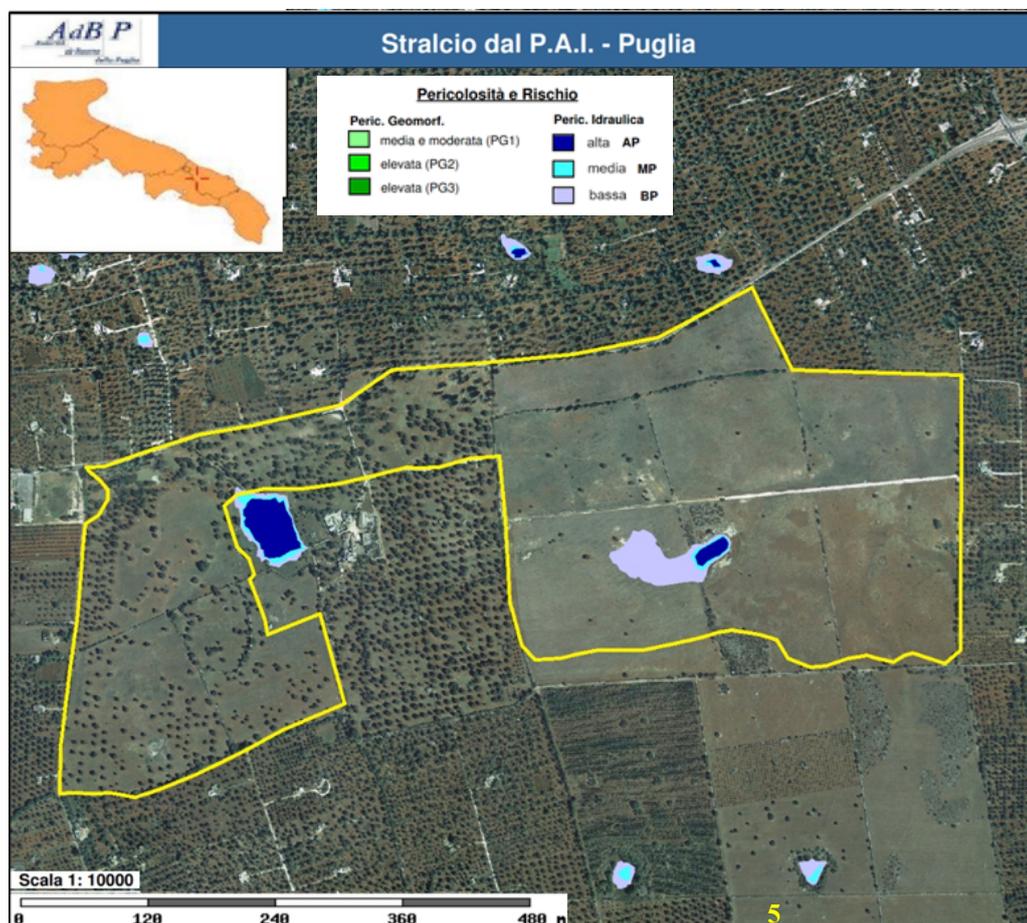
Non vi è interferenza, quindi, con le fondazioni delle opere di progetto.

Idrografia superficiale dell'area

Per quanto concerne l'idrografia superficiale non si può prescindere dalla verifica della compatibilità delle previsioni del progetto al Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) dell'ex Autorità di Bacino della Regione Puglia, ora DAM (Distretto per l'Appennino Meridionale)

La morfologia subpianeggiante del territorio unitamente alla solubilità della roccia in acque normali, ha determinato il formarsi di alcune linee di impluvio, alcune particolarmente incise, che drenano le acque meteoriche di scorrimento superficiale e le convogliano verso le quote più basse.

L'area di stretto interesse è caratterizzata dalla presenza di due doline, coincidenti con la delimitazione di Alta Pericolosità idraulica (AP) e da una depressione endoreica su cui vige il vincolo di Bassa Pericolosità idraulica (BP) (vedi: “Stralcio dal PAI - Puglia”).



Come rilevabile sulla carta tematica consultabile sul sito del Distretto dell'Appennino Meridionale e relativa al Reticolo Idrografico, non sono presenti “corsi d'acqua” che attraversano l'area di stretto interesse.



Reticolo Idrografico (da: DAM – Distretto Appennino Meridionale)

 *Reticolo idrografico*

Caratteristiche idrogeologiche dell'area

La disposizione spaziale dei litotipi presenti, la loro permeabilità e il modo in cui gli stessi vengono a contatto tra loro, condizionano sia la distribuzione degli acquiferi sia la circolazione idrica sotterranea.

Le rocce descritte in precedenza sono rocce calcaree e calcareo-dolomitiche permeabili per fessurazione e carsismo o permeabilità in grande. Sono rocce, infatti, con un grado di permeabilità molto elevato ($k=10^{-1} \div 10^{-2}$ cm/s) a causa dell'intenso stato di fratturazione che condiziona l'ammasso roccioso.

All'interno della formazione carbonatica è presente una falda di acqua dolce, denominata “profonda” o “carsica”, che circola “sostenuta” ovunque dall'acqua marina di invasione continentale su cui “galleggia” per effetto della minore densità.

La falda profonda, generalmente circolante a pelo libero e la quota di rinvenimento è, comunque, abbastanza costante attestandosi intorno ai +50 m s.l.m.

Indagini geognostiche e caratterizzazione geotecnica

In corrispondenza del territorio direttamente interessato dall'intervento di progetto, la formazione geologica che condiziona il sottosuolo, è rappresentata da rocce calcaree e calcareo dolomitiche biancastre, stratificate o in banchi di spessore fino a circa 1,5 m.

Il banco roccioso si presenta molto fratturato e carsificato specialmente nei primi 6-7 metri di profondità. In superficie è presente uno strato di terreno agrario misto a pietrame calcareo passante a roccia calcarea disgregata per spessore mediamente contenuti entro un metro di Potenza, ma che in corrispondenza dell'area depressa adiacente la dolina, può raggiungere profondità fino a due metri dal piano campagna.

Informazioni sulle peculiarità geotecniche dei depositi calcarei in posto sono state acquisite sia da precedenti lavori espletati nelle vicinanze del sito di interesse sia dall'elaborazione delle prove sismiche effettuate in situ.

In particolare, si è proceduto prima ad una classificazione generale dell'ammasso roccioso applicando la metodologia di Bieniawski su pareti di cave presenti nei dintorni, quindi è stato possibile pervenire ad alcuni valori dei parametri geotecnici caratteristici dall'elaborazione dei risultati dell'indagine sismica.

Classificazione geomeccanica dell'ammasso roccioso

Nel valutare il comportamento geomeccanico di terreni lapidei (ad es. i calcari presenti nell'area di progetto) a differenza di quanto accade per un terreno sciolto (sabbie, limi, argille) occorre tenere presente una serie di problematiche legate alla non corrispondenza tra le proprietà fisico-meccaniche che la roccia possiede quando viene considerata a livello di campione di laboratorio e quelle invece che caratterizzano l'ammasso roccioso nel suo complesso.

Dalla vasta letteratura reperibile in merito al tipo litologico in esame è stato possibile estrapolare i valori relativi ai parametri geotecnici che meglio caratterizzano il deposito.

Di seguito si riportano i dati relativi a prove su campioni di roccia intatta:

Caratteristiche fisiche e meccaniche:

peso specifico reale	2.71	g/cm ³
peso specifico apparente	2.66	g/cm ³
grado di compattezza	0.981	g/cm ³
porosità	0.019	
coefficiente di imbibizione	0.45 ÷ 0.80	%
resistenza a compressione	1240	kg/cm ²

I suddetti dati si riferiscono, come già detto, a campioni di roccia mentre il deposito nella sua globalità si presenta degradato per la presenza di fessure, fratture, giunti di strato e manifestazioni carsiche più o meno evidenti.

Infatti, a differenza di una terra, la cui assimilazione ad un mezzo omogeneo ed isotropo non è una forzatura tale da condizionarne il risultato, la resistenza di un terreno lapideo dipende solo in minima parte dalle sue caratteristiche intrinseche (densità apparente, coesione, attrito, resistenza a compressione monoassiale) quanto dalle condizioni geologico-strutturali dell'ammasso roccioso nel suo complesso.

È, quindi, legata alla presenza di discontinuità sedimentologiche (variazioni del grado di cementazione), stratigrafiche (giunti di stratificazione), strutturali (piani di fratturazione, faglie, ecc.), nonché dall'incidenza di fattori quali lo stato di alterazione ed il grado di carsificazione.

Quest'ultimo aspetto risulta di primaria rilevanza in tutte le rocce lapidee affioranti nella nostra regione essendo esclusivamente rocce di composizione carbonatica le quali sono andate incontro per lunghi periodi di tempo a fenomeni di dissoluzione carsica (calcari) e paracarsica (calcareniti).

Per tale motivo risulta necessario determinare le condizioni qualitative globali dell'ammasso roccioso interessato dai carichi di fondazione, in modo da poter stabilire opportuni fattori di riduzione del carico ammissibile di progetto.

I sistemi di classificazione si basano sull'esame degli indici di qualità ed alcuni parametri caratteristici scelti in modo da fornire un giudizio il più possibile completo sulle caratteristiche globali dell'ammasso roccioso.

La classificazione di Bieniawski (1973), nota come classificazione RMR (acronimo di Rock Mass Rating), tiene conto di 5 parametri relativi allo stato della roccia e dell'ammasso roccioso e di un indice di correzione il cui valore è funzione dell'orientamento delle discontinuità e del problema affrontato (gallerie, versanti o fondazioni).

I parametri sono:

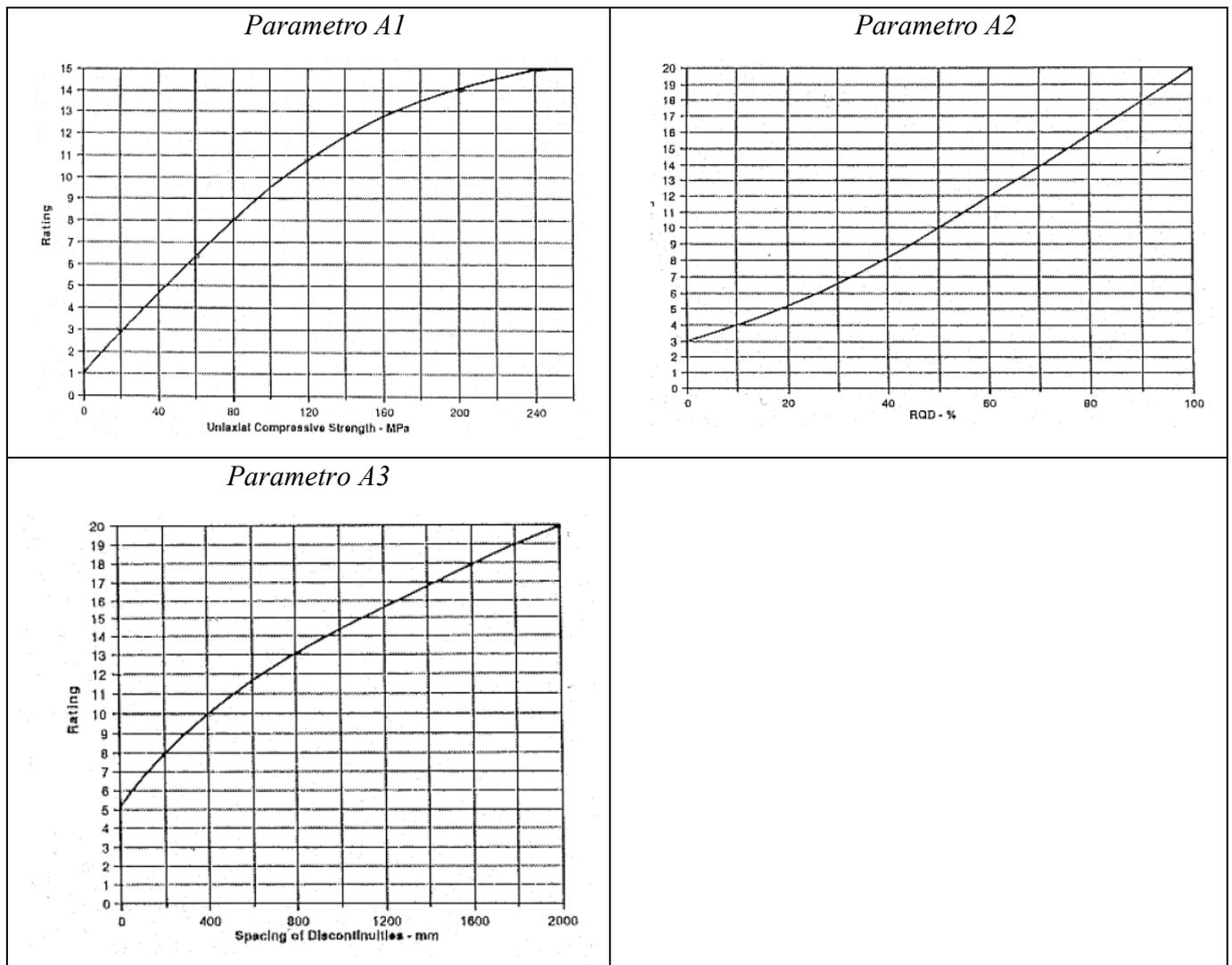
- A1: Resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta;
- A2: Indice di qualità RQD (Rock Quality Designation);
- A3: Spaziatura dei giunti;
- A4: Condizioni dei giunti (scabrezza, alterazione delle pareti, apertura, materiale di riempimento);
- A5: Condizioni idrauliche dei giunti;
- Ic: Indice di correzione.

Ad ogni parametro è associata una scala di valori parziali la cui somma algebrica fornisce il valore dell'indice complessivo dell'ammasso roccioso (denominato RMR), ovvero:

$$RMR = (A1 + A2 + A3 + A4 + A5) - Ic$$

La formulazione originaria del metodo di classificazione di Bieniawski (1973), ha subito diverse modifiche, integrazioni ed aggiornamenti, che hanno portato alla definizione di varie versioni, di cui le più usate sono quelle del 1976, del 1979 e del 1989.

Nel presente studio è stata adottata la versione più recente, ovvero quella del 1989. Per classificare l'ammasso roccioso in esame si è fatto quindi riferimento ai grafici ed alle tabelle relative al metodo RMR 89, che, per chiarezza e completezza di trattazione, sono state di seguito allegate.



PARAMETRI	INTERVALLI DI VALORI				
Lunghezza giunto	<1m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	>20 m
Indice	6	4	2	1	0
Apertura giunto	Chiuso	<0,1 mm	0,1-1 mm	1-5 mm	>5 mm
Indice	6	5	4	1	0
Rugosità giunto	Molto rugoso	Rugoso	Leggerm. rugoso	Liscio	Laminato
Indice	6	5	3	1	0
Riempimento	Nessuno	Compatto<5mm	Compatto>5mm	Molle<5mm	Molle>5mm
Indice	6	4	2	2	0
Alterazione giunti	Non alterati	Legg.alterati	Mediam.alterati	Molto alterati	Decomposti
Indice	6	5	3	1	0

Parametro A4

5	CONDIZIONI IDRAULICHE	Afflusso per 10m di lunghezza del tunnel (litri/min)	Assente	<10	10-25	25-125	>125
		Rapporto Pressione acqua nei giunti/Pressione naturale in sito	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5
		Condizioni generali	Giunti asciutti	Umidi	Bagnati	Stillicidio	Venute d'acqua
Indice			15	10	7	4	0

Parametro A5

Orientamento dei giunti	Moito favorevole	Favorevole	Discreto	Sfavorevole	Moito sfavorevole
Gallerie e miniere	0	-2	-5	-10	-12
Fondazioni	0	-2	-5	-15	-25
Versanti	0	-5	-7	-50	-60

Indice di correzione Ic

RMR	0-20	21-40	41-60	61-80	81-100
CLASSE	V	IV	III	II	I
QUALITA'	Moito scadente	Scadente	Discreta	Buona	Ottima

Classificazione dell'ammasso roccioso: Indice RMR

Una prova su campione di roccia, prelevato in un sondaggio a sud dell'abitato di Ceglie Messapica ha rilevato un valore della compressione monoassiale pari a 42 Mpa (vedi certificato di prova)



CERTIFICATO DI PROVA N°: 592/Cs/22 Pagina 1/1	DATA DI EMISSIONE: 16/03/22	Inizio analisi: 16/03/22
VERBALE DI ACCETTAZIONE N°: 63 del 15/03/22	Apertura campione: 15/03/22	Fine analisi: 16/03/22

COMMITTENTE:	
RIFERIMENTO:	4, Ceglie Messapica (B)
SONDAGGIO: S1	CAMPIONE: C1 PROFONDITA': m 2.20 - 2.40

PROVA DI COMPRESSIONE UNIASSIALE

Modalità di prova: Norma ASTM-D 7012 method C

Provino n°:	1
Velocità di deformazione (MPa/sec):	0.20
Altezza (cm):	16.40
Diametro (cm):	8.06
Sezione (cm²):	51.02
Peso di volume (kN/m³):	22.7
Resistenza a compressione (MPa):	41.70

Nel caso specifico, analizzando le pareti esposte della cava, si ottiene:

A1 = 5 (\approx 42 MPa);

A2 = 10 (in quanto i valori medi di RQD non sono superiori al 50 %);

A3 = 11 (presenza di discontinuità aventi una spaziatura media non superiore a 60 cm);

A4 = 13 (giunti mediamente lunghi, con apertura tra 1÷5 mm, leggermente rugosi, con eventuali riempimenti di terre rosse e mediamente alterati);

A5 = 15 (giunti asciutti, visto che il livello piezometrico della falda è situato a profondità di oltre 30 metri rispetto al p.c.), risulta $RMR_{base} = (5 + 10 + 11 + 13 + 15) = 54$, tale valore può essere utilizzato per la definizione del valore dell'angolo di resistenza al taglio (ϕ) e della coesione efficace (c'), mediante le seguenti relazioni:

$$\phi = 0,5RMR_{base} + 5 = 32^\circ$$

$$c' = RMR_{base} \times 5 = 270 \text{ kPa}$$

$I_c = -5$ (correzione per fondazioni su roccia stratificata con condizioni di orientamento dei giunti ritenute discrete).

L'indice di qualità RMR attribuibile all'ammasso roccioso in esame risulta pertanto pari a:

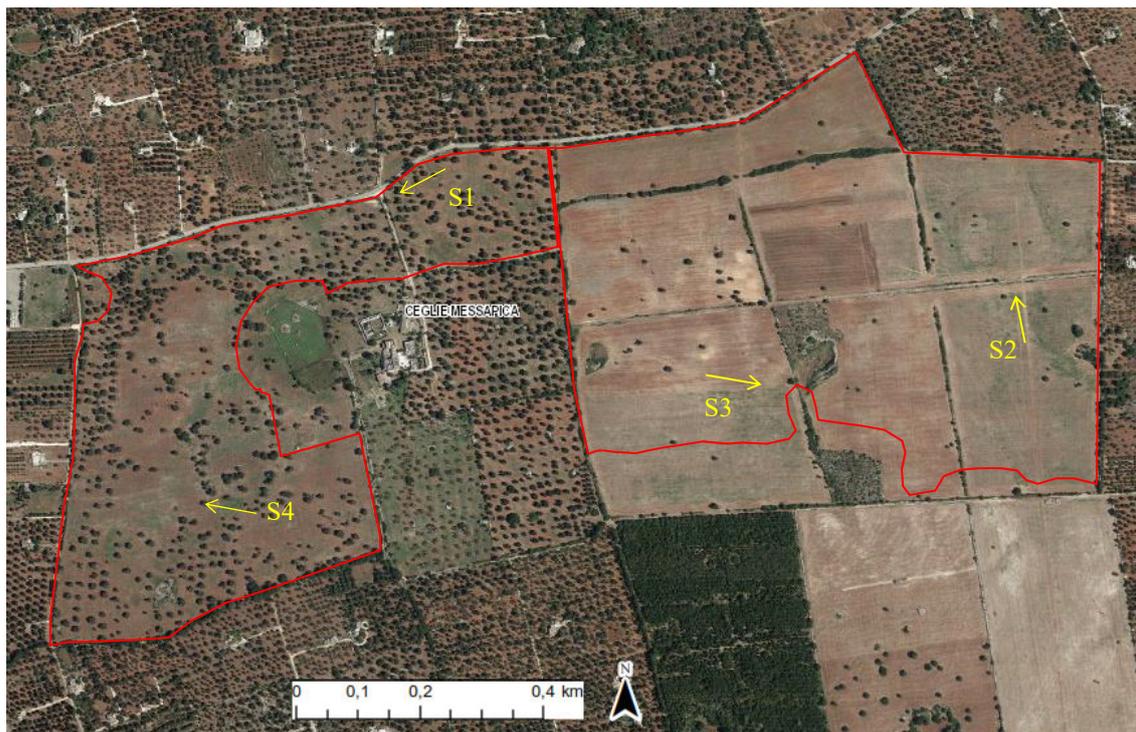
$$RMR_{corretto} = 54 - 5 = 49,$$

ovvero si tratta di un ammasso roccioso di III classe, di qualità "**discreta**".

A differenza di quanto avviene con le terre sciolte, negli ammassi rocciosi la resistenza al taglio del materiale lapideo non può generalmente essere descritta con il criterio di rottura di Coulomb, poiché quest'ultimo indica una correlazione fra resistenza al taglio del materiale e pressione di confinamento di tipo lineare, mentre nelle masse rocciose tale correlazione è chiaramente e notoriamente di tipo non lineare.

Indagine sismica

Allo scopo di acquisire ulteriori informazioni sulle caratteristiche elastiche sia del deposito calcareo che condiziona il sottosuolo dell'area di interesse geotecnico, sono stati eseguiti quattro profili sismici a rifrazione e masw (vedi: “Ubicazione profili sismici”) che hanno consentito anche di classificare il suolo di fondazione ai sensi della Normativa Tecnica delle Costruzioni 2018.



Ubicazione profili sismici

Profili sismici a rifrazione

Generalità sulle metodologie utilizzate

Il metodo sismico consiste nel provocare una perturbazione elastica nel terreno e nel misurarne i tempi di percorrenza dalla sorgente ad una serie di rilevatori (geofoni), posti lungo una linea retta a distanze crescenti dalla sorgente.

Attraverso l'interpretazione di tali dati, basata essenzialmente sulla legge di Snell (sismica a rifrazione con onde P), è possibile differenziare lungo la linea dei geofoni e in verticale, i vari strati costituenti il terreno, definendone lo spessore e la velocità di propagazione delle onde elastiche. È altresì possibile rilevare l'esistenza di zone anomale nel terreno, legate a variazioni litologiche o alterazioni.

L'indagine sismica è stata finalizzata alla ricostruzione del modello sismostratigrafico dell'area ed all'individuazione dello spessore del terreno vegetale che maschera la formazione sottostante.

L'elaborazione del profilo sismico è avvenuta mediante apposito algoritmo delle sezioni sismografiche, con restituzione tomografia. Tale metodo permette di individuare anomalie nella velocità di propagazione delle onde sismiche, con un elevato potere risolutivo offrendo la possibilità di ricostruire stratigraficamente situazioni complesse, non risolvibili con differenti tecniche di indagine.

La tomografia sismica, rispetto alla convenzionale sismica a rifrazione, limita i problemi interpretativi dovuti agli strati ad inversione di velocità (orizzonte fantasma) o di ridotti spessori.

Essa consiste nella ricostruzione di sezioni bidimensionali (2D) realizzate mediante serie di stendimenti sismici a rifrazione con sismografo a 12 canali.

Lo strumento di acquisizione è il Geode, della Geometrics con geofoni da 12 Hz, il software utilizzato per l'elaborazione tomografica è il Rayfract.

La sezione di output del software di interpretazione geofisica è in grado di rappresentare la discretizzazione del sottosuolo indagato in differenti sismogrammi, ovvero livelli caratterizzati da omologhe velocità sismiche.

Per il trattamento dei dati, per la ricostruzione tomografica dell'immagine, si utilizza una suddivisione dell'area di studio in celle elementari, calcolando per ciascuna di queste un valore di velocità congruente con il tempo di tragitto medio relativo ai percorsi dei raggi sismici che le attraversano; la presentazione delle elaborazioni eseguite dà come risultato una mappa della distribuzione delle velocità sismiche in una sezione piana contenente le sorgenti ed i geofoni.

Le indagini sismiche, in pratica, si effettuano misurando i tempi diretti di propagazione nel terreno delle onde sismiche tra una sorgente di energia, e uno o più sensori (geofoni) che vengono posizionati lungo un allineamento a distanze progressivamente crescenti dal punto di emissione dell'energia. Le indagini possono essere effettuate sia a livello del suolo che in foro.

Le onde elastiche possono essere generate mediante l'utilizzazione di masse battenti o tramite esplosioni controllate.

L'impiego dell'una o dell'altra fonte di energizzazione dipende essenzialmente dalla profondità d'investigazione richiesta.

In tale campagna di indagine la prospezione sismica è stata realizzata posizionando sorgenti e geofoni lungo un allineamento, utilizzando 12 geofoni con 3 registrazioni per ogni stendimento. L'energizzazione è stata del tipo a massa battente.

La restituzione grafica è stata presentata in una finestra profonda 12 metri.

Il risultato finale è la rappresentazione delle velocità (in m/s) per piani o sezioni indagate visualizzata mediante una scala cromatica, che va dal blu (basse velocità) al rosso (alte velocità).

Quanto più il mezzo attraversato dalle onde sismiche è rigido e incompressibile, tanto maggiore sarà la sua velocità caratteristica.

Valori bassi della velocità mettono in evidenza la variazione negativa delle caratteristiche elastiche e meccaniche

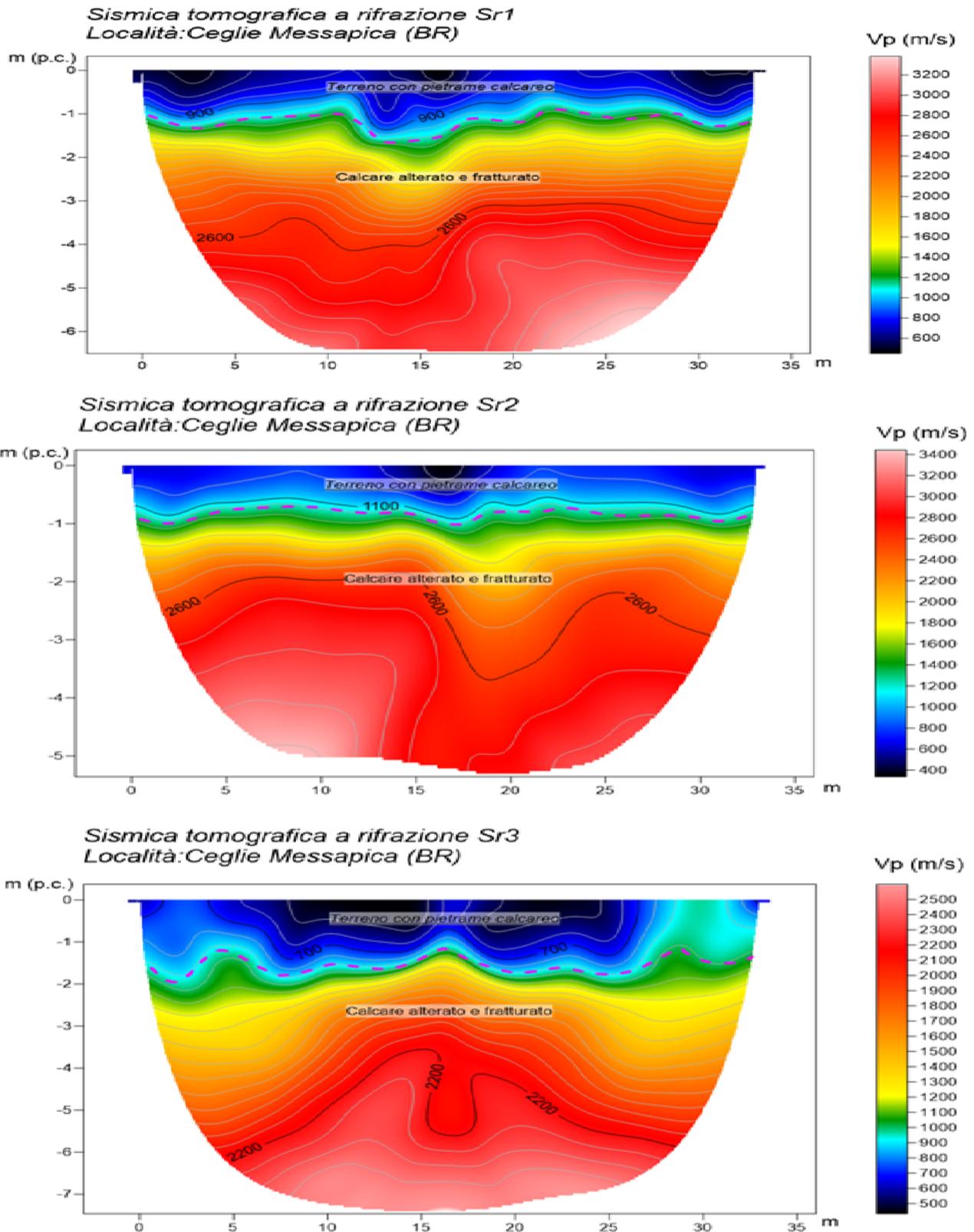
L'elaborazione tomografica e la restituzione del modello geofisico è stata effettuata con il software Rayfract che esegue l'inversione tomografica con il metodo WET (Wavepath Eikonal Traveltime tomography processing).

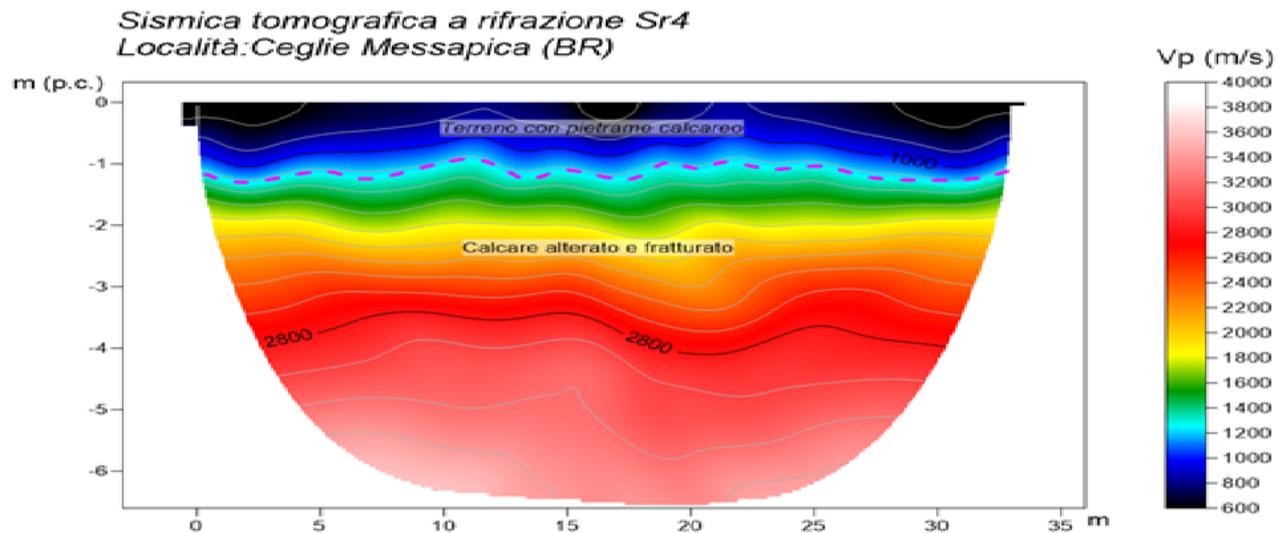
Descrizione dei risultati

Tutti e quattro i profili sismici effettuati hanno permesso di rilevare un modello a due strati. Lo strato affiorante più superficiale e caratterizzato da velocità delle onde longitudinali V_p variabili tra 500 m/s e 800 m/s, è rappresentato da una sottile copertura di terreno agrario misto a roccia calcarea molto fratturata e disgregata.

Lo spessore di detto strato è generalmente contenuto entro $0,8 \div 1,2$ m di potenza. Solo il profilo effettuato in corrispondenza della depressione adiacente la dolina, ubicata nel settore orientale dell'area di interesse, ha evidenziato spessore maggiori, fino a circa 2,0 m di potenza.

Lo strato sottostante è costituito da roccia calcarea e calcareo-dolomitica, più o meno fratturata e carsificata, ma più compatta rispetto allo strato di copertura. Le velocità sismiche longitudinali, infatti, registrano valori superiori a 2000 m/s, fino a circa 2900 m/s.





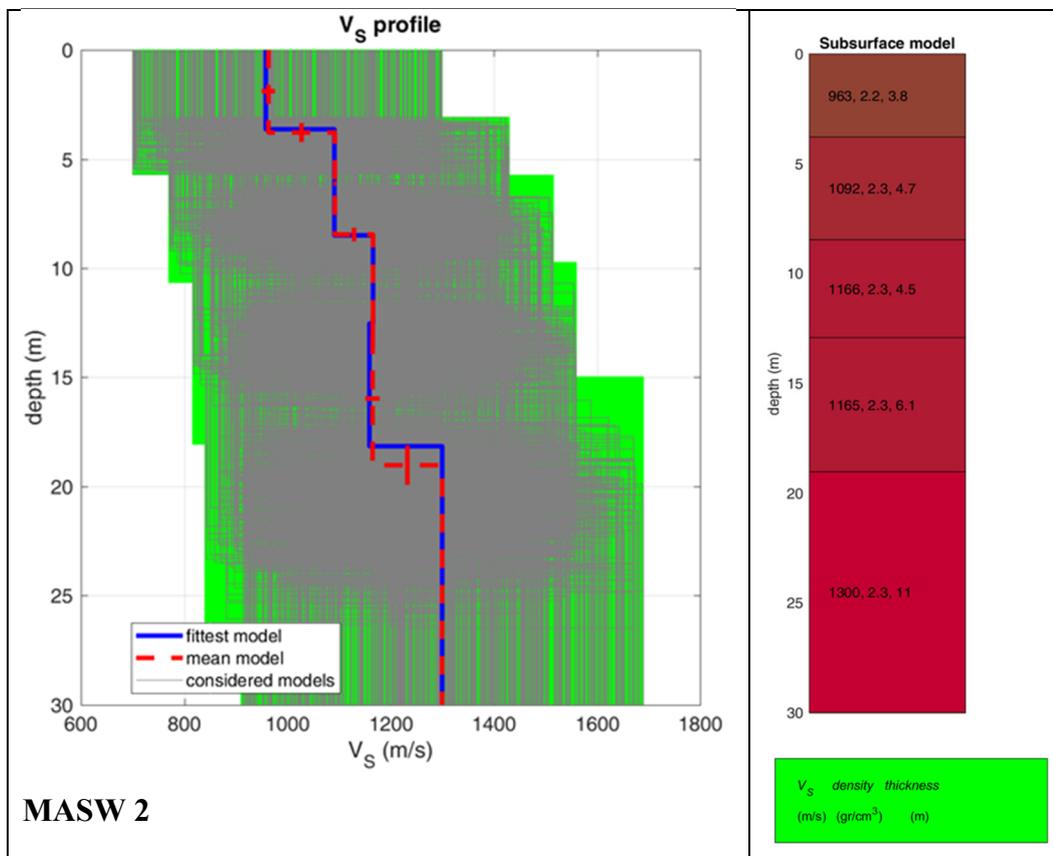
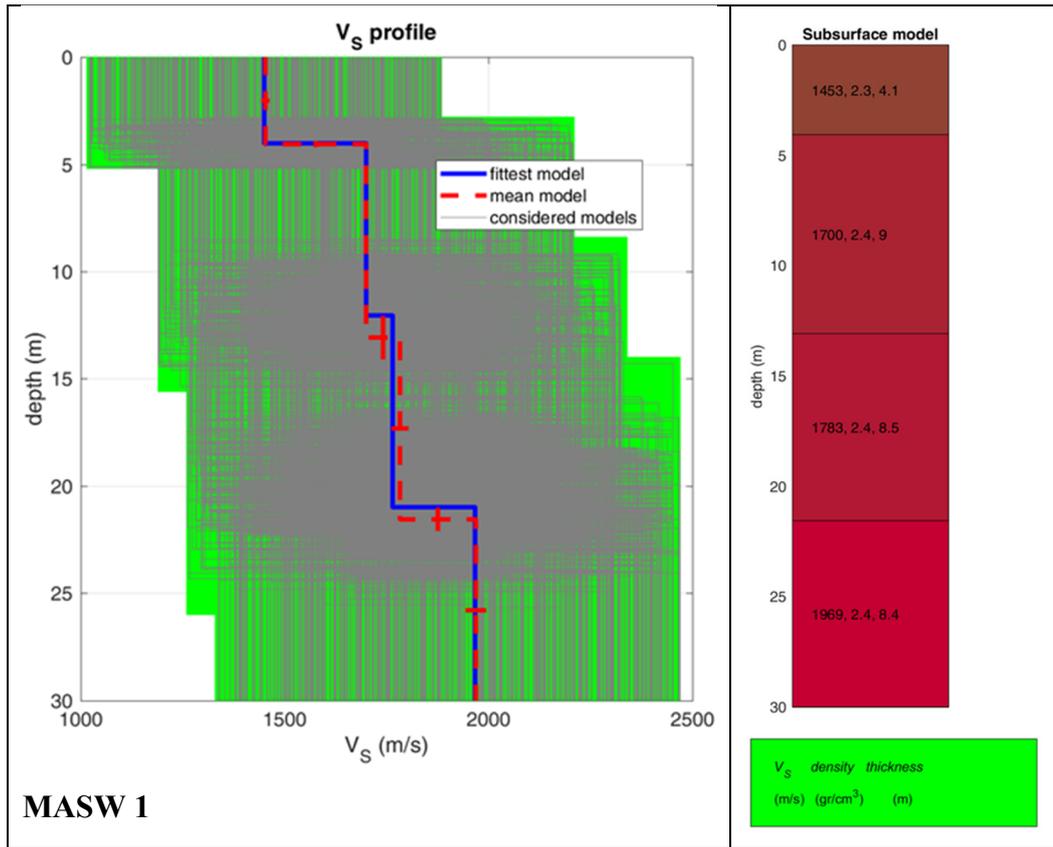
Profili sismici MASW

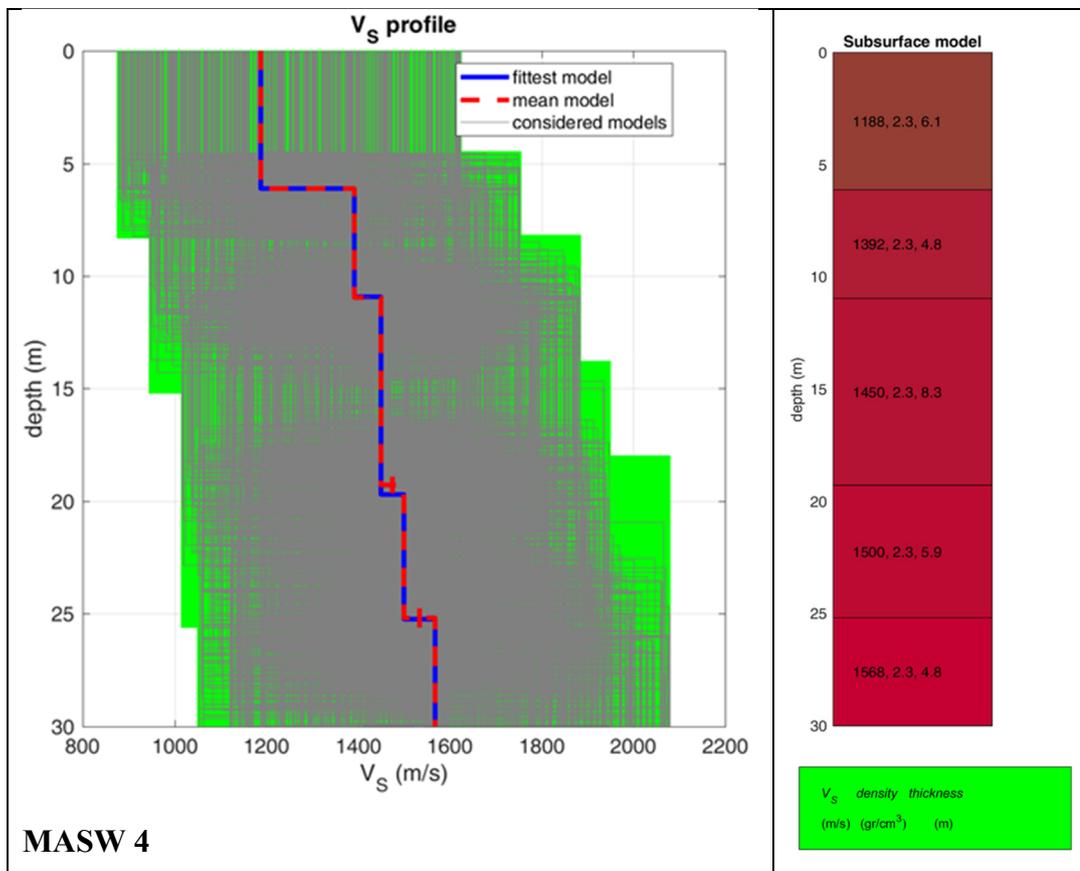
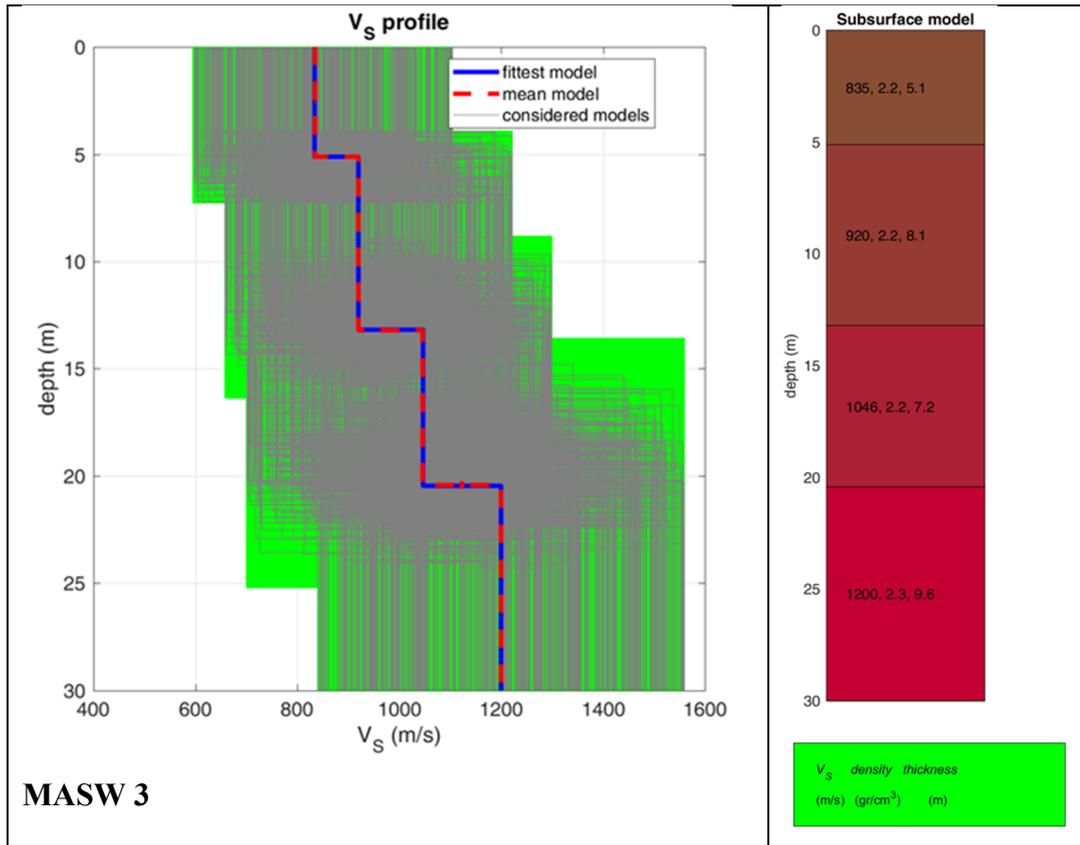
Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che individua il profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s , basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi accelerometri o geofoni posti sulla superficie del suolo.

Le onde superficiali di Rayleigh, durante la loro propagazione vengono registrate lungo lo stendimento di geofoni (da 4.5 Hz) e vengono successivamente analizzate attraverso complesse tecniche computazionali basate su un approccio di riconoscimento di modelli multistrato di terreno.

I profili eseguiti con metodologia Masw, di cui si allegano le curve di dispersione e il modello V_s del sottosuolo, hanno restituito velocità trasversali diverse che aumentano al progredire della profondità.

Ciò evidenzia il differente stato di fratturazione del deposito carbonatico la cui compattezza migliora sensibilmente con la profondità.





Valutazione dell'azione sismica

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, è necessario valutare la categoria topografica di appartenenza del sito definita in base alle caratteristiche morfologiche della superficie, come definite nella tab. 3.2.III delle NTC/2018:

T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 5^\circ$
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 $i > 30^\circ$

Il sito in esame si presenta dolcemente movimentato, ma con pendenze medie inferiori a 15° e, quindi, configurabile in una categoria topografica "T1".

Per valutare la risposta sismica locale, si è fatto riferimento ad un approccio semplificato basato sull'individuazione della categoria di sottosuolo di riferimento come definite nella tabella 3.2.II delle N.T.C./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 caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.</i>
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.</i>
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.</i>
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.</i>
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.</i>

Tale classificazione si effettua in base ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio $V_{s,eq}$ entro i primi 30 m di profondità del sottosuolo, riferendosi al piano di imposta delle fondazioni (trattandosi di fondazioni superficiali) o comunque fino al raggiungimento del bedrock ($V_s > 800$ m/s) qualora intercettabile a profondità $H < 30$ m:

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

h_i = spessore dello strato i -esimo
 $V_{s,i}$ = 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/sec

Con la tecnica Masw è stato possibile calcolare il parametro V_{s-eq} e di conseguenza caratterizzare il sito in una delle categorie di suolo di fondazione definite nella nuova normativa sismica.

Dato che il valore della velocità delle onde trasversali è sempre > 800 m/s per profondità superiori a 30 m dal p.c., la $V_{seq} = V_{s30}$.

Dalle indagini Masw eseguite, il suolo di fondazione dell'area di studio ricade, per tutti e quattro i profili, nella Categoria A (ai sensi della tab. 3.2.II delle N.T.C./ 2018):

“Ammassi rocciosi affiorante 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”

Elaborazione dei dati

Lo studio condotto e le indagini effettuate in situ, indicano che i terreni che costituiranno il piano di fondazione dell'impianto di progetto, sono rappresentati da rocce calcaree e calcareo-dolomitiche stratificate e molto fratturate, a luoghi carsificate.

Lo strato più superficiale (**Unità Geologica-Geotecnica R**), è costituito da terreno agrario e pietrame passante a roccia calcarea, molto fratturata e alterata, con presenza di terra rossa, fino a profondità pari a circa 1,0÷1,2 m dal piano campagna. In corrispondenza di depressioni della superficie morfologica, possono aversi spessore anche di due metri.

Segue, fino a circa 6-7 m dal p.c., (**Unità Geologica-Geotecnica Ca 1**) uno strato calcareo stratificato e fratturato.

È presente, quindi, fino alla profondità di interesse geotecnico (**Unità Geologica-Geotecnica Ca 2**) un deposito calcareo-dolomitico stratificato e/o in banchi, più compatto e meno fratturato.

L'indagine ha evidenziato, quindi, la presenza di sismostrati caratterizzati da velocità sismiche i cui valori medi cautelativi sono riportati nello schema seguente in cui sono calcolati anche il peso di volume (γ) e il modulo di Poisson (ν) dedotti empiricamente dalle seguenti relazioni:

Peso di volume $\gamma = 0,28V_p^{0,25}$

Modulo di Poisson
$$\nu = \frac{0,5 \left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1}{\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1}$$

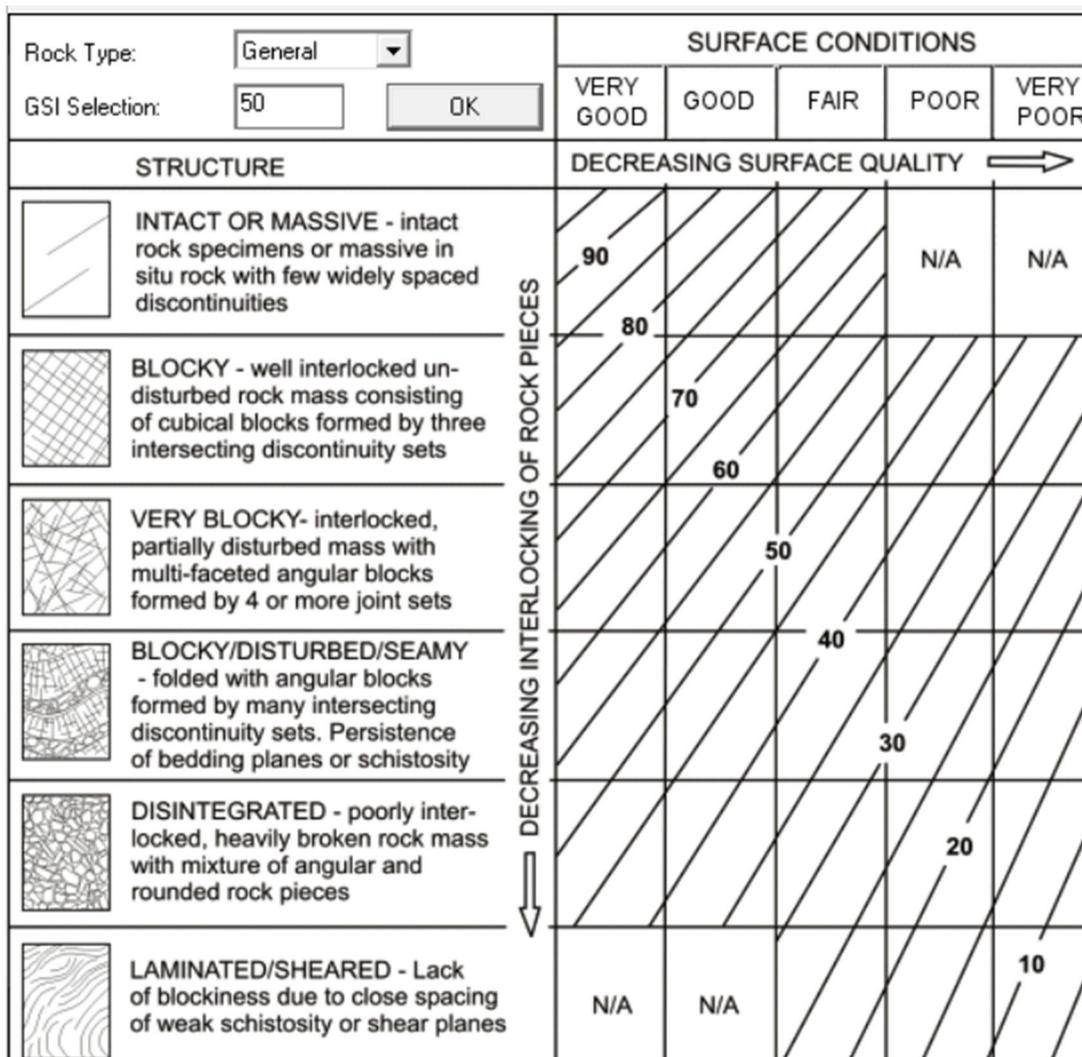
Profondità (m dal p.c.)	litologia	Modello geologico	
-da 0,0 m a 2,0 m		Unità geologico-geotecnica R Terreno vegetale misto a pietrame calcareo completamente degradato	$V_p = 800$ m/s $V_s = 500$ m/s $\nu = 0,35$ $\gamma = 1,7 \div 1,8$ t/mc
- da 1,5 a $\approx 6/7$ m		Unità geologico-geotecnica Ca1 calcarei stratificati e fratturati (<i>Calcari di Altamura - Cretaceo, Mesozoico</i>)	$V_p = 1800$ m/s $V_s = 900-1400$ m/s $\nu = 0,33$ $\gamma = 1,8 \div 1,9$ t/mc
- da 6/7 m fino alla profondità di interesse geotecnico		Unità geologico-geotecnica Ca2 Calcari stratificati poco fratturati (<i>Calcari di Altamura- Cretaceo, Mesozoico</i>)	$V_p = 2400$ m/s $V_s = 1100-1800$ m/s $\nu = 0,30$ $\gamma = 2,0$ t/mc

Per dette unità litoidi, le caratteristiche meccaniche sono state ricavate in base alle correlazioni proposte da N. Barton in -Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy, 2006, e modificato, da Carrozzo et Al. per le calcareniti salentine.

Conoscendo il valore della velocità longitudinale V_p , è possibile una stima dell'indice Q_c ($Q_c = Q$ normalizzato rispetto ad una resistenza a compressione monoassiale).

Utilizzando, quindi, le correlazioni che legano Q al Geological Strength Index (GSI) di Hoek & Brown, è possibile stimare i parametri elastici e di resistenza al taglio dell'ammasso roccioso.

La classificazione GSI di Hoek & Brown è deducibile, inoltre dallo schema specifico di seguito allegato.



Critério di rottura di Hoek-Brown e metodo equivalente di Mohr-Coulomb

Il criterio di rottura secondo Hoek e Brown fu proposto dagli autori nel 1980; la formulazione teorica originaria ha poi subito numerose modifiche ed aggiornamenti, l'ultimo dei quali risale al 2002.

A partire dai valori di compressione uniassiale (σ_{ci}) e delle costanti m_i (costante del litotipo considerato e GSI (geological strength index), è stato possibile calcolare mediante software, i parametri dell'ammasso calcarenitico in situ (Area 4 e 5), con il metodo di Hoek- Brown comparato con quello di Mohr-Coulomb per gli scavi in roccia.

I valori di c' e ϕ si possono quindi ottenere solo attraverso lo sviluppo di una tecnica numerica per la soluzione in forma implicita.

Il software RocLab, utilizzato per il calcolo, è un programma di geomeccanica che richiede in input alcuni parametri caratteristici dell'ammasso roccioso indagato e, attraverso una correlazione tra i criteri di rottura di Hoek-Brown e di Mohr-Coulomb, restituisce i valori dei parametri che esprimono e quantificano il grado di resistenza e deformabilità dello stesso ammasso roccioso.

I parametri richiesti in entrata sono:

- resistenza a compressione monoassiale della roccia di cui è costituito l'ammasso calcarenitico (in MPa):
- costante di Hoek-Brown per la roccia intatta (tabulati per i vari tipi di roccia nel data-base interno del programma);
- indice G.S.I.: nel caso specifico è stato ricavato mediante la modellazione geologica;
- indice di disturbo D (tiene conto degli effetti di disturbo indotti dalle attività di scavo e sbancamento).

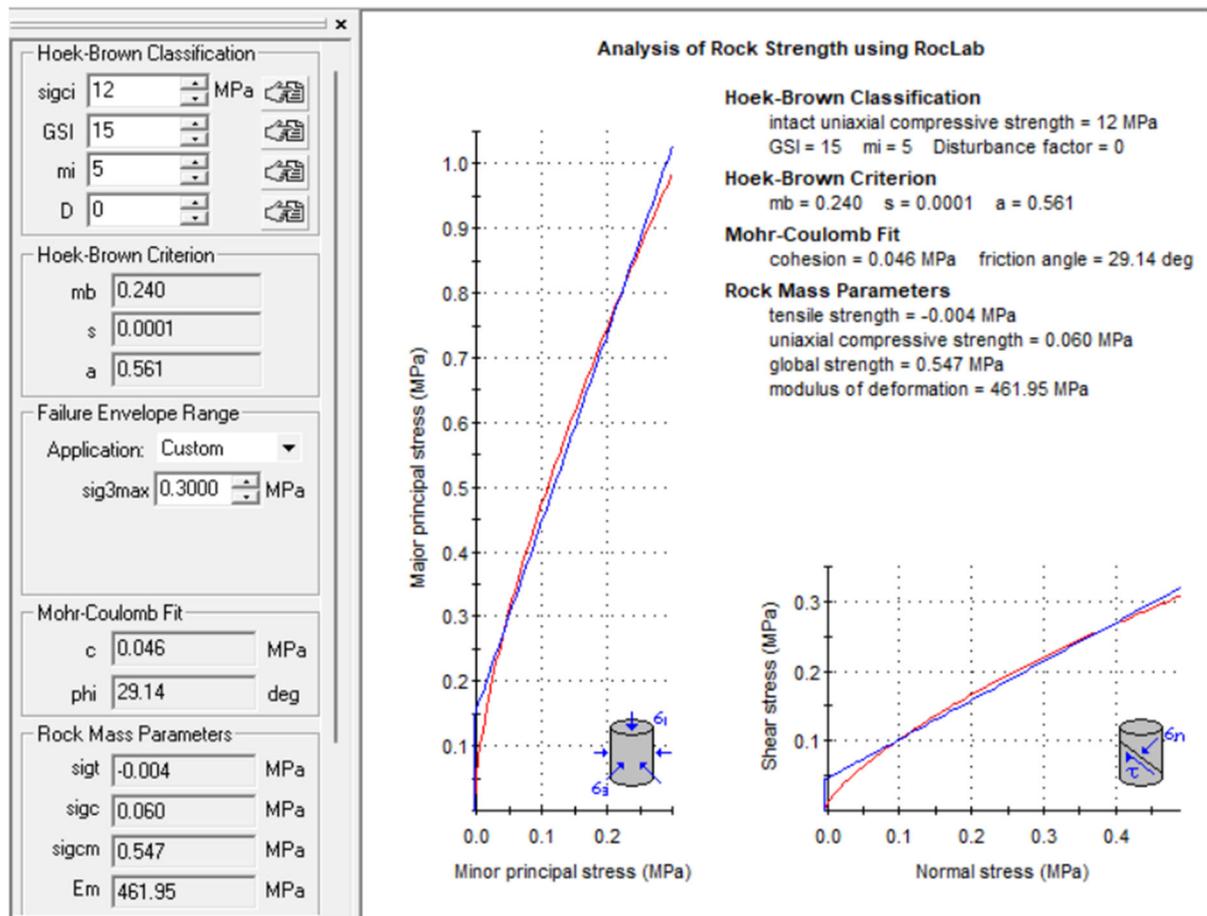
Effettuata l'elaborazione dei dati e ricavati gli involucri a rottura di Hoek-Brown e di Mohr-Coulomb (in termini di sforzi principali e di sforzi normali e di taglio), il software restituisce i valori dei seguenti parametri geomeccanici, tutti riferiti all'ammasso roccioso:

- costanti di Hoek-Brown;
- coesione;
- angolo d'attrito;
- resistenza a trazione;
- resistenza a compressione monoassiale;
- resistenza a compressione globale;
- modulo di deformazione.

Per quanto riguarda l'ammasso calcareo presente nel sottosuolo del sito di progetto, alla luce del modello geologico locale e dei risultati delle prove, sono stati inseriti i seguenti dati di input:

Unità geologico-geotecnica R -da 0,0 m a 1,0 m / 2,0 m
Terreno vegetale misto a pietrame calcareo completamente degradato

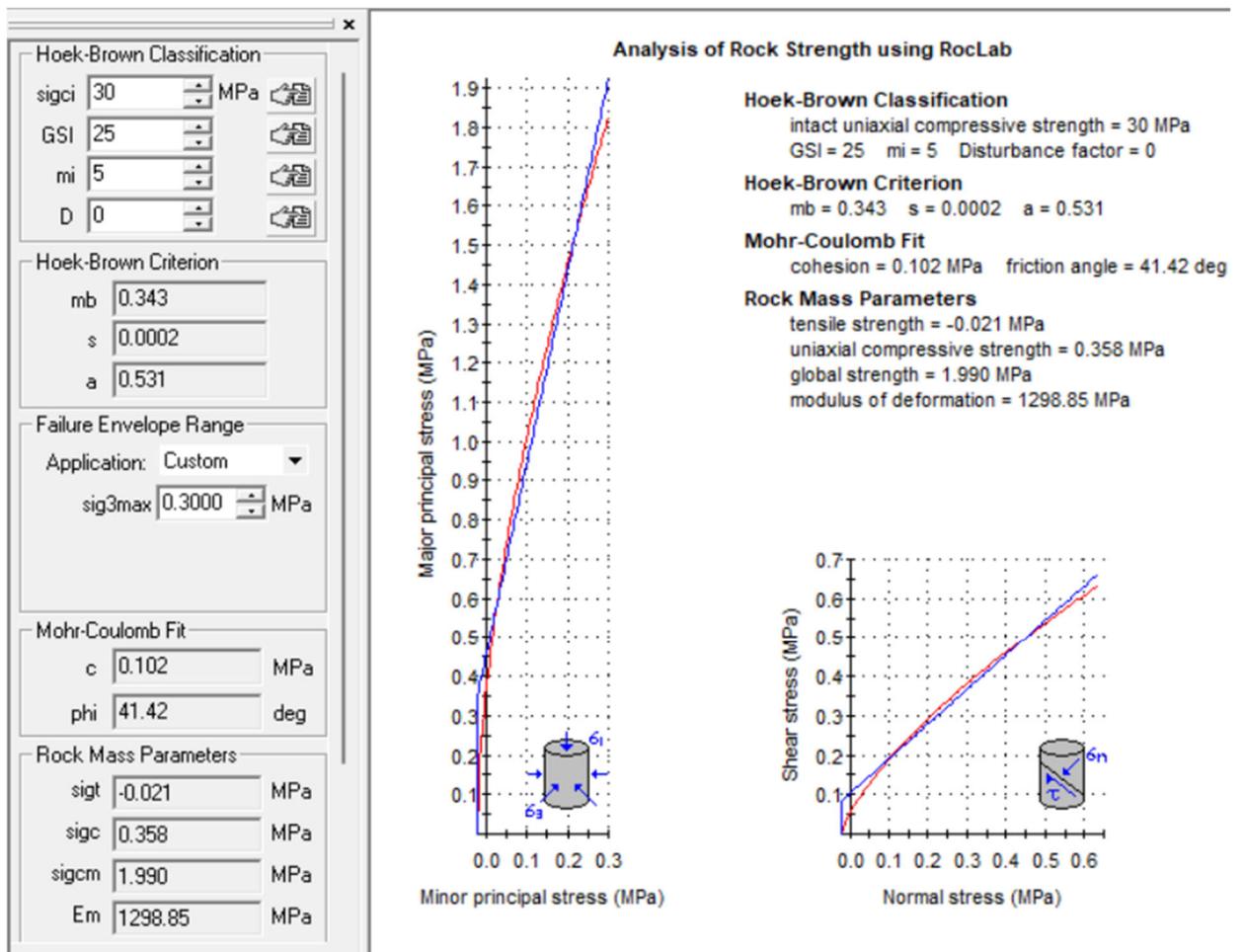
- resistenza a compressione monoassiale = 12 MPa;
- costante di Hoek-Brown per roccia intatta $m_i = 5$;
- indice GSI 15 (calcolato dalle schede allegate al software);
- indice di disturbo $D = 0$.
- $\sigma_{3max} = 0,300$ MPa



Unità geologico-geotecnica Ca1 - da 0,0 / 2,0 m a \approx 6/7 m
calcarei stratificati e fratturati

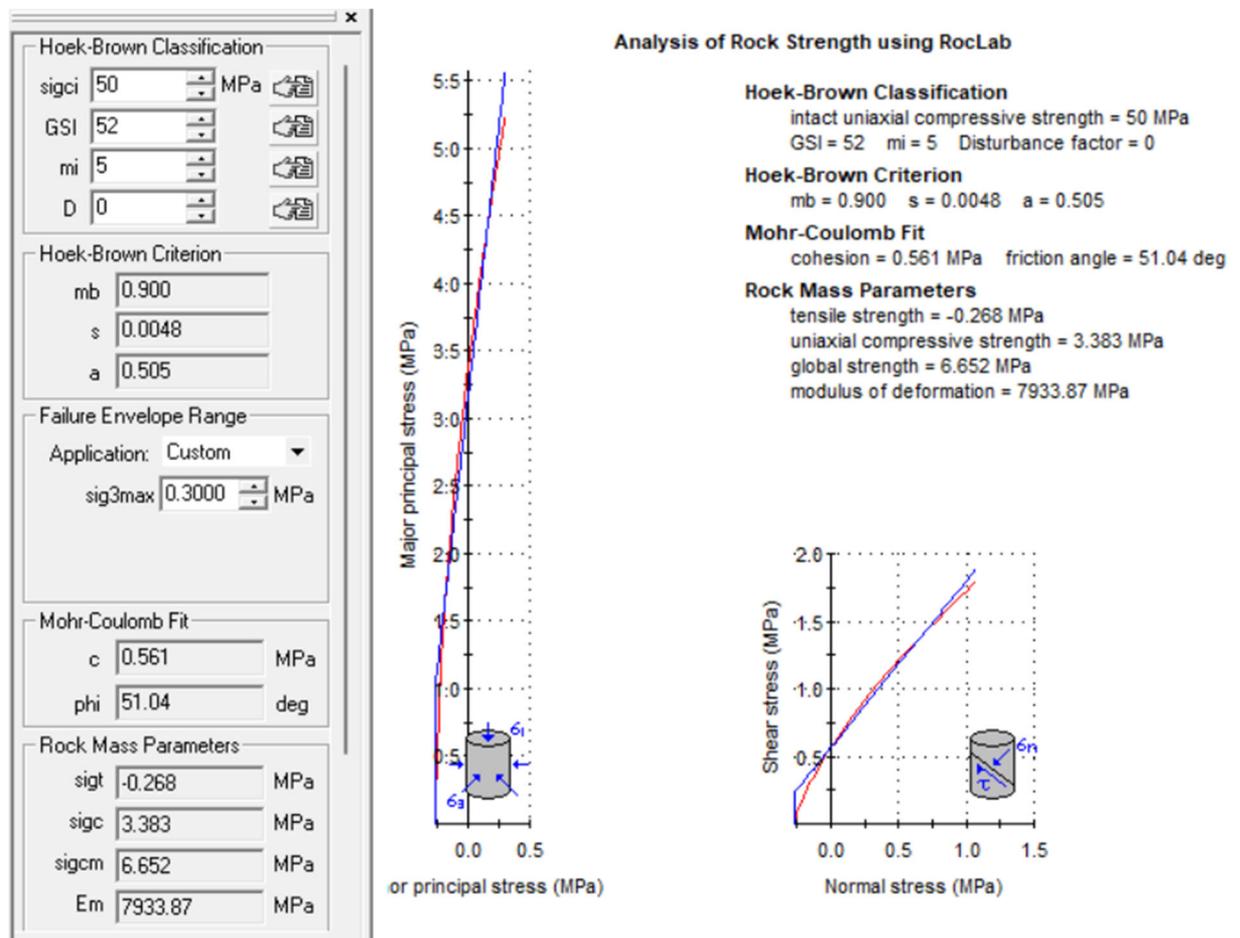
(Calcari di Altamura - Cretaceo, Mesozoico)

- resistenza a compressione monoassiale = 30 MPa;
- costante di Hoek-Brown per roccia intatta $m_i = 5$;
- indice GSI 30 (calcolato dalle schede allegate al software);
- indice di disturbo $D = 0$.
- $\sigma_{3max} = 0,300$ MPa



Unità geologico-geotecnica Ca2 - da 6/7 m fino alla profondità di interesse geotecnico
 Calcari stratificati poco fratturati
 (Calcari di Altamura- Cretaceo, Mesozoico)

- resistenza a compressione monoassiale = 50 MPa;
- costante di Hoek-Brown per roccia intatta $m_i = 5$;
- indice GSI 52 (calcolato dalle schede allegate al software);
- indice di disturbo $D = 0$.
- $\sigma_{3max} = 0,300$ MPa



Con l'applicazione di relazioni empiriche ampiamente sperimentate è possibile, inoltre, ricavare anche il modulo di elasticità tangenziale (G) e il modulo edometrico (M):

$$G = [E / 2(1+\nu)]$$

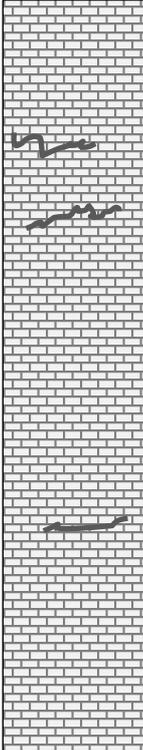
$$M = [E (1-\nu)] / [(1+\nu) (1-2 \nu)].$$

Con:

E = modulo elastico
 ν = modulo di Poisson

Modello Geologico-Geotecnico

L'elaborazione di quanto prima riportato consente, infine, di costruire il modello geologico-geotecnico dell'area di interesse:

Profondità (m dal p.c.)	Litologia	peso di volume	angolo di attrito	coesione	modulo di Poisson	Modulo elastico	Modulo di taglio	Modulo edometrico
		γ kN/mc	ϕ°	c kPa	ν	E MPa	G MPa	M MPa
da 0.00 m -0.80 m -2,00 m	 Terreno vegetale misto a pietrame calcareo completamente degradato	17/18	29°	46	0,35	462	171	741
-6,0 /-7,0 m	 Rocce calcaree e calcareo-dolomitiche dal biancastro al grigiastro, stratificate, molto fratturate e, a luoghi, carsificate	18/19	41°÷42	102	0,33	1299	488	1925
profondità di interesse geotecnico	 Rocce calcaree e calcareo-dolomitiche dal biancastro al grigiastro, stratificate e in banchi, fratturate.	20	51°	561	0,30	7933	3051	10679

Il valore da attribuire al coefficiente di sottofondo verticale scaturisce dalla relazione:

$$k_{wv} = E / [B (1-\nu^2)] \approx E / B$$

con B = larghezza della fondazione.

Si consiglia di utilizzare valori non superiori a $k_{wv} = 20 \text{ kg/cmc}$

I moduli di reazione orizzontale saranno:

$$k_{wo} = 0,12 k_{wv}$$

Dal punto di vista della risposta sismica locale le aree sono riferibili ad una categoria topografica “T1” e categoria di suolo “A” ai sensi delle N.T.C./2018.

Si precisa che tali valori si riferiscono all'ammasso roccioso nel suo complesso, ovvero tengono conto di tutti quei fattori (fratturazione, stratificazione, variazioni del grado di cementazione, discontinuità sinsedimentarie, disuniformità litologiche, ecc.) che concorrono a rendere le caratteristiche di resistenza globali delle masse rocciose in posto molto inferiori a quelle (di picco) misurate in laboratorio su campioni di piccole dimensioni.

Conclusioni

L'area proposta per la realizzazione dell'impianto agrivoltaico di progetto è divisa in 7 sub-campi inseriti in un contesto territoriale dolcemente movimentato che si estende ad alcuni chilometri a est dell'abitato di Ceglie Messapica (Br).

Un elemento morfologicamente rilevante è la presenza di due doline e di un'area depressa in adiacenza a una di esse. Dette superfici sono rispettivamente vincolate dal P.A.I., come aree di alta pericolosità idraulica (AP) e di bassa pericolosità (BP).

Il progetto prende atto del vincolo vigente ed esclude tali aree dall'essere occupate da elementi connessi alla realizzazione dell'impianto agrivoltaico.

Il sottosuolo è geologicamente caratterizzato dalla presenza di rocce calcaree e calcareo dolomitiche appartenenti alla formazione cretacea dei Calcari di Altamura.

In affioramento è presente uno strato di copertura costituito da terreno vegetale misto a pietrame calcareo. Detto strato di spessore mediamente contenuto entro un metro di potenza, in corrispondenza di aree depresse può raggiungere profondità di circa 2,0 m dal piano campagna.

Sottostante lo strato di copertura si rinviene il deposito roccioso in posto rappresentato da rocce calcaree stratificate e intensamente fratturate, fino a circa 6-7 m di profondità dal piano campagna. L'ammasso roccioso acquista quindi maggiore compattezza con l'aumentare della profondità.

Nel sottosuolo circola una cospicua falda acquifera profonda ad almeno 130 m dal piano campagna. Non sono presenti falde acquifere superficiali o a profondità tale da interferire con le opere fondali dell'opera di progetto.

Le caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali che costituiranno il terreno di sedime dei moduli dell'impianto fotovoltaico di progetto, sono state ricavate da indagini indirette effettuate in situ. Sarà opportuno, in fase esecutiva, verificare con ulteriori indagini puntuali, eventuali anomalie che dovessero evidenziarsi in fase di preparazione del piano di posa delle fondazioni.

Alle pagine precedenti è riportato schematicamente, il modello geologico-geotecnico dell'area di interesse, con la valutazione dei principali parametri geotecnici.

L'area di stretto interesse è sub-pianeggiante ma con pendenze della superficie morfologica sempre inferiore a 15° e, quindi, riferibile ad una categoria topografica "T1" ai sensi delle NTC/2018.

In merito alla riposta sismica locale, l'indagine effettuata ha consentito, infine, di riferire il sito di studio alla categoria sismica "A" ai sensi della tab. 3.2.II N.T.C. /2018:

“Ammassi rocciosi affiorante 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”

Novembre 2024

Geologo

(dr. Rossana Baldassarre)



The image shows a handwritten signature in blue ink, which appears to be 'Rossana Baldassarre'. To the right of the signature is a circular blue stamp. The stamp contains the text 'ORDINE DEI GEOLOGI' at the top, 'PUGLIA' at the bottom, and 'N° 12.8' in the center. There is also a small star symbol on the left side of the stamp.