

Valutazione d'impatto ambientale D.Lgs. 152/2006 e ss.mm.ii.

AMISTADE

Progetto di un Parco Eolico nei territori dei Comunidi Esterzili e di Escalaplano (SU).



STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE RELAZIONE GEOLOGICA E GEOTECNICA PRELIMINARE

0	30.01.23	Emissione per procedura di VIA	Maxxi	Sartec	Sartec
Rev.	Data	Descrizione	Red.	Contr.	Appr.

Valutazione d'impatto ambientale D.Lgs. 152/2006 e ss.mm.ii.

AMISTADE

Progetto di un Parco Eolico nei territori dei Comuni di Esterzili e di Escalaplano (NU).

STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE

COORDINAMENTO GENERALE:

Ing. Manolo Mulana – SARTEC – Saras Ricerche e Tecnologie

PROGETTAZIONE:

Ing. Ivano Distinto (Direttore tecnico) – Fad System S.r.l.

Ing. Giovanni Saraceno (Direttore tecnico) 3E Ingegneria Srl

Gruppo di lavoro:

Ing. Francesco Schirru

Mariano Agus

Dott. Geol. Chiara D'Andrea

Ing. Gianni Serpi

Geom. Roberto Accalai

Ing. Francesco Samaritani

Collaborazioni specialistiche:

Verifiche strutturali: Ing. Luca Corsini

Aspetti archeologici: Dott. Luca Sanna

Aspetti pedologici ed uso del suolo, geologici e geotecnici: Dott. Geol. Andrea Bavestrelli

Aspetti floristico, vegetazionali e fauna: Dott. Nat. Francesco Lecis

Aspetti Idraulici: Ing. Remigio Franzini

Aspetti impatto Acustico: Ing. Andrea Battistini – Geom. Nicola Ambrosini

Interferenze e telecomunicazioni: Respect S.r.l. – Prof. Ing. Giuseppe Mazzarella – Ing. Emilio Ghiani

Aspetti paesaggistici: Paes. Emanuele Roveccio – Dott.ssa Greta Madrignani

INDICE

1	INTRODUZIONE	4
1.1	NORMATIVA DI RIFERIMENTO.....	4
1.2	DOCUMENTI TECNICI DI RIFERIMENTO.....	5
1.3	DESCRIZIONE DELLE OPERE DI PROGETTO.....	6
2	INQUADRAMENTO GEOLOGICO	7
2.1	LITOLOGIE AFFIORANTI NELL'AREA.....	7
2.2	GEOLOGIA DELL'AREA.....	8
3	GEOMORFOLOGIA	11
4	IDROGEOLOGIA	14
5	PIANO DELLE INDAGINI	16
6	ESITI DELLE INDAGINI IN SITO	17
6.1	RILIEVI STRUTTURALI.....	17
6.2	MASW.....	18
6.3	STENDIMENTO GEOELETTRICO.....	22
7	MODELLO GEOLOGICO E GEOTECNICO DI RIFERIMENTO	24
7.1	MODELLO GEOLOGICO DI RIFERIMENTO.....	24
7.2	MODELLO GEOTECNICO.....	25
7.3	PESO DI VOLUME DEI TERRENI DI FONDAZIONE.....	28
7.4	MODELLO GEOTECNICO SINGOLE OPERE.....	28
8	CONDIZIONI SISMICHE LOCALI	29
8.1	CARATTERIZZAZIONE SISMICA LOCALE.....	29
8.2	ESITI DELLE INDAGINI DI CAMPO.....	32
9	CONCLUSIONI	34

TAVOLE

AM-IAS10019-1 : Carta Litologica dell'area di Progetto, Comune di Esterzili

AM-IAS10019-2 : Carta Litologica dell'area di Progetto, Comune di Escalaplano

AM-IAS10019-3 : Carta Geologica dell'area di Progetto, Comune di Esterzili

AM-IAS10019-4 : Carta Geologica dell'area di Progetto, Comune di Escalaplano

ALLEGATI

ALLEGATO 1: Relazione Rilievi strutturali

ALLEGATO 2: Relazione Indagini Geofisiche

ALLEGATO 3: Schede Modello Geotecnico Opere

1 INTRODUZIONE

La presente Relazione Geologica e Geotecnica è redatta dal Dott. Andrea Bavestrelli (iscritto all'Albo dei Geologi della Regione Lombardia al Nr. 791) in relazione all'incarico affidato alla Società Maxxi Engineering S.r.l. e pertinente il progetto di realizzazione di un parco eolico da realizzarsi all'interno del territorio comunale di Escalaplano (SU), Esterzili (SU) e, per una limitata porzione relativa all'elettrodotto, nel territorio del Comune di Seui (SU).

Le deduzioni di seguito esposte, finalizzate alla ricostruzione del modello geologico e geotecnico, come previsto dalle N.T.C. 2018, si basano sulla consultazione dei dati bibliografici esistenti per l'area e sulle osservazioni raccolte durante i sopralluoghi effettuati e le campagne di indagine svolte nel sito.

I dati raccolti permettono di avere una chiara nozione delle caratteristiche geologiche e dello stato dei luoghi, si raccomanda tuttavia di effettuare in fase di progettazione esecutiva, una campagna di indagine specifica in corrispondenza delle opere principali, mirata a validare i dati specifici e la geologia puntuale.

Di seguito verrà esposto il modello geologico-litologico elaborato al fine di individuare condizioni di pericolosità geomorfologica e idrogeologica che potrebbero potenzialmente interferire con le opere da realizzare e al fine di predisporre un programma di indagini a supporto della progettazione esecutiva.

1.1 Normativa di Riferimento

La normativa vigente in materia a cui si è fatto riferimento per lo svolgimento degli studi e la compilazione del presente documento tecnico è la seguente:

- Circolare C.S. LL.PP. n. 7 del 21.01.2019 «Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 17.01.2018»;
- D.M. 14.01.2018 «Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni»;
- Circolare C.S. LL.PP. n. 617 del 02.02.2009 «Istruzioni per l'applicazione delle nuove "Norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14.01.2008»;

- Ordinanza P.C.M. n. 3519 del 28.04.2006 «Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone»;
- Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3316 del 02.10.2003 «Modifiche ed integrazioni all'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri»;
- Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20.03.2003 «Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per la costruzione in zona sismica»;
- Circolare n. 218/24/3 del 09.01.1996 «Istruzioni applicative per la redazione della Relazione Geologica e della Relazione Geotecnica»;
- D.M. LL.PP.11.03.1988 «Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione» e relativa Circ. Min. LL.PP. n. 30483 del 24.09.1988;
- Legge n. 64 del 02.02.1974 «Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche», che prevede l'obbligatorietà dell'applicazione per tutte le opere, pubbliche e private, delle norme tecniche che saranno fissate con successivi decreti del Ministero LL.PP.;
- Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) adottato dalla Giunta Regionale con
- D.G.R. n. 54/33 del 30.12.2004 e reso esecutivo con Decreto Assessoriale n. 3 del 21.02.2005 con pubblicazione nel BURAS n. 8 del 11.03.2005;
- Norme di Attuazione del P.A.I. - Testo coordinato e ss.mm.

1.2 Documenti tecnici di Riferimento

- Carta Geologica della Sardegna;
- Cartografia tematica Geoportale Sardegna;

- STUDIO DI COMPATIBILITÀ GEOLOGICA E GEOTECNICA, Studio per la Variante al PAI ex art. 37 delle Norme tecniche di Attuazione, Comune di Escalaplano;
- STUDIO DI COMPATIBILITÀ GEOLOGICA E GEOTECNICA, Studio per la Variante al PAI ex art. 37 delle Norme tecniche di Attuazione, Comune di Esterzili;

1.3 Descrizione delle Opere di Progetto

Il progetto consiste nella realizzazione di un impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica, mediante l'installazione di 21 aerogeneratori, sito nei Comuni di Escalaplano e Esterzili, nella provincia del Sud Sardegna.

L'opera prevede l'installazione di 7 aerogeneratori, da realizzarsi all'interno del territorio comunale di Esterzili, per gli aerogeneratori denominati EST01; EST03; EST04; EST05; EST07; EST08 e 14 aerogeneratori da collocarsi invece nel territorio di Escalaplano, denominati ESC01; ESC02; ESC03; ESC04; ESC05; ESC06; ESC07; ESC08; ESC09; ESC10; ESC11; ESC12; ESC13 e ESC14 da realizzarsi in area extraurbana.

Oltre agli aerogeneratori il progetto prevede la realizzazione di una Stazione Elettrica e Sottostazione Utente e prevede inoltre i cavidotti interrati di collegamento elettrico oltre alla sistemazione della viabilità, provvisoria o definitiva, finalizzata al trasporto delle attrezzature.

2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

2.1 Litologie affioranti nell'area

Le litologie affioranti nell'area sono indicate in Tavola AM-IAS10019-1 e AM-IAS10019-2. Queste ultime sono desunte con riferimento alla carta litologica presente sul Geoportale della Sardegna ed illustra le litologie affioranti nell'area ed in corrispondenza delle opere di progetto rispettivamente relativamente alle aree del Comune di Esterzili e di Escalaplano. Trattasi nel dettaglio delle seguenti litologie:

- Litologia C1.2 – Depositi terrigeni continentali di conoide e piana alluvionale (ghiaie sabbie, limi, argille) conglomerati, arenarie, siltiti, peliti
- Litologia C2.2 – Depositi Carbonatici Marini (Marne, Calcari, Calcari Dolomitici, Calcari Oolitici, Calcari Bioplastici, Calcareniti);
- Litologia B1.1 - Metarioliti, Metariodaciti, "Porfiroidi" Auct., Metavulcaniti acide
- Litologia B2.1 – Rocce parametamorfiche terrigene: Filladi, Micascisti, Gneiss, Miloniti, Filoniti, Fels, Quarziti, Metaconglomerati, Metarenarie, Metargilliti, Liditi, Diaspri

L'ubicazione planimetrica delle opere di progetto sovrapposte alla carta delle litologie ha permesso di definire il substrato litologico che interessa le singole opere.

La tabella che segue elenca le opere incidenti sulle diverse litologie presenti nelle aree di progetto.

La situazione litologica specifica è stata verificata attraverso sopralluoghi e rilievi svolti in sito ed è sotto riportata.

Litologia C1.2	Litologia C2.2	Litologia B1.1	Litologia B2.1
Aerogeneratori : EST04 ; EST06 ; EST07 ; EST08 ; Nuovi Raccordi Stradali.	Aerogeneratori: ESC01; ESC02; ESC03; ESC04; ESC05; ESC06; ESC07; ESC08; ESC09; ESC10; ESC11; ESC12; ESC13 e ESC14SSE; SU; Nuovi Raccordi Stradali.	Aerogeneratori : EST01 ; EST03 ; EST05 ; Nuovi Raccordi Stradali.	Nuovi Raccordi Stradali.

Tabella 2-1: Litologie affioranti in corrispondenza delle opere di progetto

2.2 Geologia dell'area

La situazione geologica locale è stata determinata tramite la documentazione tecnica e la cartografia regionale disponibile ed è stata verificata attraverso sopralluoghi e rilievi specifici in sito. La geologia dell'area di progetto è illustrata in Tavola AM-IAS10019-3 e AM-IAS10019-4 che riportano la Carta Geologica della Sardegna come disponibile sul Geoportale della Sardegna rispettivamente relativamente alle aree dei Comuni di Esterzili e di Escalaplano.

Il substrato geologico del territorio di interesse è rappresentato da formazioni litoidi costituenti il basamento paleozoico della Sardegna. In particolare esso fa parte del Complesso Metamorfico di Basso e Medio Grado della Sardegna centro e sud-orientale. Nei territori compresi nel Foglio CARG 541 di Jerzu, del Servizio Geologico d'Italia, in scala 1:50.000, di cui fa parte gran parte del territorio di Escalaplano, affiorano estesamente formazioni del Paleozoico inferiore, deformate e metamorfosate durante l'orogenesi ercinica, rocce intrusive del Paleozoico superiore e successioni sedimentarie e vulcaniche, non metamorfiche, permiane, triassiche, giurassiche, eoceniche, oligo-mioceniche e quaternarie. In particolare nell'area di interesse affiorano rocce afferenti alla Unità tettonica del Gerrei ed alla Successione Sedimentaria Mesozoica e Terziaria oltre ad alcuni depositi Olocenici. Nell'area di progetto affiorano in particolare le seguenti unità:

SIGLA UNITA	UNITA GERARCHICA DESCRIZIONE	TIPO UNITA DESCRIZIONE
MSVa	UNITÀ TETTONICA DI MEANA SARDO	Litofacies nella FORMAZIONE DI MONTE SANTA VITTORIA. Metaepiclastiti: metaepiclastiti a matrice vulcanica, metaquarzogrovacche e metarenarie, metaconglomerati a prevalenti componenti di vulcaniti acide ("formazione di Manixeddu" Auct.). ORDOVICIANO ?MEDI
b2	SEDIMENTI LEGATI A GRAVITÀ	Coltri eluvio-colluviali. Detriti immersi in matrice fine, talora con intercalazioni di suoli più o meno evoluti, arricchiti in frazione organica. OLOCENE
GNS	SUCCESSIONE SEDIMENTARIA MESOZOICA DELLA SARDEGNA CENTRO-ORIENTALE	FORMAZIONE DI GENNA SELOLE. Conglomerati quarzosi e quarzoareniti molto mature; alla base livelli carboniosi e argille. DOGGER
DOR	SUCCESSIONE SEDIMENTARIA MESOZOICA DELLA SARDEGNA CENTRO-ORIENTALE	FORMAZIONE DI DORGALI. Dolomie, dolomie arenacee, calcari dolomitici, da litorali a circalitorali, con foraminiferi e alghe calcaree. DOGGER-MALM
USS	SUCCESSIONE SEDIMENTARIA OLIGO-MIOCENICA DEL CAMPIDANO-SULCIS	FORMAZIONE DI USSANA. Conglomerati e brecce, grossolani, eterometrici, prevalentemente a spese di basamento cristallino paleozoico, carbonati giurassici, vulcaniti oligomioceniche; livelli argilloso-arenacei rossastri talora prevalenti nella base; rari l

Tabella 2-2: : Unità geologiche affioranti nell'area di progetto

Con riferimento ai documenti bibliografici, segue una breve descrizione delle unità affioranti.

UNITÀ TETTONICA DEL GERREI

Dal punto di vista litostratigrafico l'Unità è caratterizzata da un notevole spessore di metaroliti e metariodaciti occhiate (Porfiroidi Auct.) e da una particolare successione dell'Ordoviciano superiore. Di seguito sono descritte le principali formazioni affioranti nell'area:

- Formazione di M. S. Vittoria (MSV)

E' costituita da metaepiclastiti derivate da vulcaniti a chimismo acido o intermedio, rare metarenarie feldspatiche e metaconglomerati. Ordoviciano medio.

SUCCESSIONE SEDIMENTARIA MESOZOICA

La successione sedimentaria mesozoica affiora in corrispondenza di una vasta parte dell'area di progetto ed è caratterizzata dalle seguenti formazioni affioranti nell'area:

- Formazione di Genna Selole (GNS)

Nell'area rilevata questa unità affiora sempre alla base della cornice carbonatica giurassica. Buone esposizioni esistono a nord di Escalaplano (M. sa Colla, Is Furreddus), dove dal basso verso l'alto si succedono:

- conglomerati monogenici quarzosi, con intercalazioni di quarzareniti biancastre e argille bianche o grigio-chiare caoliniche, con clasti ben arrotondati di litotipi del basamento resistenti all'erosione (quarzo, "porfidi", quarziti); frequenti sono le strutture sedimentarie quali gradazioni, laminazioni incrociate e parallele;
- argille da grigio-scuro a grige, biancastre, con subordinate intercalazioni di conglomerati monogenici quarzosi e frammenti, localmente abbondanti, di lignite nera picea, con la caratteristica fratturazione concoide;
- argilliti e siltiti da grigio-scure a grigio-marroncine, a nere, con abbondanti resti vegetali e pirite.

Questa formazione ha spessori variabili da pochi metri fino a 30-40 m.

Talvolta alla base del conglomerato affiorano paleosuoli ricchi in ossidi e idrossidi di ferro (il cosiddetto "Ferro dei Tacchi" Auct.), derivati da una lunga evoluzione

pedogenetica di tipo lateritico in clima caldo-umido. In base alle paleoflore l'unità è attribuita dalla maggior parte degli autori al Bajociano, Dogger.

- Formazione di Dorgali (DOR)

Questa formazione, ben rappresentata in tutto il territorio di Jerzu e Perdasdefogu, dove presenta costantemente una giacitura da suborizzontale a debolmente inclinata (2%-5%) e costituisce una serie di piccoli altopiani tabulari, noti col nome locale di "Tacchi" o "Tonnèri". Ad Escalaplano la formazione presenta una inclinazione più marcata, intorno al 10%. Nella parte basale è costituita da calcari marnosi e marne da giallastri a grigi, con locali intercalazioni arenacee e siltitico-argillitiche grigio-verdastre. Seguono dolomie e calcari dolomitici di colore da nocciola a violacei a rossastri, fossiliferi (gasteropodi, ostracodi, lamellibranchi, brachiopodi), in banchi da decimetrici a metrici. La formazione ricopre in concordanza la Formazione di Genna Selole. Il limite superiore dell'unità è sempre erosivo. Lo spessore massimo affiorante è di 60 m. L'ambiente deposizionale è di piattaforma neritica. Dogger - Malm.

SUCCESSIONE SEDIMENTARIA TERZIARIA

- Formazione di Ussana (USS)

Si tratta di conglomerati eterometrici poligenici, prevalentemente clasto-sostenuti, con clasti elaborati di calcari mesozoici ed eocenici ed arenarie eoceniche, con scarsa matrice sabbiosa, più raramente argillosa, e buon grado di compattazione. Nell'area del Foglio raggiunge lo spessore massimo di 20-25 m presso Corte Lugetta (Tacco di Escalaplano). Sono depositi di ambiente fluviale. Oligocene superiore - Miocene inferiore.

- Depositi (b2)

Infine nell'area del Comune di Esterzili si rileva la presenza di Coltri eluvio-colluviali. Trattasi di detriti immersi in una matrice fine, talora con intercalazioni di suoli più o meno evoluti, arricchiti in frazione organica. Trattasi di sedimenti legati alla Gravita (b2) di età OLOCENICA.

L'ubicazione planimetrica delle opere di progetto sovrapposte alla carta geologica ha permesso di definire il substrato geologico che interessa le singole opere.

3 GEOMORFOLOGIA

L'impostazione geomorfologica dell'area in esame, ma anche di tutto la regione di cui il territorio di Escalaplano ed Esterzili fanno parte, è rappresentata dal "Penepiano post-ercinico", che costituisce una vasta superficie di erosione elaborata durante le fasi di continentalità tardo-paleozoiche, mesozoiche e cenozoiche. Le superfici riferibili al penepiano nel territorio di Escalaplano, non sono mai perfettamente tabulari, come invece si riscontra in altri settori limitrofi, evidenziando nel settore in esame, l'importante azione di erosione e smantellamento operata dai sistemi idrografici del Flumendosa e del Flumineddu e l'influenza sull'evoluzione del rilievo dei sistemi di faglie post-erciniche che hanno sollevato e basculato l'originaria superficie tabulare. Ne deriva un paesaggio molto vario ed articolato caratterizzato da profonde incisioni vallive e versanti a forte acclività con elevata energia del rilievo che separano superfici sommitale subpianeggianti o ondulate più o meno estese. Si riconoscono diversi ordini di paleosuperfici d'erosione, generalmente impostate sulle rocce del basamento metamorfico e su rocce sedimentarie (calcari mesozoici e conglomerati eocenici).

La differente collocazione topografica dei pianori sommitali, è riconducibile all'azione di dislocazione di blocchi ad opera di sistemi di faglie normali ad andamento prevalente NW-SE, NS e NE-SW, talora con tipica struttura a gradinata degradante da NE verso SW. Si passa infatti dai circa 500-600 metri di quota del pianoro carbonatico, ai 300-400 metri dell'altopiano su cui sorge Escalaplano, impostato su formazioni sedimentarie eoceniche, sino ai 200-300 metri delle superfici sommitali dei territori sud-orientali, impostate sulle formazioni paleozoiche.

Come detto, queste superfici sommitali di natura carbonatica o arenaceo-conglomeratica, non sono perfettamente pianeggianti, ma mostrano ondulazioni più o meno marcate connesse con i processi di erosione delle acque, a sottolineare un avanzato stadio di erosione e smantellamento delle paleosuperfici post erciniche. Tra una paleosuperficie e l'altra sono generalmente presenti valli strette e profonde che incidono anche il basamento paleozoico e che, per progressivo allargamento ed erosione regressiva, suddividono i pianori stessi in più rilievi isolati.

La superficie strutturale del pianoro carbonatico, pur conservando un andamento d'insieme subtabulare, è spesso notevolmente rimodellata dagli agenti erosivi

(processi fluviali, di versante e carsici), tanto che il paesaggio appare inciso da valli secche, valli cieche, valli sospese, gradini, grotte e condotti sotterranei.

Ai margini perimetrali, al contatto con i litotipi impermeabili del substrato (argille basali giuresi per i “tacchi” mesozoici, basamento scistoso paleozoico per le coperture eoceniche), sono presenti sorgenti, cascate e depositi travertinosi in cascata o in piccoli terrazzi.

I corsi d’acqua e le valli, generalmente molto incassate, hanno un andamento ora lineare, dettato dall’impostazione strutturale, ora tortuoso fino a meandriforme, laddove nell’evoluzione hanno prevalso fenomeni di sovrimposizione (realizzatasi a seguito della demolizione delle coperture carbonatiche mesozoiche e arenaceo-puddingoidi e carbonatiche cenozoiche relativamente più tenere rispetto ai litotipi del basamento paleozoico). La genesi dei meandri incassati, che trovano la loro massima espressione nel Riu Flumineddu, può essere ricondotta a fenomeni di ringiovanimento del rilievo che hanno portato ad un’intensa ripresa dell’erosione verticale in età post-eocenica, con una successiva accentuazione plio-quadernaria.

Le valli sono prevalentemente simmetriche, con forma a V, tuttavia nel basamento scistoso sono frequenti anche quelle con versanti a diversa inclinazione (asimmetriche) in chiara relazione con la loro giacitura a reggipoggio. Il tracciato del Riu Flumineddu, presenta una valle a fondo piatto, segno che all’azione erosiva hanno fatto seguito processi di deposizione che hanno portato all’alluvionamento del fondo. L’analisi geomorfologica denota che si tratta di valli policicliche, nelle quali l’alternarsi di fasi erosive e deposizionali ha prodotto fino a due ordini di terrazzi.

I versanti, generalmente lineari e molto acclivi nel basamento paleozoico scistoso, diventano a gradinata nelle coperture cenozoiche e subverticali in quelle carbonatiche mesozoiche. Il contrasto tra le morfologie mature della sommità degli altopiani, nei quali anche le formazioni più resistenti (come le metavulcaniti acide ordoviciane) presentano superfici dolcemente arrotondate e talvolta tafonate, e le forme giovanili dei ripidi versanti delle valli di escavazione recente, come il Riu Flumineddu ed il Flumendosa, è riconducibile al ringiovanimento plio-quadernario del rilievo prodotto dell’intenso sollevamento della regione.

Si notano sul territorio di Esterzili per la formazione di paesaggi pianeggianti le aree

Amistade - Progetto di un Parco Eolico nei territori dei Comuni di Esterzili e di Escalaplano (SU) - Marzo 2023

ove affiorano i depositi olocenici sciolti che danno alla morfologia locale un aspetto più morbido e continuo rispetto alle circostanti aree più aspre ed ondulate.

4 IDROGEOLOGIA

Come visto in precedenza, nell'area di progetto affiorano Depositi Carbonatici Marini (Litologia C2.2) e rocce metamorfiche (Litologia B1.1 e B2.1) oltre a Depositi terrigeni continentali di conoide e piana alluvionale (Litologia C1.2) la cui estensione è riportata nelle Tavole AM-IAS10019-1 e AM-IAS10019-2 rispettivamente per le aree nel Comune di Esterzili e di Escalaplano.

I Depositi Carbonatici Marini (Litologia C2.2) possono essere considerati mediamente permeabili per fratturazione e possono dare origine a fenomeni carsici minori mentre le rocce metamorfiche (Litologia B1.1 e B2.1) possono essere considerate poco permeabili. In corrispondenza quindi delle aree di progetto non si registra pertanto la presenza di falde acquifere entro i primi metri da piano campagna.

I Depositi terrigeni continentali di conoide e piana alluvionale (Litologia C1.2) ove sono ubicati gli Aerogeneratori : EST04 ; EST06 ; EST07 ; EST08 - potrebbero invece dare origine a circolazione idrica.

Ai fini di verificare le caratteristiche di questi ultimi depositi è stato eseguito un rilievo geoelettrico le cui risultanze sono illustrate al punto 6 della presente. I rilievi svolti in corrispondenza di questa litologia non hanno dato evidenza di circolazione idrica significativa ai livelli delle opere di fondazione.

La relazione specifica sulle indagini geofisiche relativamente agli esiti dello stendimento geoelettrico riporta quanto segue nelle conclusioni:

- *“In corrispondenza della MASW3 è stato realizzato un rilievo geoelettrico per valutare la presenza di eventuali circolazioni idriche entro la profondità di circa 6 m utili per la realizzazione dello scavo di predisposizione dell'area di sedime. L'indagine ha evidenziato la presenza di una fascia conduttiva superficiale (profondità media attorno ai -2 m) con valori di resistività non così bassi da far pensare a fenomeni di circolazione idrica degne di nota. La presenza di fenomeni di polarizzazione e caricabilità fa ipotizzare in particolare a fenomeni di argillificazione presenti al di sotto della formazione resistiva (conglomerati terziari). Sembra più verosimile invece la possibilità*

di circolazione idrica in corrispondenza della fascia indicata come “conduttivo di fondo” attorno agli 8-9 m di profondità.”

Il contenuto sopra è finalizzato alla valutazione della possibilità che vi sia circolazione idrica in corrispondenza della sezione. Nello specifico tale contenuto, sta ad indicare che lo stendimento fatto ha indicato fasce conduttive all'interno di questi depositi, evidenza di possibili porzioni umide degli stessi, e che attorno agli 8-9 metri di profondità si registra un netto aumento della resistività (“conduttivo di fondo”). Date le litologie presenti in zona e la resistività specifica tale corpo conduttivo è interpretato come evidenza della sottostante roccia metamorfica in posto. Purtroppo non si esclude la possibilità che vi possa essere “circolazione idrica” al contatto.

Si ritiene pertanto che le aree di interesse non siano soggette alla presenza di una rilevante circolazione idrica sotterranea che possa dare luogo nei primi metri a falde di potenza tale da poter interferire con le opere di progetto.

5 PIANO DELLE INDAGINI

In coerenza con i requisiti normativi è stato previsto un piano di indagine mirato a definire il modello geologico delle aree di progetto ed a determinare i parametri geotecnici dei litotipi affioranti.

Come anticipato ai punti precedenti le opere di progetto interessano 4 litotipi differenti (Tabella 2-1). I litotipi B1.1 e B2.1 sono da considerati sostanzialmente affini. Per tale motivo il Litotipo B2.1, interessato unicamente da opere di viabilità, non è stato indagato direttamente rimandando per lo stesso agli esiti delle indagini relative al Litotipo B.1.1.

Il piano di indagine ha quindi visto l'esecuzione delle seguenti attività:

- rilievi strutturali degli ammassi rocciosi (Litologia C2.2 e Litologia B1.1);
- MASW per tutti i litotipi affioranti (Litologia C2.2, Litologia B1.1 e Litologia C1.2);
- rilievo geoelettrico di approfondimento per verificare la geometria dei depositi e la eventuale presenza di circolazione idrica nei depositi (Litologia C1.2).

Le indagini sono state eseguite nel mese di Luglio 2022 ed hanno dato esito a relazioni tecniche specialistiche che vengono allegate integralmente alla presente:

- Allegato 1: Relazione specialistica relativa ai rilievi strutturali redatta dal Dott. Geol. Alessandro Forci;
- Allegato 2: Relazione specialistica illustrativa della esecuzione delle MASW e indagine Geoelettrica redatta dal Dott. Geol. Gianbattista Cadau.

6 ESITI DELLE INDAGINI IN SITO

6.1 Rilievi strutturali

I rilievi strutturali eseguiti hanno permesso di identificare i parametri geotecnici delle rocce/litotipi presenti nella area di progetto. Nelle tabelle successive estratte dalla relazione specialistica di Allegato 1 si riportano i parametri geotecnici di riferimento delle rocce/litologie (Tabella 6-1e Tabella 6-2).

Stazione strutturale	Litologia	Resistenza compressione monoassiale (MPa)	RQD (%)	Spaziatura discontinuità mm	Condizione dei giunti	Presenza di acqua	Totale punteggio RMR
Str. 1	Calcari dolomitici (C2.2)	59	Da 20 a 60	Da 60 a 150	Pareti rugose debolmente alterate talvolta leggermente aperte	umida	
Coefficienti numerici		Da 4 a 7	Da 5 a 12	8	20	10	Da 47 a 57
Str. 2	Metaepiclastiti a grana fine (B1.1)	20	20	<60	Pareti rugose debolmente alterate talvolta leggermente aperte	umida	
Coefficienti numerici		2	3	5	20	10	40
Str. 3	Metaepiclastiti arenacee (B1.1)	38	50	150	Pareti rugose debolmente alterate talvolta leggermente aperte	umida	
Coefficienti numerici		4	10	8	20	10	52
Str. 4	Calcari dolomitici (C2.2)	42	65	18	Pareti rugose debolmente alterate talvolta leggermente aperte	umida	
Coefficienti numerici		4	13	8	20	10	55

Tabella 6-1 – Caratteristiche delle fratture degli ammassi rocciosi rilevati (DA ALLEGATO 1)

In base ai valori di RMR che varia da 0 a 100 è possibile individuare 5 classi di qualità delle rocce. Per i quattro ammassi rocciosi su cui è stato fatto il rilevamento strutturale l'indice RMR indica condizioni dell'ammasso roccioso appartenenti sempre alla classe III (qualità mediocre) anche se i calcari dolomitici (Str 1, Str 4) e le metaepiclastiti arenacee della Formazione di Monte Santa Vittoria del rilievo Str. 3 presentano valori che si avvicinano alla classe II (buona) mentre la facies

a granulometria più sottile della Formazione di Monte Santa Vittoria (Str. 2), che presenta una scistosità molto più marcata, ha valori prossimi alla classe IV (scadente).

Sulla base dell'indice RMR e delle formule analitiche sotto riportate è possibile determinare i parametri di coesione e resistenza a taglio (Tabella 4):

$$c = RMR \cdot 0,005$$

$$\Phi = 5 + 0,5 \cdot RMR$$

Parametri	Str. 1 Calcari Litologia C2.2	Str.4 Calcari Litologia C2.2	Str. 2 Metaepiclastiti Litologia B2.1	Str.3 Metaepiclastiti Litologia B2.1
RMR	47	55	40	52
C (KPa)	230	270	200	260
Φ (°)	28,5	32,5	25	31

Tabella 6-2: Parametri geotecnici di riferimento per le rocce di fondazione (da Allegato 1)

6.2 MASW

Sono state effettuate 3 MASW ed uno stendimento geoelettrico la cui ubicazione è riportata nella figura successiva (Figura 6-1).

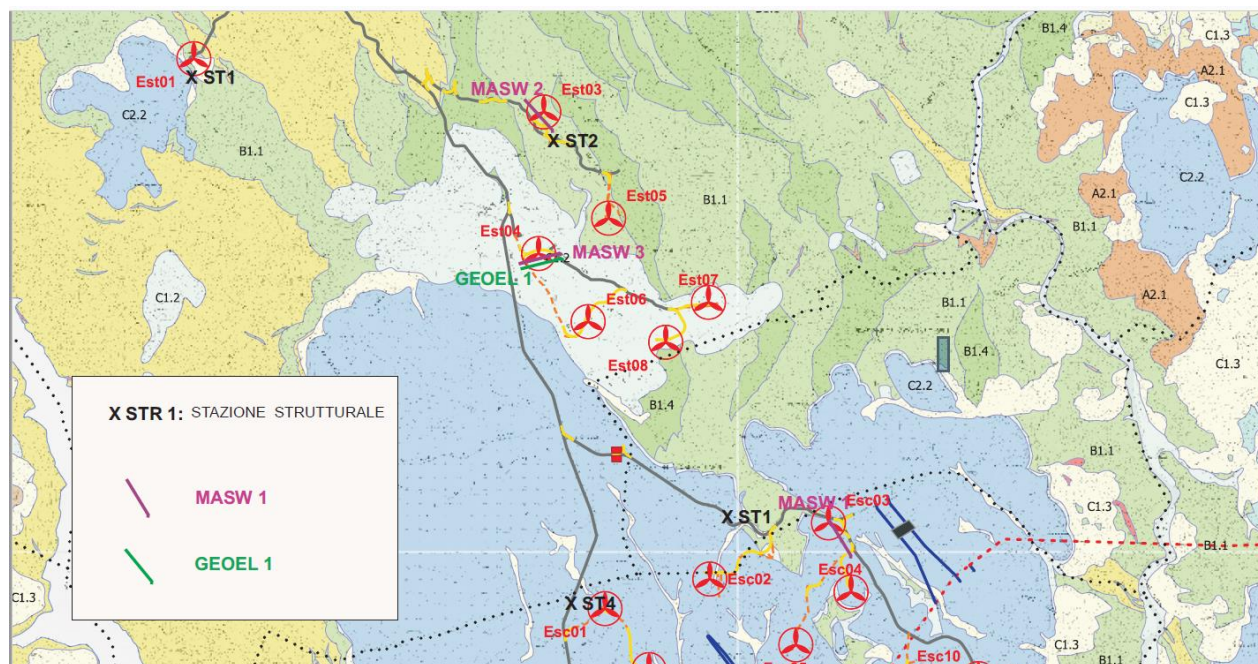


Figura 6-1: Ubicazione MASW e profilo geoelettrico

Il report illustrativo delle indagini geofisiche è riportato in Allegato 2 ed oltre ad illustrare gli esiti delle indagini descrive la strumentazione e la metodologia adottata.

La restituzione dello strumento in termini di frequenza/velocità e profondità/velocità delle MASW è riportata nelle figure che seguono.

La MASW1 ha evidenziato una categoria sismica di tipo B (valutata con fondazione posizionata a piano campagna) e $V_{seq}=505$ m/s e categoria sismica A per fondazione oltre i 4/5 metri di profondità con $V_{seq}=800$ m/s.

La MASW1 evidenzia in superficie la presenza di uno strato di alterazione con terreni argillosi superficiali, argille con abbondanti elementi di scisto e quarzo, detrito di alterazione spinta del sottostante scisto. Tale strato si pone generalmente al di sotto dello strato di suolo che nell'area ha spessori relativamente ridotti.

Le MASW 2 e 3 rilevano ammassi rocciosi che hanno categoria sismica A con $V_{seq}>800$ m/s.

Amistade - Progetto di un Parco Eolico nei territori dei Comuni di Esterzili e di Escalaplano (SU). - Marzo 2023

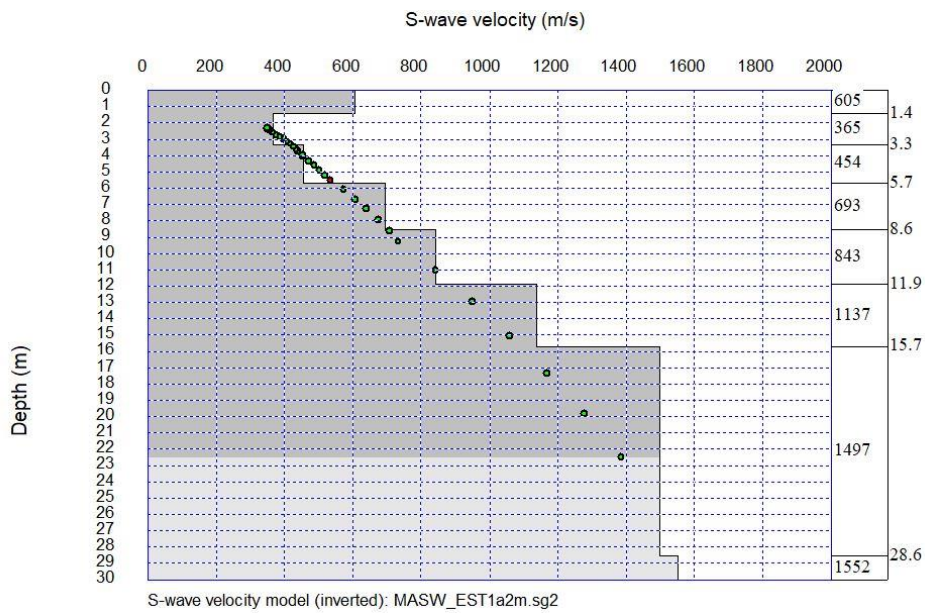
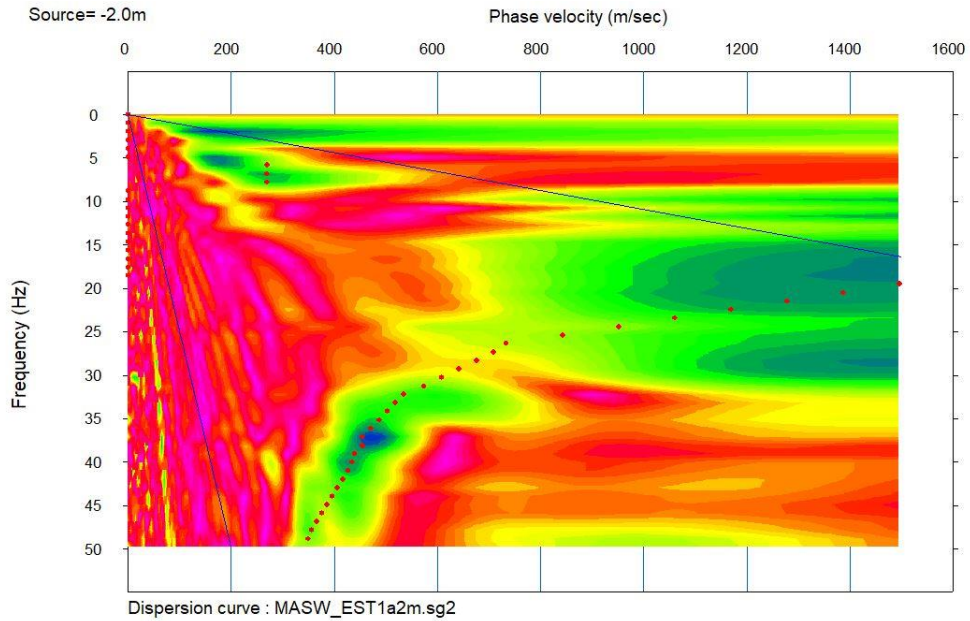


Figura 6-2: Esiti della MASW 1

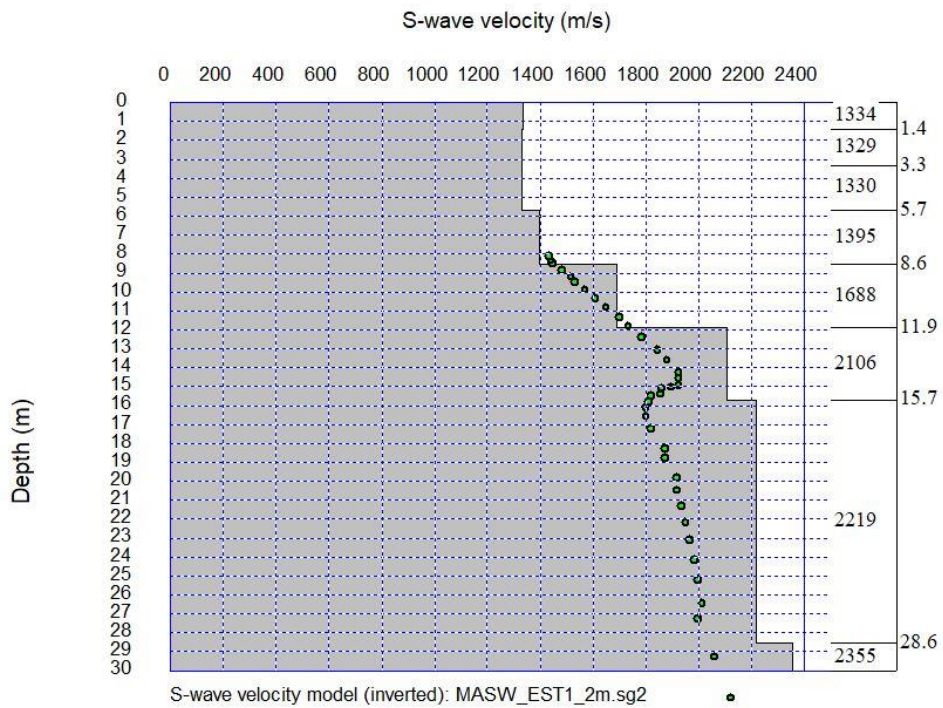
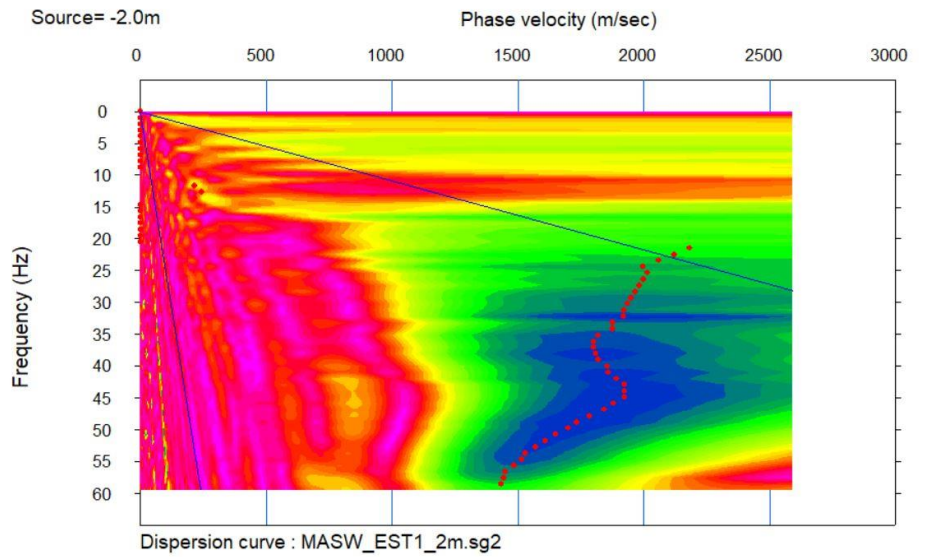


Figura 6-3: Esiti della MASW 2

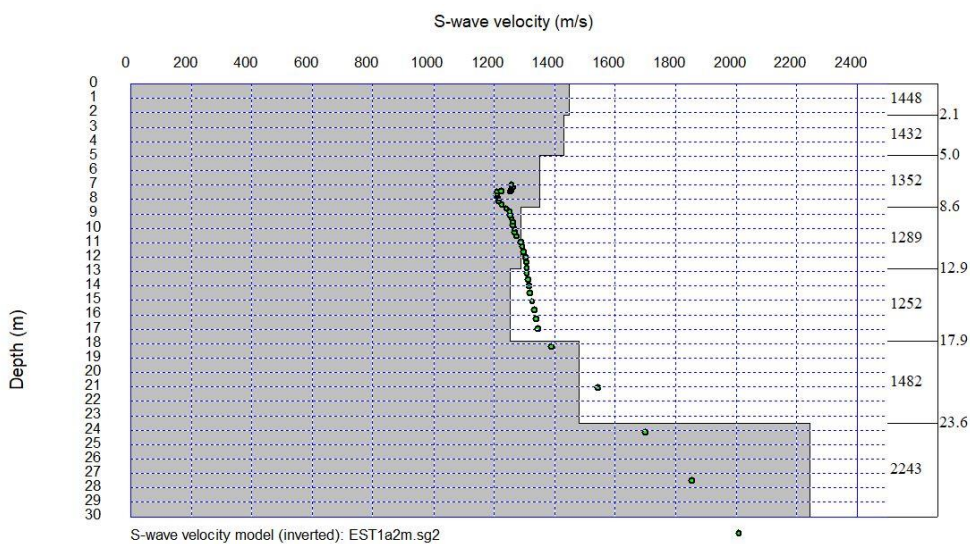
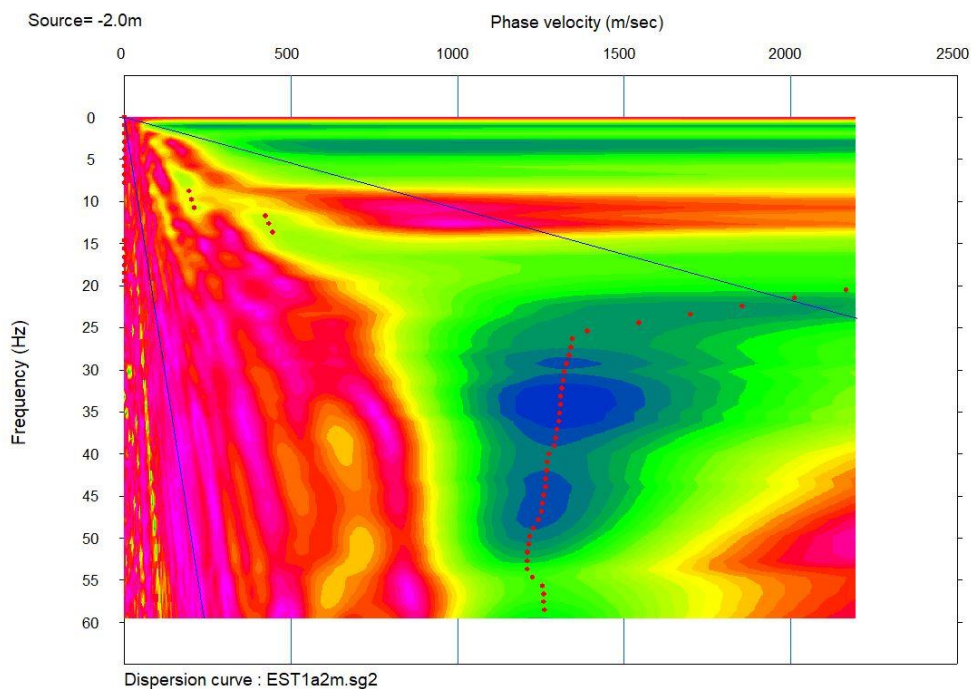


Figura 6-4: Esiti della MASW 3

6.3 Stendimento geoelettrico

Lo stendimento geoelettrico è stato effettuato sui Depositi Olocenici con la finalità di verificarne lo spessore e verificare la presenza di circolazione idrica.

Il report illustrativo delle indagini geofisiche è riportato in Allegato 2, oltre ad illustrare gli esiti delle indagini descrive la strumentazione e la metodologia adottata.

Gli esiti dello stendimento geoelettrico indicano che i depositi olocenici presenti nell'area (identificabile nella carta geologica con la formazione b2) hanno presumibilmente uno spessore attorno a 2 metri e che alla profondità tra 2 e 3 m si assiste ad un aumento della caricabilità (proprietà in genere legata alla presenza di circolazione idrica, di argilla) e ad un abbassamento della resistività su valori attorno a 170-220 ohm*m.

Considerato che valori di resistività simili non sono in genere associati a saturazione dei terreni (in genere valori di terreni saturi sono inferiori a 60-80 ohm*m circa), non si esclude nei tratti più conduttivi (progressive 8 m e 32-44 m) qualche fenomeno di umidità al contatto tra alluvioni antiche della F. di Ussana e basamento paleozoico.

Sembra più verosimile invece la possibilità di circolazione idrica in corrispondenza della fascia indicata come "conduttivo di fondo" attorno agli 8-9 m di profondità.

7 MODELLO GEOLOGICO E GEOTECNICO DI RIFERIMENTO

7.1 Modello Geologico di Riferimento

Sulla base delle considerazioni geologiche sin qui fatte, dei sopralluoghi e delle indagini indirette che hanno permesso di ricostruire la stratigrafia tipo delle aree di progetto e di ottenere i parametri geotecnici dei terreni si è ricostruito il modello geologico e geotecnico di riferimento per le verifiche di progetto.

Come visto in precedenza, in relazione alla localizzazione delle opere di progetto e delle litologie affioranti, le opere di progetto interessano i 4 litotipi sotto elencati (Tavola AM-IAS10019-1 e AM-IAS10019-2):

- Litologia C1.2 – Depositi terrigeni continentali di conoide e piana alluvionale (ghiaie sabbie, limi, argille) conglomerati, arenarie, siltiti, peliti
- Litologia C2.2 – Depositi Carbonatici Marini (Marne, Calcari, Calcari Dolomitici, Calcari Oolitici, Calcari Bioplastici, Calcareniti);
- Litologia B1.1 - Metarioliti, Metariodaciti, "Porfiroidi" Auct., Metavulcaniti acide
- Litologia B2.1 – Rocce parametamorfiche terrigene: Filladi, Micascisti, Gneiss, Miloniti, Filoniti, Fels, Quarziti, Metaconglomerati, Metarenarie, Metargilliti, Liditi, Diaspri

Abbiamo detto in precedenza che i litotipi Litologia B1.1 e Litologia B2.1 sono stati considerati affini sotto al profilo geologico/geotecnico e per tale motivo è stata caratterizzata unicamente essendo la Litologia B2.1. Per le opere ricadenti sulla Litologia B2.1, trattandosi peraltro unicamente di viabilità, si rimanda al modello relativo alla Litologia B1.1.

Sempre in riferimento alle caratteristiche stratigrafiche, geologiche e litologiche del substrato di fondazione delle opere di progetto le situazioni si possono pertanto ricondurre alle seguenti 4 principali condizioni.

OPERE	DESCRIZIONE LITOLOGICA	MODELLO GEOLOGICO	CARATTERISTICHE PIANO FONDAZIONE
Aerogeneratori EST04 ; EST06 ; EST07 ; EST08 ; Nuovi Raccordi Stradali.	Litologia C1.2 Depositi terrigeni continentali di conoide e piana alluvionale (ghiaie sabbie, limi, argille) conglomerati, arenarie, siltiti, peliti	Suolo di spessore inferiore ad 1 mt. Depositi spessore massimo 2 metri (vedi stendimento geoelettrico) Sotto probabile presenza Litologia B1.1	A partire dai -3 metri da p.c. Litologia B1.1: STR2 STR3
Aerogeneratori: ESC01; ESC02; ESC03; ESC04; ESC05; ESC06; ESC07; ESC08; ESC09; ESC10; ESC11; ESC12; ESC13 e ESC14SSE; SU;	Litologia C2.2 Depositi Carbonatici Marini (Marne, Calcari, Calcari Dolomitici, Calcari Oolitici, Calcari Bioplastici, Calcarenitici);	Suolo di spessore inferiore ad 1 mt. Cappellaccio di alterazione di spessore < di 5 mt. Litologia C2.2	A partire dai -5 metri da p.c. Litologia C2.2 STR.1 STR.4
Aerogeneratori EST01 ; EST03 ; EST05 ; Nuovi Raccordi Stradali.	Litologia B1.1 Metarioliti, Metariodaciti, "Porfiroidi" Auct., Metavulcaniti acide	Suolo di spessore inferiore ad 1 mt. Litologia B1.1	A partire da – 1mt da p.c. Litologia B1.1 STR.2 STR.3
Nuovi Raccordi Stradali.	Litologia B2.1 Rocce parametamorfiche terrigene	Suolo di spessore inferiore ad 1 mt. Litologia B1.1	A partire da – 1mt da p.c. Litologia B2.1 STR.2 STR.3

Tabella 7-1: Modelli Geologici di Riferimento

7.2 Modello Geotecnico

In considerazione del Modello Geologico descritto al punto precedente e degli esiti dei rilievi in sito è possibile determinare il modello geotecnico da applicare alle diverse opere di progetto in relazione alla loro ubicazione ed alla relativa geologia.

Amistade - Progetto di un Parco Eolico nei territori dei Comuni di Esterzili e di Escalaplano (SU). - Marzo 2023

Al paragrafo 6.1 sono riassunti gli esiti del rilievo geologico strutturale che ha permesso la determinazione dei parametri geotecnici delle rocce/litotipi presenti nell'area di progetto e che saranno interessate dalle fondazioni delle opere principali.

Nell'area di progetto il substrato roccioso è composto prevalentemente dalle Litologia B1.1 e Litologia C2.2. ed in minor parte alla Litologia B2.1. Le rocce afferenti a queste formazioni risultano affioranti e/o sub-affioranti e lo spessore di suolo, indagato con apposite indagini descritte nella Relazione AgroPedologica di progetto (Elaborato AM-RTS 10009) è generalmente inferiore a ½ metro.

Lo stendimento elettrico ha poi evidenziato che lo spessore dei depositi Olocenici (unità b2 e Litologia C1.2) è ridotto e dell'ordine di 2 metri. Sotto tale corpo sono presumibilmente presenti le formazioni dei depositi carbonatici (Litologia C2.2) o metamorfici (Litologia B1.1) le cui caratteristiche geotecniche sono risultate simili.

Inoltre le MASW hanno evidenziato che le Dolomie (Litologia C2.2) possono essere interessate da un cappellaccio di alterazione che è stato evidenziato nella MASW 1 fino allo spessore di 4/5 metri.

Sulla base di quanto sopra ed in considerazione del fatto che le opere di fondazione delle pale sono previste ad una profondità di 5/6 metri da piano campagna si può affermare che le stesse dovrebbero interessare il substrato roccioso non alterato tipico delle aree le cui caratteristiche sono state determinate attraverso i rilievi strutturali.

Le tabelle successive (Tabella 7-2, Tabella 7-3, Tabella 7-4, Tabella 7-5) riportano pertanto i modelli geotecnici di riferimento per le diverse opere di progetto. Esse elencano per le diverse litologie affioranti nell'area: le opere incidenti sulle aree, la stratigrafia di riferimento caratteristica delle Litologia affiorante ed i parametri geotecnici principali delle rocce di fondazione delle opere di progetto.

Opere	Stratigrafia	Parametri	Str. 2 Metaepiclastiti Litologia B1.1	Str.3 Metaepiclastiti Litologia B1.1
Aerogeneratori EST04 ; EST06 ; EST07 ; EST08 ; Nuovi Raccordi Stradali.	Suolo di spessore inferiore ad 1 mt. Depositi spessore massimo 2 metri (vedi stendimento geoelettrico) Sotto probabile presenza Litologia B1.1 o B2.1	RMR	40	52
		C (KPa)	200	260
		Φ (°)	25	31

Tabella 7-2: Stratigrafia tipo e parametri geotecnici di riferimento per opere incidenti sulla Litologia C1.2

Opere	Stratigrafia	Parametri al piano fondazione	Str. 1 Calcari Litologia C2.2	Str.4 Calcari Litologia C2.2
Aerogeneratori: ESC01; ESC02; ESC03; ESC04; ESC05; ESC06; ESC07; ESC08; ESC09; ESC10; ESC11; ESC12; ESC13 e ESC14SSE; SU;	Suolo di spessore inferiore ad 1 mt. Cappellaccio di alterazione di spessore < di 5 mt. Litologia C2.2	RMR	47	55
		C (KPa)	230	270
		Φ (°)	28,5	32,5

Tabella 7-3: Stratigrafia tipo e parametri geotecnici di riferimento per opere incidenti sulla Litologia C2.2

Opere	Stratigrafia	Parametri al piano fondazione	Str. 2 Metaepiclastiti Litologia B1.1	Str.3 Metaepiclastiti Litologia B1.1
Aerogeneratori EST01 ; EST03 ; EST05 ; Nuovi Raccordi Stradali.	Suolo di spessore inferiore ad 1 mt. Litologia B1.1	RMR	40	52
		C (KPa)	200	260
		Φ (°)	25	31

Tabella 7-4: Stratigrafia tipo e parametri geotecnici di riferimento per opere incidenti sulla Litologia B1.1

Opere	Stratigrafia	Parametri	Str. 2 Metaepiclastiti Litologia B1.1	Str.3 Metaepiclastiti Litologia B1.1
Nuovi Raccordi Stradali.	Suolo di spessore inferiore ad 1 mt. Litologia o B2.1	RMR	40	52
		C (KPa)	200	260
		Φ (°)	25	31

Tabella 7-5: Stratigrafia tipo e parametri geotecnici di riferimento per opere incidenti sulla Litologia B2.1

7.3 Peso di volume dei terreni di fondazione

Non si hanno dati diretti relativi al peso specifico del terreno in sito.

Considerato che trattasi di roccia in posto, sulla base di indicazioni bibliografiche si può considerare un peso di volume compreso tra le 2,5 e le 2,7 Ton/mc. Ove 2,5 Ton/mc può essere considerato rappresentativo dei calcari teneri e 2,7 Ton/mc dei graniti.

7.4 Modello Geotecnico singole Opere

In Allegato 3 viene riportata per ciascuna opera il modello Geotecnico di riferimento desunto dalle considerazioni bibliografiche e sito specifiche contenute nella presente relazione.

8 CONDIZIONI SISMICHE LOCALI

8.1 Caratterizzazione sismica locale

In questo paragrafo si definiscono le caratteristiche sismiche del sito al fine di determinare, in accordo con le Norme tecniche per le Costruzioni 2018 (NTC18), le eventuali azioni sismiche a cui potrebbero essere soggette le strutture in progetto.

Dalla consultazione della cartografica dei terremoti storici presenti nel catalogo CPTI 15 (Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, 2015), redatto dall'INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia). Si evidenzia come la Sardegna presenti una sismicità storica molto bassa sia come frequenza sia come magnitudo.

Secondo il provvedimento legislativo del 2003 (cfr. O.P.C.M. n. 3274 del 20 marzo 2003 e s.m.i.), i Comuni italiani sono stati classificati in 4 categorie principali, in base al loro rischio sismico, calcolato in base al PGA (Peak Ground Acceleration = picco di accelerazione al suolo) e per frequenza ed intensità degli eventi. La Sardegna in questa classificazione ricadeva nella Zona 4, quella a più bassa sismicità, con $PGA < 0,05$ g.

Le NTC18, così come le precedenti NTC2008 fanno riferimento invece alla “pericolosità sismica di base” in condizioni ideali di sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale. La pericolosità sismica di base costituisce quindi l'elemento di conoscenza primario per la determinazione delle azioni sismiche da applicare alle costruzioni. Allo stato attuale la pericolosità sismica del territorio nazionale è definita su un reticolo di riferimento e per diversi intervalli temporali (periodo di ritorno). Il reticolo di riferimento è rimasto invariato rispetto alle NTC2008 dove l'intero territorio italiano è suddiviso in maglie di circa 10 x 10 km di lato con i nodi espressi in termini di coordinate geografiche (Tabella B1 delle NTC2008; (<http://esse1.mi.ingv.it/>)). Per ciascun nodo del reticolo di riferimento e per ciascuno dei periodi di ritorno (T_r) considerati dalla pericolosità sismica, sono forniti tre parametri per la definizione dell'azione sismica di progetto.

- ag: accelerazione orizzontale massima a attesa al bedrock con superficie topografica orizzontale (espressa in $g/10$)
- Fo: valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale
- T^*c : periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale (espresso in s).

Le accelerazioni orizzontali massime attese al bedrock (ag) non sono più valutate genericamente sulla base dell'appartenenza del Comune in cui realizzare l'opera ad una zona sismica, ma sono calcolate in funzione dell'effettiva posizione geografica del sito dove verrà realizzata l'opera.

Per ciascun nodo del reticolo di riferimento e per ciascuno dei periodi di ritorno (Tr) considerati dalla pericolosità sismica, i tre parametri si ricavano riferendosi ai valori corrispondenti al 50-esimo percentile.

Per un qualunque punto del territorio, non ricadente nei nodi del reticolo di riferimento, i valori dei parametri di interesse per la definizione dell'azione sismica di progetto (ag, Fo, Tc*) possono essere calcolati come media pesata dei valori assunti da tali parametri nei quattro vertici del reticolo di riferimento.

Le NTC18 definiscono l'azione sismica considerando un periodo di ritorno (Tr) che è funzione della probabilità di superamento di un valore di accelerazione orizzontale (PVr) nel periodo di riferimento dell'opera (Vr).

Il periodo di riferimento dell'opera (Vr) si ottiene dal prodotto tra la Vita Nominale (Vn), intesa come il numero di anni nel quale l'opera è utilizzata allo scopo a cui è stata destinata, e il Coefficiente d'uso (Cu), funzione della Classe d'uso della costruzione (cfr. paragrafo 2.4.3 delle NTC18).

Per il progetto oggetto di intervento sono stati assunti i seguenti parametri:

- Vita nominale (Vn) di 50 anni, Classe d'uso pari a I, corrispondente ad un coefficiente d'uso (Cu) pari a 2.

Dal loro prodotto si ottiene un periodo di riferimento per l'opera Vr pari a 100 anni. Ai fini di valutare la risposta sismica locale, si classificheranno i terreni sulla base della tab. 3.2. delle NTC18 attraverso il cosiddetto "approccio semplificato". Le stesse NTC18 prevedono infatti che nel caso di determinate situazioni stratigrafiche ben definite, ai fini della risposta sismica locale possano essere utilizzate le categorie di sottosuolo previste nella Tab. 3.2 – II delle NTC18 di seguito riportata (*Figura 8-1*).

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

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Anmassi 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>

 Figura 8-1: *tabella delle categorie di sottosuolo utilizzabile ai fini della risposta sismica locale riportata nelle NTC18.*

In tale tabella la classificazione del sottosuolo viene fatta in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio V_s . Dalle indagini sismiche effettuate (vedi Relazione sulle indagini sismiche) la gran parte dell'area, con roccia esposta o sub-affiorante, appartiene alla categoria sismica A. Ove si è verificata la presenza di uno strato di alterazione la categoria sismica è di tipo B. Circa il fattore topografia le possibili condizioni sono:

- T1: Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione $i \leq 15^\circ$;
- 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 $i > 30^\circ$.

In relazione all'andamento morfologico locale, ed al posizionamento degli aerogeneratori in aree sub pianeggianti, è possibile classificare il sito di interesse come categoria T2. I parametri sismici del sito sono riassunti nella sottostante tabella (Tabella 8-1), in relazione alla tipologia di sottosuolo, di condizioni morfologiche e di opere considerate.

Amistade - Progetto di un Parco Eolico nei territori dei Comuni di Esterzili e di Escalaplano (SU). - Marzo 2023
Parametri sismici

Categoria sottosuolo: A

Categoria topografica: T2

Periodo di riferimento: 100 anni

Coefficiente cu: 2

	Prob. superamento [%]	Tr [anni]	ag [g]	Fo [-]	Tc* [s]
Operatività (SLO)	81	60	0,025	2,685	0,299
Danno (SLD)	63	101	0,031	2,730	0,307
Salvaguardia della vita (SLV)	10	949	0,060	2,976	0,371
Prevenzione dal collasso (SLC)	5	1950	0,071	3,061	0,393

Parametri sismici

Categoria sottosuolo: B

Categoria topografica: T2

Periodo di riferimento: 100 anni

Coefficiente cu: 2

	Prob. superamento [%]	Tr [anni]	ag [g]	Fo [-]	Tc* [s]
Operatività (SLO)	81	60	0,025	2,685	0,299
Danno (SLD)	63	101	0,031	2,730	0,307
Salvaguardia della vita (SLV)	10	949	0,060	2,976	0,371
Prevenzione dal collasso (SLC)	5	1950	0,071	3,061	0,393

Tabella 8-1: Parametri sismici di riferimento

8.2 Esiti delle indagini di campo

Con lo scopo di definire l'interazione tra opere e azioni sismiche, come stabilito dal D.M. del 17.01.2018, deve essere stimata l'azione del moto superficiale in base alle caratteristiche geologiche e geomorfologiche. A tale scopo sono state effettuate 3 MASW ed uno stendimento geoelettrico ubicati come indicato al punto 5. Gli esiti delle indagini sono descritti al punto 6.

Con riferimento a quanto descritto al punto 6 ed ai contenuti dell'Allegato 2 la tabella seguente illustra per tutte le opere di progetto la descrizione litologica dei terreni di fondazione e la Categoria sismica di riferimento.

OPERE	DESCRIZIONE LITOLOGICA	CATEGORIA SISMICA
Aerogeneratori EST04 ; EST06 ; EST07 ; EST08 ; Nuovi Raccordi Stradali.	Litologia C1.2 Depositi terrigeni continentali di conoide e piana alluvionale (ghiaie sabbie, limi, argille) conglomerati, arenarie, siltiti, peliti sotto ai quali sono presenti le Litologie C2.2 e/o B1.1.	MASW 3 Geoelettrica 1 Categoria sismica A con $V_{seq} > 800 \text{ m/s}$ (depositi spessore < a 3 metri)
Aerogeneratori: ESC01; ESC02; ESC03; ESC04; ESC05; ESC06; ESC07; ESC08; ESC09; ESC10; ESC11; ESC12; ESC13 e ESC14SSE; SU;	Litologia C2.2 Depositi Carbonatici Marini (Marne, Calcari, Calcari Dolomitici, Calcari Oolitici, Calcari Bioplastici, Calcareniti);	MASW 1 Categoria sismica di tipo B (valutata con fondazione posizionata a piano campagna) e $V_{seq} = 505 \text{ m/s}$
Aerogeneratori EST01 ; EST03 ; EST05 ; Nuovi Raccordi Stradali.	Litologia B1.1 Metarioliti, Metariodaciti, "Porfiroidi" Auct., Metavulcaniti acide	MASW 2 Categoria sismica A con $V_{seq} > 800 \text{ m/s}$
Nuovi Raccordi Stradali.	Litologia B2.1 Rocce parametamorfiche terrigene	MASW 2 Categoria sismica A con $V_{seq} > 800 \text{ m/s}$

Tabella 8-2: Significatività dei dati delle MASW e determinazione delle V_{seq} in corrispondenza delle opere di progetto.

9 CONCLUSIONI

La relazione è stata redatta con riferimento alle Norme Tecniche di Settore (NTC 2018) e gli studi ed i sopralluoghi svolti hanno permesso la ricostruzione del modello geologico e geotecnico delle aree interessate dalle opere di fondazione.

Relativamente al profilo tecnico, rimandando ai paragrafi precedenti per la descrizione di quanto rilevato, gli studi hanno evidenziato quanto segue in relazione alla geomorfologia, idrogeologia e geologia del sito:

- Sotto al profilo geomorfologico gli studi ed i sopralluoghi non hanno rilevato la presenza di fenomeni attivi nelle aree direttamente interessate dalle opere;
- Sotto al profilo Idrogeologico considerati i litotipi affioranti non si evidenzia la presenza di falde acquifere rilevanti nel sottosuolo;
- Sotto al profilo geologico si evidenzia che nell'area il sottosuolo è costituito prevalentemente da roccia in posto.

In fase di progettazione esecutiva, si raccomanda di effettuare una campagna di indagine specifica in corrispondenza delle opere principali mirata a validare i dati specifici e la geologia puntuale.



3E Ingegneria S.r.l.


Amistade - Progetto di un Parco Eolico nei territori dei Comuni di Esterzili e di Escalaplano (SU). - Marzo 2023

ALLEGATO 1: Relazione Rilievi strutturali

Valutazione d'impatto ambientale D.Lgs. 152/2006 ess.mm.ii.

Parco Eolico di Esterzili ed Escalaplano (SU)

RILIEVO GEOMECCANICO

<p>Il Committente:</p> <p>Maxxi Engineering Srl Via Paoli, 57 – 09128 Cagliari</p>	<p>Il Tecnico:</p> <p>Dott. Geol. Alessandro Forci</p> 
---	---

Agosto 2022

Dott. Geol. Alessandro Forci, Via Cettigne, 30 – 09129 – Cagliari. Cell. 3297388102; e-mail: aforci@gmail.com

1	INTRODUZIONE	3
2	RILIEVO GEOMECCANICO	4
3	CONCLUSIONI	13

1 INTRODUZIONE

I terreni di fondazione degli aerogeneratori in progetto consistono principalmente in ammassi lapidei fratturati di età da paleozoica a mesozoica di cui è necessario valutare il comportamento globale in termini di resistenza. Il metodo più semplice è quello basato sugli indici di qualità (classificazioni geomeccaniche) che consentono una stima approssimata del comportamento dell'ammasso attraverso il rilievo standardizzato di alcuni parametri caratteristici degli ammassi rocciosi quali spaziatura dei giunti, orientazione dei giunti, condizioni dei giunti, indice RQD, acqua nei giunti e resistenza della matrice rocciosa.

Sono stati pertanto scelti 4 siti rappresentativi delle litologie lapidee, che costituiscono il terreno di fondazione di 17 dei 21 aerogeneratori in progetto, dove è stato applicato il sistema di classificazione degli ammassi rocciosi di Bieniawski per una stima dei principali parametri di resistenza degli ammassi rocciosi fratturati.

2 RILIEVO GEOMECCANICO

L'area di interesse è stata oggetto di un rilevamento geostrutturale che ha interessato tutti i litotipi lapidei che costituiscono i terreni di fondazione dei piloni di sostegno degli aerogeneratori.

Dalla carta geologica di Fig. 1 si rileva come dei 21 aerogeneratori previsti, 14 insistono su depositi calcareo-dolomitici del Giurassico, 3 sulle metavulcaniti e metasedimenti associati dell'Ordoviciano medio, in particolare sulla litofacies MSVa della Formazione di Monte Santa Vittoria, mentre 4 aerogeneratori sono posizionati sui depositi conglomeratici terziari riferibili alla Formazione di Ussana che essendo costituita da blocchi decimetrici in scarsa matrice argillosa non si presta a rilievi di tipo strutturale.

Sono state effettuate 4 stazioni strutturali ubicate lungo i tagli stradali dove ci sono i fronti che mostrano le migliori esposizioni, i punti sono stati scelti comunque in maniera tale che risultino in prossimità di almeno parte degli aerogeneratori previsti, in particolare le stazioni strutturali 1 (Str. 1) e 4 (Str. 4) ricadono sui depositi calcareo-dolomitici mesozoici in vicinanza degli aerogeneratori Esc 01 e Esc 02. La stazioni strutturale 2 e 3 (Str. 2 e Str. 3) ricadono invece all'interno del complesso delle metavulcaniti ordoviciane, in prossimità degli aerogeneratori Est. 01 (Str. 2), Est. 03 e Est 05 (Str.3).

Nel sistema Gauss-Boaga le stazioni strutturali presentano le seguenti coordinate:

Str. 1: X= 1531072; Y=4393665.

Str. 2: X= 1526716; Y=4397326.

Str. 3: X= 1529671; Y=4396756.

Str. 4: X= 1529840; Y=4393085.

L'ubicazione dei punti di rilievo strutturale è riportata nella miniatura della carta geologica di Tav. 1. Le classificazioni degli ammassi rocciosi sono state fatte con il classico metodo di Bieniawski (1989) che tiene in considerazione l'influenza che alcuni parametri fisici, meccanici e geologico strutturali esercitano sulla qualità della roccia. La classificazione completa di Bieniawski (1989), detta Rock Mass Rating (RMR) si basa su questi 5 parametri:

R1 - Resistenza a compressione: nella fattispecie ricavata attraverso prove sclerometriche (Fig.1);

R2 - RQD: rappresenta la percentuale di recupero di un sondaggio. Essa è data dal rapporto tra la somma degli spezzoni di carota aventi lunghezza superiore a 10 cm e la lunghezza totale della carota. In mancanza di sondaggi il valore di RQD può essere stimato tramite la seguente relazione empirica basata sul numero di fratture rilevabili in affioramento:

$RQD = 100 (0,1 f + 1) e^{-0,1f}$ dove f rappresenta il numero di discontinuità per metro;

R3 - Spaziatura dei giunti;

R4 - Condizione dei giunti (alterazione, apertura, persistenza, rugosità e riempimento);

R5 – Condizione idrauliche dei giunti.

I Litotipi che affiorano in Str. 1 sono costituiti da calcari dolomitici giurassici dove la superficie più evidente in affioramento è costituita dalle superfici di strato, leggermente immergenti verso SSW con spessore degli strati nell'ordine di 20/30 cm. Il piano di strato è indicato come S0 nella proiezione stereografica di Fig. 2.

A questa famiglia principale di discontinuità si associano altre due famiglie prevalenti di fratture che immergono ad alto angolo verso NE e verso NW e rappresentati rispettivamente come K1 e K2 in Fig. 2. I sistemi di fratturazione presentano una spaziatura non omogenea in affioramento in quanto a breve distanza si osservano zone relativamente poco disturbate associate ad altre dove la frequenza delle fratture aumenta notevolmente, questo è da mettere probabilmente in relazione con alcuni lineamenti tettonici ad andamento NE-SW che passano in prossimità del punto oggetto di indagine. Le stesse litologie che affiorano in Str. 4 mostrano invece una minore fratturazione con conseguente miglioramento dei parametri geomeccanici.

Anche l'ammasso geologico costituito dalle metamorfite di origine vulcanica presenta una marcata disomogeneità in relazione alla variabilità litologica della formazione geologica e ai differenti gradi di alterazione e fratturazione dell'ammasso roccioso.

Conseguentemente nella seguente tabella verranno forniti dei parametri che presentano valori massimi e minimi di resistenza. Anche se al momento del rilievo non c'era traccia di umidità nelle fratture si ritiene che questo parametro dipenda strettamente dalle precipitazioni almeno per i primi metri di profondità, per questo il punteggio è riferito alla condizione "umida". Per il principio di cautela si consiglia l'utilizzo dei parametri più bassi per i calcoli geotecnici.



Fig. 1 – Utilizzo dello sclerometro nel sito Str. 3.

Stazione strutturale	Litologia	Resistenza compression	RQD (%)	Spaziatura discontinuità	Condizione dei giunti	Presenza di acqua	Totale punteggio
----------------------	-----------	------------------------	---------	--------------------------	-----------------------	-------------------	------------------

		e monoassiale (MPa)		mm			RMR
Str. 1	Calcari dolomitici	59	Da 20 a 60	Da 60 a 150	Pareti rugose debolmente alterate talvolta leggermente aperte	umida	
Coefficienti numerici		Da 4 a 7	Da 5 a 12	8	20	10	Da 47 a 57
Str. 2	Metaepiclastiti	20	20	<60	Pareti rugose debolmente alterate talvolta leggermente aperte	umida	
Coefficienti numerici		2	3	5	20	10	40
Str. 3	Metavulcaniti	38	50	150	Pareti rugose debolmente alterate talvolta leggermente aperte	umida	
Coefficienti numerici		4	10	8	20	10	52
Str. 4	Calcari dolomitici	42	65	18	Pareti rugose debolmente alterate talvolta leggermente aperte	umida	
Coefficienti numerici		4	13	8	20	10	55

In base ai valori di RMR che varia da 0 a 100 è possibile individuare 5 classi di qualità della roccia, per i quattro ammassi rocciosi su cui è stato fatto il rilevamento strutturale l'indice RMR indica condizioni dell'ammasso roccioso appartenenti sempre alla classe III (qualità mediocre) anche se i calcari dolomitici (Str 1, Str 4) e le metaepiclastiti arenacee della Formazione di Monte Santa Vittoria del rilievo Str. 3 presentano valori che si avvicinano alla classe II (buona) mentre la facies a granulometria più sottile della Formazione di Monte Santa Vittoria, che presenta una scistosità molto più marcata, ha valori prossimi alla classe IV (scadente).

Sulla base dell'indice RMR è possibile ricavare poi i parametri di coesione e resistenza a taglio sulla base delle seguenti formule analitiche:

$$c = RMR * 0,005$$

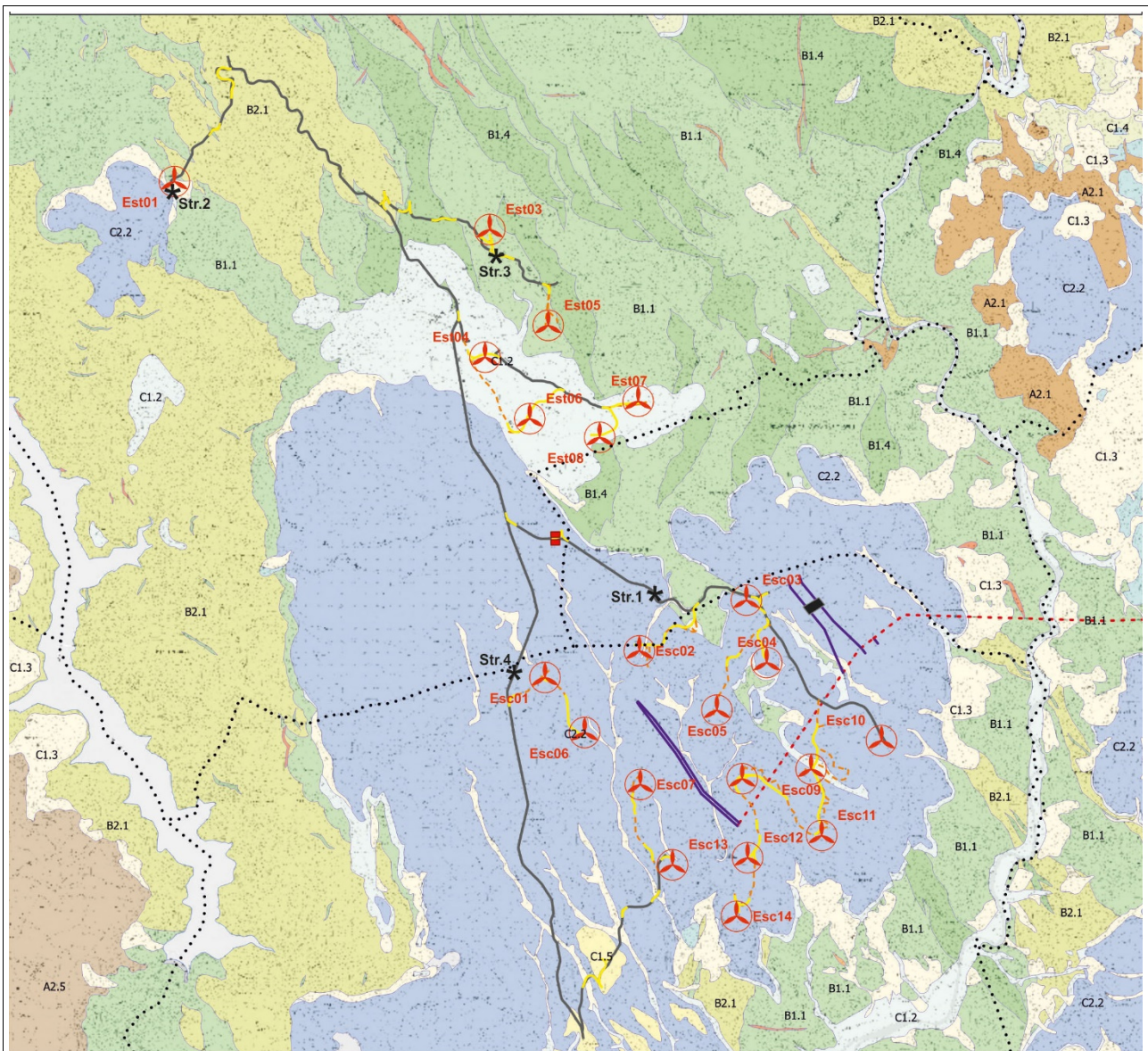
$$F = 5 + 0,5 \cdot RMR$$

Per i 4 punti stazione rappresentativi dei terreni di fondazione lapidei i parametri caratteristici sono:

Parametri	Str. 1	Str. 2	Str.3	Str.4
RMR	47	40	52	55
C (KPa)	230	200	260	270
Φ (°)	28,5	25	31	32,5
Unità litologica	Calcari dolomitici	Metaepiclastiti alterate	Metaepiclastiti arenacee	Calcari dolomitici

nelle tavole 2-5 in fondo al testo vengono rappresentati mediante proiezioni stereografiche i piani di discontinuità medi rilevati che, unitamente all'angolo di resistenza a taglio lungo i giunti, consentono di stabilire, ad esempio mediante il test di Markland, le "discontinuità critiche" che possono dar luogo cioè a scivolamenti a "cuneo", "scivolamenti planari" o "ribaltamenti". Un ruolo fondamentale viene esercitato ovviamente anche dall'orientazione del pendio rappresentato in questo caso dal fronte di scavo. Avranno propensione allo scivolamento infatti i cunei prodotti dall'intersecarsi di due famiglie di giunti quando la linea di intersezione ha un'immersione a franapoggio con inclinazione maggiore dell'angolo di resistenza a taglio dei giunti di discontinuità. Nello scivolamento planare è sufficiente invece che un unico piano di scivolamento con immersione simile ($\pm 20^\circ$) a quella del pendio mostri un'inclinazione maggiore dell'angolo di resistenza al taglio. Nel ribaltamento invece è la presenza di sistemi di discontinuità molto inclinati con giacitura a reggipoggio che può favorire crolli.

Sarà compito della direzione lavori verificare le condizioni di stabilità degli scavi in fase esecutiva.



Legenda

- Limite Comunale
- ☪ Pale eoliche di progetto
- SU
- LINEA_A_150KV_FIUMESANTO
- SSE
- NUOVI RACCORDI

Carta Litologica della Sardegna (Agg. 2019 - Fonte R.A.S.)

- A2.1 - Rioliti e Riodaciti
- A2.4 - Andesiti e Andesiti basaltiche
- A2.5 - Basalti, Basalti andesitici
- A3.1 - Filoni e ammassi acidi (quarzo, riolitici, riodacitici, pegmatitici, applitici, aplopegmatitici, dacitici)
- A3.2 - Filoni e ammassi basici (basaltici) e intermedio-basici (andesitici, andesitico-basaltici, dioritici, sienitici, quarzoandesitici)
- B1.1 - Metarioliti, Metariodaciti, "Porfiroidi" Auct., Metavulcaniti acide
- B1.4 - Metagabbri, Metadolereiti, Metavulcaniti basiche, Metaepiclastiti
- B2.1 - Rocce parametamorfiche terrigene: Filladi, Micascisti, Gneiss, Miloniti, Filoniti, Fels, Quarziti, Metaconglomerati, Metarenarie, Metargilliti, Liditi, Diaspri
- C1.1 - Depositi terrigeni antropici (saline, vasche di salificazione, aree di rispetto lagunare, discariche: minerarie, industriali, per inerti, per rifiuti solidi urbani; mat)
- C1.2 - Depositi terrigeni continentali di conoide e piana alluvionale (ghiaie, sabbie, limi, argille), (conglomerati, arenarie, siltiti, peliti)
- C1.3 - Depositi terrigeni continentali legati a gravità (detriti di versante, frane, coltri eluvio-colluviali, "debris avalanches", breccie)
- C1.4 - Depositi terrigeni palustri, lacustri, lagunari (limi, argille limose, fanghi torbosi con materia organica anche con intercalazioni di sabbie, selci)
- C1.5 - Depositi terrigeni litorali (ghiaie, sabbie, arenarie, conglomerati)
- C2.1 - Depositi carbonatici lacustri e lagunari (Calcarei, Dolomie, Calcarei silicizzati, Travertini)
- C2.2 - Depositi carbonatici marini (Marne, Calcarei, Calcarei dolomitici, Calcarei oolitici, Calcarei bioclastici, Calcareni)
- C3.1 - Depositi vulcano-sedimentari di ambienti fluvio-lacustri e lagunari (Epiclastiti, Tuffiti, Tufi, Cineriti, Vulcaniti, sedimenti clastici (sabbioso-siltoso-arenacei) e i
- D1.1 - Zone industriali; zone militari, aree urbanizzate; aree portuali (moli, banchine) e aeroportuali (piste e infrastrutture), dighe, etc.
- Lg - Laghi

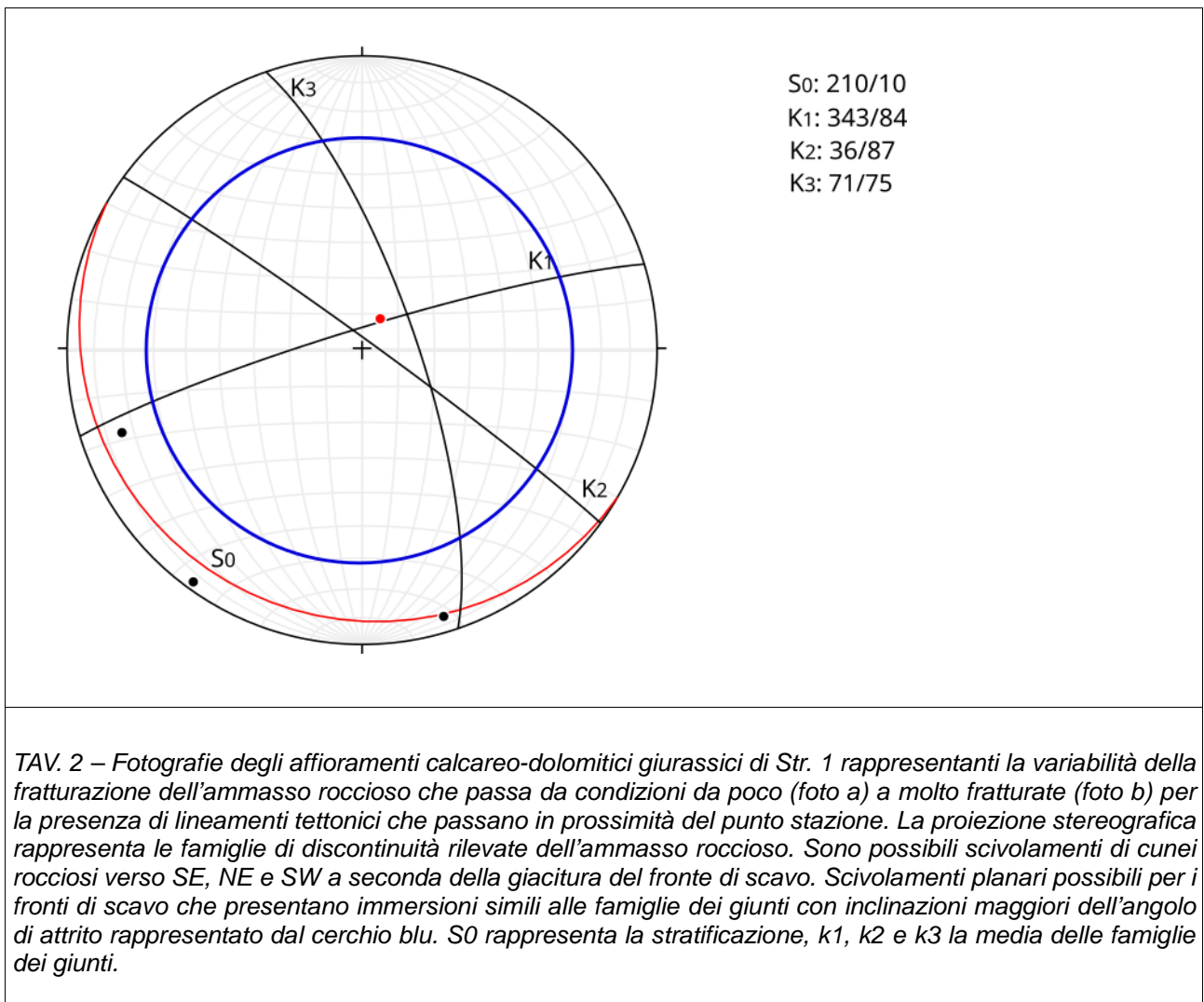
TAV. 1 – Ubicazione dei rilievi geo-strutturali nello schema geologico dell'area interessata dalle opere.

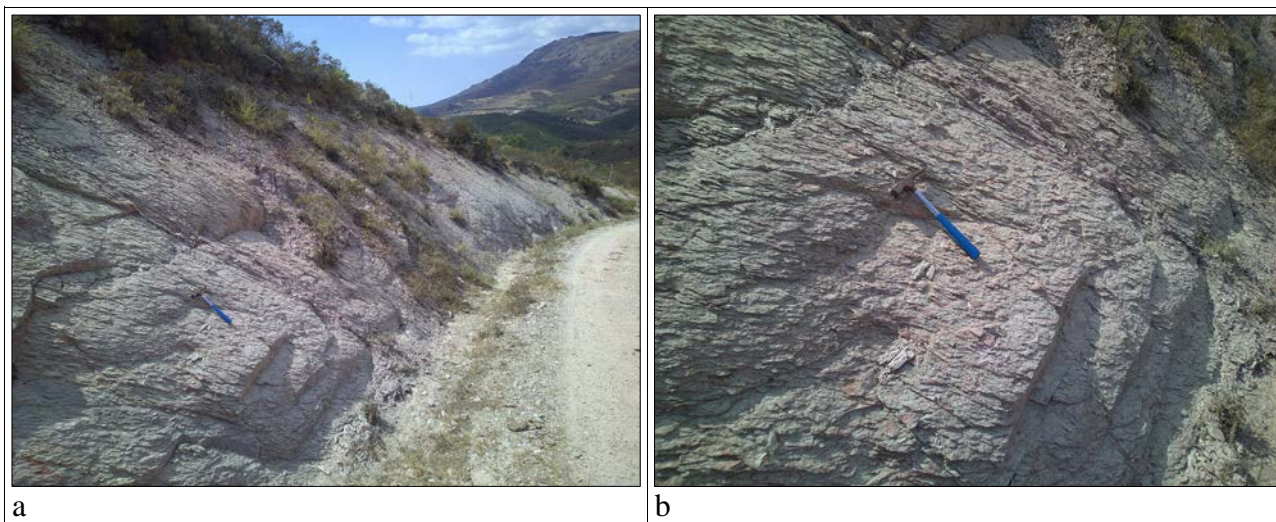


a



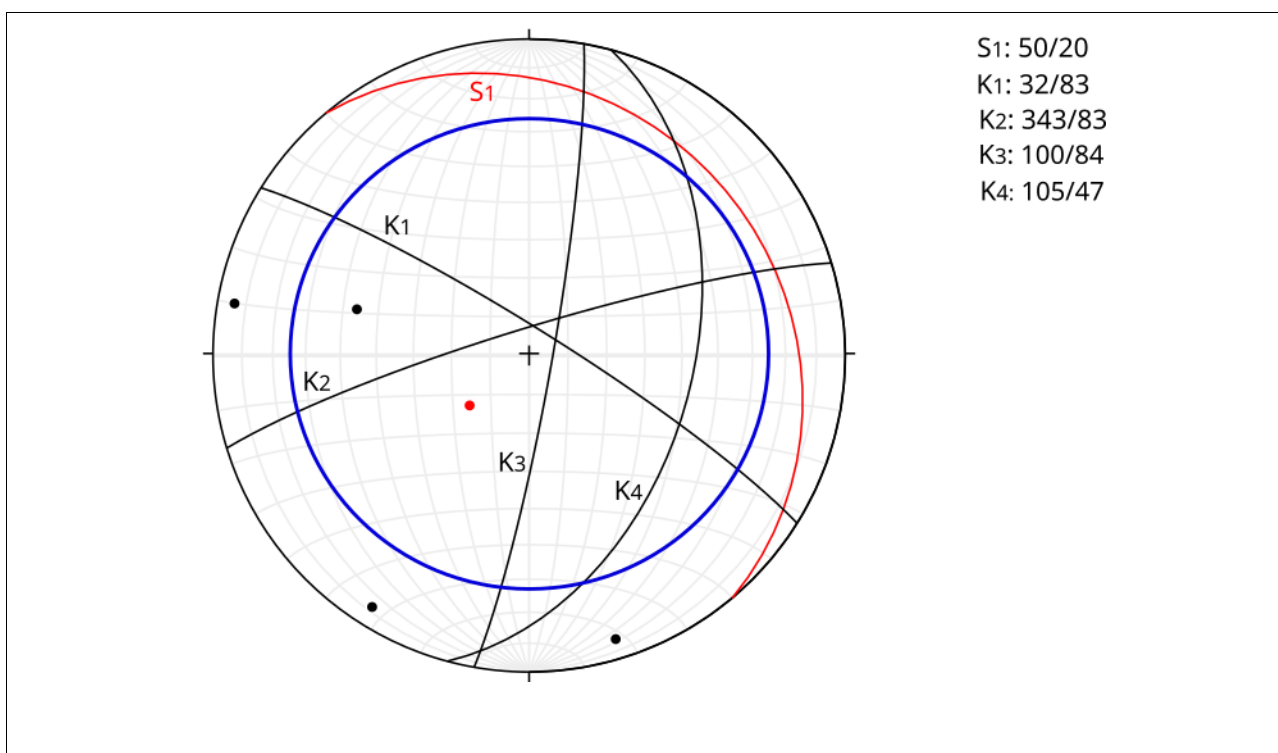
b





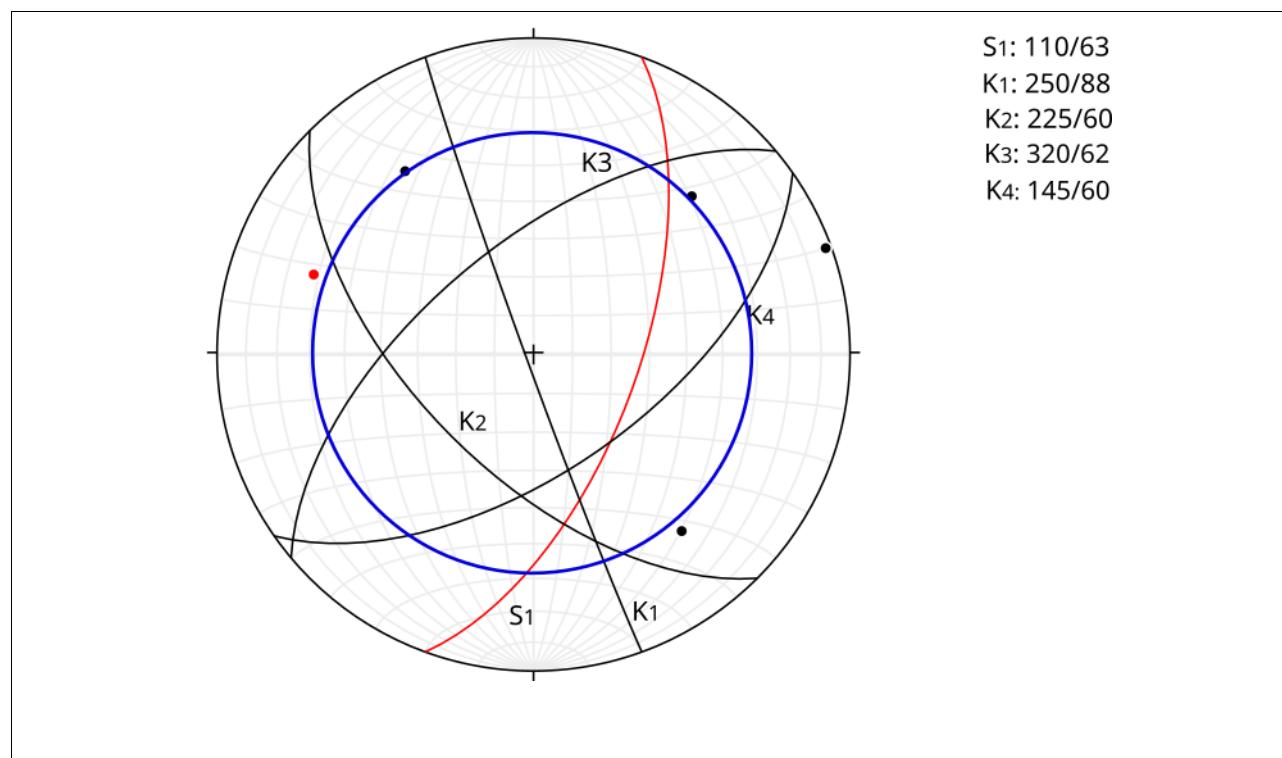
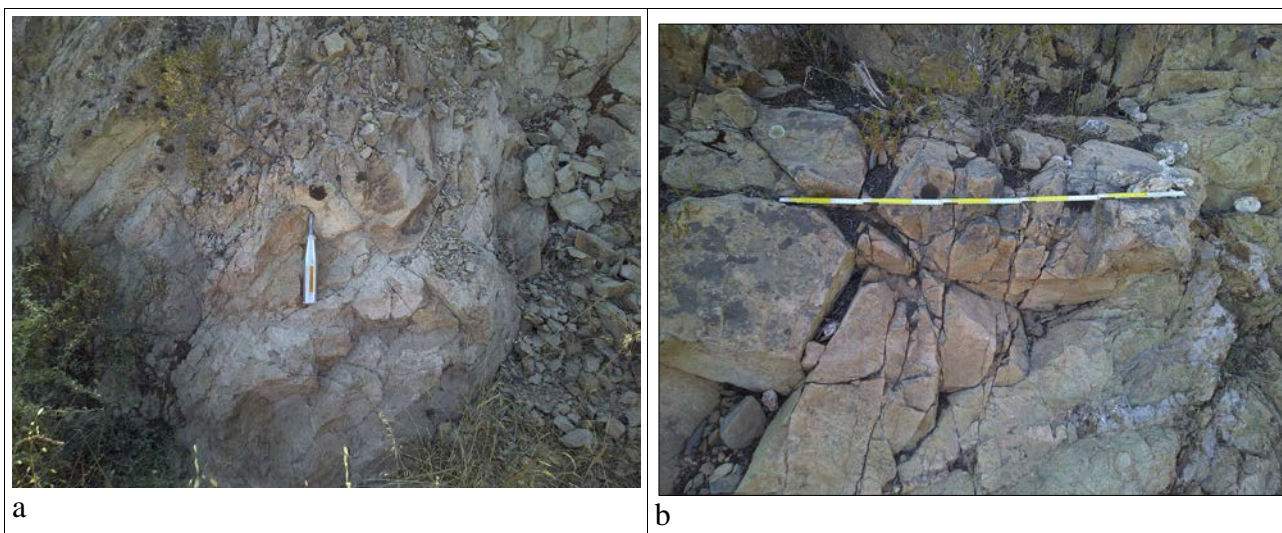
a

b



S1: 50/20
 K1: 32/83
 K2: 343/83
 K3: 100/84
 K4: 105/47

TAV. 3 – Fotografie degli affioramenti delle metaepiclastiti alterate della Formazione di Monte Santa Vittoria di Str. 2 dove la superficie di discontinuità più appariscente è rappresentata dalla scistosità penetrativa (foto a), anche se sono riconoscibili famiglie di discontinuità sub-verticali (foto b). La proiezione stereografica rappresenta le famiglie di discontinuità rilevate dell'ammasso roccioso. Sono possibili scivolamenti di cunei rocciosi verso i quadranti occidentali più probabili in caso di fronti di scavo immergenti ad alto angolo verso nord, NE e SE. Scivolamenti planari possibili per i fronti di scavo che presentano immersioni simili alle famiglie dei giunti con inclinazioni maggiori dell'angolo di attrito rappresentato dal cerchio blu. L'inclinazione di 20° delle superfici S1 è inferiore all'angolo di attrito medio delle discontinuità e questo non favorisce lo scivolamento lungo tali piani. S1 rappresenta la stratificazione, k1, k2 e k3, k4 la media delle famiglie dei giunti.



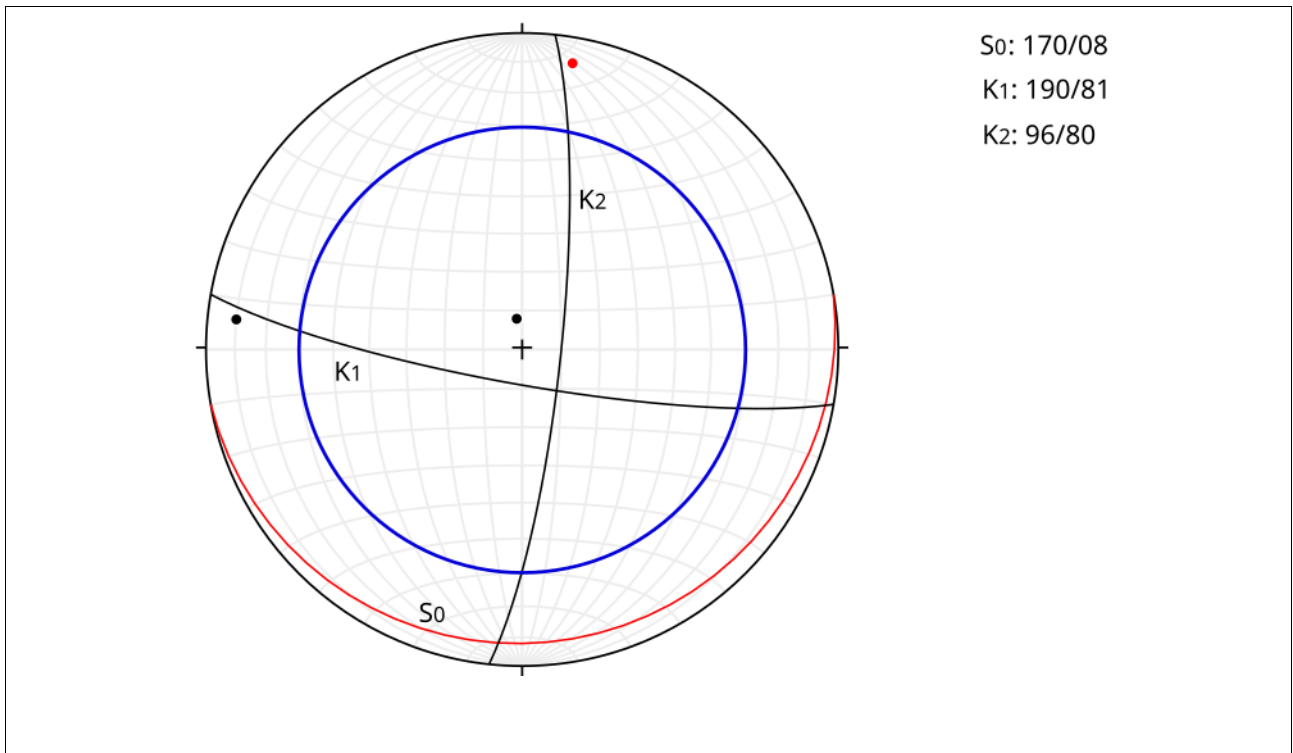
TAV. 4 – Fotografie degli affioramenti delle metaepiclastiti arenacee di Str. 3 che mostra una scistosità più spaziata rispetto a Str. 2 in ragione di una granulometria più grossolana (foto a), anche se sono evidenti famiglie di discontinuità sub-verticali (Foto b). La proiezione stereografica rappresenta le famiglie di discontinuità rilevate dell'ammasso roccioso. Sono possibili scivolamenti di cunei rocciosi verso i quadranti meridionali più probabili in caso di fronti di scavo immergenti ad alto angolo verso sud. Scivolamenti planari possibili per i fronti di scavo che presentano immersioni simili alle famiglie dei giunti con inclinazioni maggiori dell'angolo di attrito rappresentato dal cerchio blu. L'inclinazione delle superfici S1 in questo caso è di circa 60°, superiore all'angolo di attrito delle discontinuità e questo rende possibile lo scivolamento lungo tali piani. S1 rappresenta la stratificazione, k1, k2 e k3, k4 la media delle famiglie dei giunti.



a



b



TAV. 5 – Fotografie degli affioramenti calcareo-dolomitici giurassici di Str. 4 (foto a-b). La fratturazione è abbastanza marcata anche se sono evidenti solo 2 famiglie di discontinuità oltre alla stratificazione. La proiezione stereografica rappresenta le famiglie di discontinuità rilevate dell'ammasso roccioso. Sono possibili scivolamenti di cunei rocciosi verso SE più probabili con fronti di scavo immergenti ad alto angolo verso tale direzione. Scivolamenti planari possibili per i fronti di scavo che presentano immersioni simili alle famiglie dei giunti che all'incirca sono verso est e verso sud con inclinazioni maggiori dell'angolo di attrito rappresentato dal cerchio blu. S0 rappresenta la stratificazione, k1, k2 e k3 la media delle famiglie dei giunti.

3 CONCLUSIONI

Il rilievo geostrutturale delle litologie rappresentative del terreno di fondazione di 17 dei 21 aerogeneratori in progetto ha consentito di stimare la qualità degli ammassi rocciosi e di definire i principali parametri di resistenza espressi dalla coesione e dell'angolo di attrito attraverso l'utilizzo della classificazione di Bieniawski che si basa sulla resistenza a compressione uniassiale della roccia integra, sulla fratturazione dell'ammasso roccioso e sulle condizioni e spaziatura delle discontinuità.

Gli ammassi risultano tutti di qualità mediocre (III classe di Bieniawski) anche se i valori oscillano tra 25° di angolo di resistenza al taglio e 200 KPa di coesione per le litologie più alterate e maggiormente fratturate (litologie metamorfiche a matrice argilloso-siltosa) e 32,5 ° e 270 KPa per i calcari dolomitici mesozoici poco fratturati.

Sono state rappresentate infine tramite proiezioni stereografiche le famiglie significative dei giunti presenti nei 4 punti stazione, ed analizzate le possibilità di mobilità dei blocchi in relazione alle giaciture delle discontinuità ed all'angolo di resistenza a taglio dell'ammasso roccioso fratturato attraverso il test di Markland.

Il test evidenzia la presenza di discontinuità che possono dare luogo a scivolamenti planari e di cunei rocciosi all'interno degli scavi con fronti verticali nell'ordine dei 5 m che dovranno essere valutati in fase esecutiva da parte della DD. LL..



3E Ingegneria S.r.l.



Amistade - Progetto di un Parco Eolico nei territori dei Comuni di Esterzili e di Escalaplano (SU). - Marzo 2023

ALLEGATO 2: Relazione Indagini Geofisiche

COMUNI DI ESCALAPLANO E ESTERZILI

Provincia del Sud Sardegna (SU)

PROSPEZIONI GEOFISICHE



GEOL. GIAMBATTISTA CADAU <i>Via Berlinguer 8</i> 08023 FONNI (NU)		
Titolo: PROGETTO DI UN PARCO EOLICO DA REALIZZARSI ALL'INTERNO DEL TERRITORIO COMUNALE DI ESCALAPLANO (SU) E ESTERZILI (SU)		
Oggetto: INDAGINI GEOFISICHE DI TIPO SISMICO E GEOELETTICO	Tav.:	
Il Professionista incaricato GEOL. GIAMBATTISTA. CADAU	Committente: MAXXI ENGINEERING SRL	Scala: varie Date: Agosto 2022

INDICE

1	PREMESSA.....	3
2	MASW.....	4
2.1	STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	4
2.2	METODOLOGIA DI INDAGINE.....	5
2.3	ELABORAZIONE DATI	11
2.4	CLASSIFICAZIONE DEL SOTTOSUOLO	12
3	PARAMETRI CORRELATI	18
4	PROSPEZIONE GEOELETTRICA	22
4.1	MISURE DI RESISTIVITÀ.....	22
4.2	STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	25
4.3	CARATTERISTICHE DI RESISTIVITÀ	26
5	CONCLUSIONI.....	29

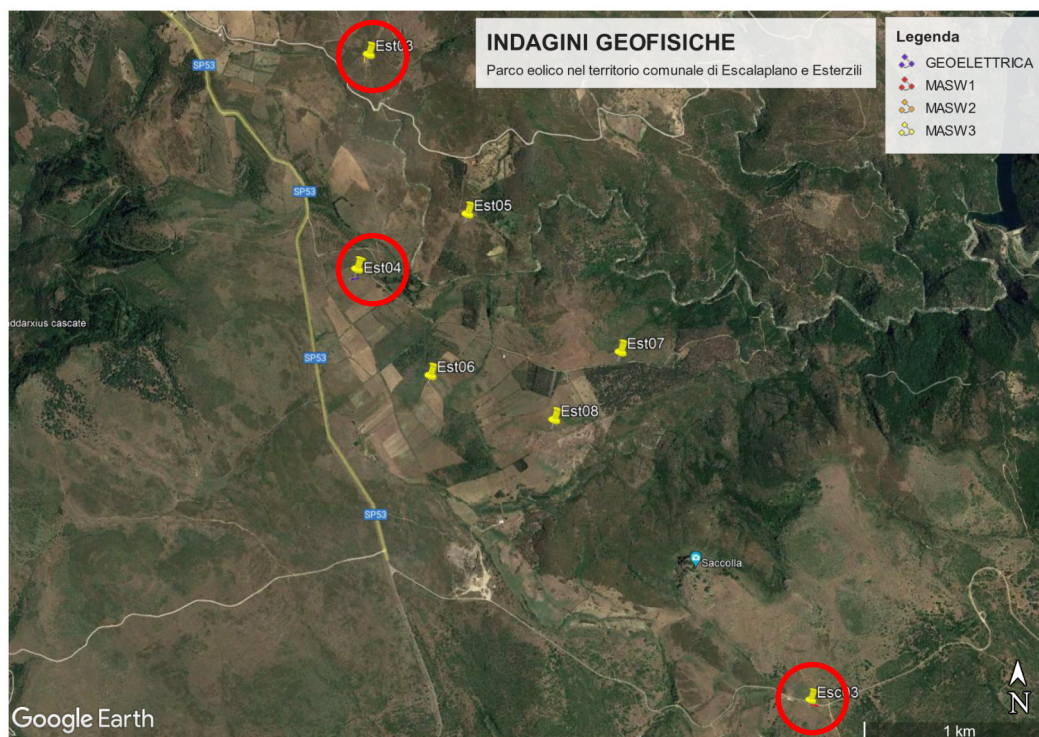
INDAGINI GEOFISICHE

1 PREMESSA

La presente relazione, commissionata dalla società Maxxi Engineering Srl, illustra i risultati di quattro prospezioni geofisiche eseguite nell'ambito del "Progetto di un parco eolico da realizzarsi all'interno del territorio comunale di Escalaplano (SU) e Esterzili (SU)".

Le indagini geofisiche di tipo sismico (MASW) e geoelettrico hanno avuto come finalità la determinazione della categoria sismica di suolo e la comprensione dell'assetto stratigrafico e idrogeologico dei terreni di fondazione.

La MASW definisce l'andamento lungo la verticale della velocità delle onde di taglio V_s , utile non solo per la definizione delle caratteristiche di amplificazione sismica del sito ma anche per valutazioni di tipo stratigrafico viste le buone correlazioni esistenti, anche dal punto di vista di alcuni parametri deformativi, con le V_s . La geoelettrica fornisce l'andamento in 2D della resistività elettrica del terreno da cui si possono dedurre importanti informazioni sulla stratigrafia e sull'idrogeologia del settore di indagine. I siti indagati sono stati tre (in corrispondenza delle pale eoliche in progetto EST03, EST04 e ESC03), in ognuno di questi è stata eseguita una MASW mentre nel sito destinato alla EST04 oltre la MASW è stata realizzata una prospezione tomografica di tipo geoelettrico.



In rosso la localizzazione su aerofotogrammetrico delle indagini

Localizzazione di dettaglio delle indagini in allegato.

2 MASW

Sono state eseguite n°3 MASW, una per sito. L'indagine, eseguita mediante il metodo MASW (Multi Channel Analysis Surface Waves, analisi della dispersione delle onde di Rayleigh da misure di sismica attiva – e.g. Park et al., 1999), ha avuto come fine la classificazione del sito in esame ai sensi della OPCM 3274 e delle Norme Tecniche (D.M. 17.01.2018) per la caratterizzazione della risposta sismica dell'area in studio.

2.1 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

La **strumentazione** utilizzata è costituita da un Sismografo DAQLink III (Seismic Source U.S.A.) con convertitore A/D a 24 bit, 24 canali, range dinamico 144db e output dei dati in SEG-Y o SEG-2, l'intero sistema di acquisizione è conforme alle specifiche ASTM D5777-00 (2006) (Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation); l'energizzazione del terreno è stata effettuata mediante l'utilizzo di una massa battente (mazza di 10 kg con starter su piattello di battuta in alluminio).

Caratteristiche tecniche

1 to 24 channels per unit

Weatherproof enclosure

A/D conversion:

24 bit high-speed sigma delta converters

Dynamic Range:

144dB (system)

Greater than 118 dB (measured at 2msec)

Bandwidth:

DC to 15 KHz

Analog filter flat response to 8000Hz

Digital filter bandwidth=85% of Nyquist frequency

Common Mode Rejection:

Greater than 100 dB

Crosstalk:

Better than 125 dB

Noise Floor:

0.2 microvolt RMS noise (2msec sample rate)

Trigger accuracy:

+/- 1microsecond at all sample rates



Maximum Input Signal:

Standard (x 2 gain) 3.58 Volts peak to peak

(optional: (x 1 gain) 7.16 Volts peak to peak

Input Impedance:

100 K Ohms

Preamplifier Gains:

X2 (6dB) and x32 (30 dB) standard; software selectable

(x1 (0 dB) and x16 (24 dB) available on special request)

Anti-alias Filters:

85% of Nyquist frequency

Digital Filters:

Low Cut – User Selectable frequency

Notch – 50 or 60 Hz standard; User Selectable

High Cut - User Selectable

Sample Interval:

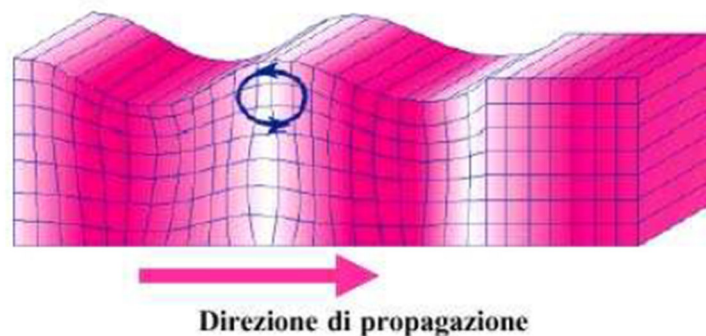
0.0208, 0.0625, 0.125, 0.250, 0.500, 1.00, 2.00, 4.00, 8.00, 16.00 millisecond

Sample Frequency:

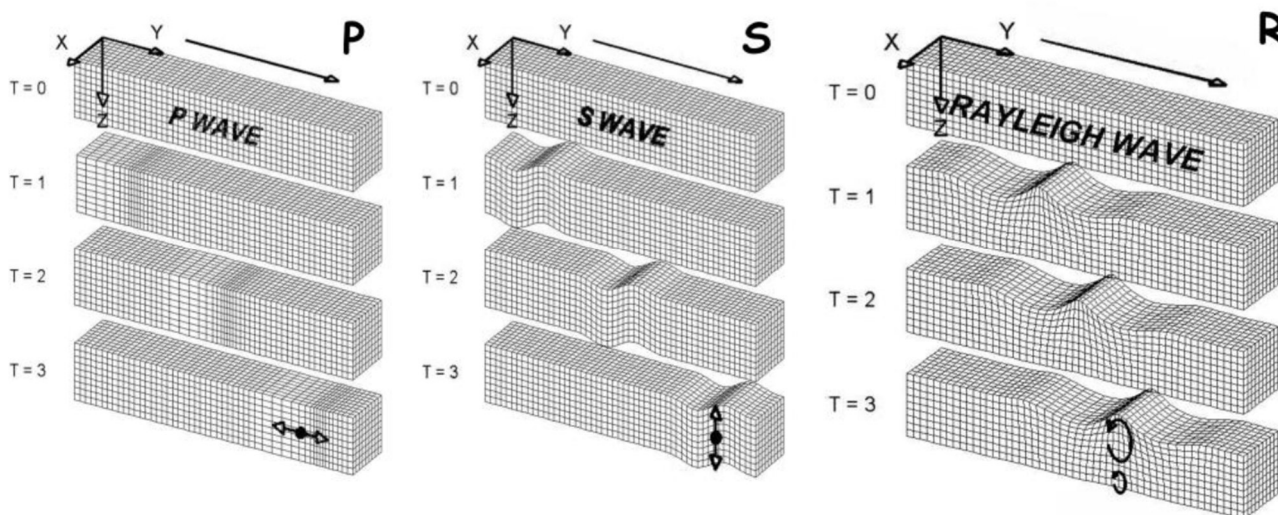
48000, 16000, 8000, 4000, 2000, 1000, 500, 250, 125, 62.5 sample/second

2.2 METODOLOGIA DI INDAGINE

Analisi delle onde di superficie secondo il metodo MASW - Le onde di Rayleigh sono polarizzate in un piano verticale e si generano in corrispondenza della superficie libera del mezzo quando viene sollecitato acusticamente. In questo tipo di onde le particelle descrivono un movimento di tipo ellittico la cui ampiezza decresce esponenzialmente con la distanza dalla superficie libera. L'asse maggiore delle ellissi è normale alla superficie libera del mezzo ed alla direzione di propagazione delle onde e le particelle compiono questo movimento ellittico in senso retrogrado alla direzione di propagazione delle onde che vengono così generate. Le onde superficiali di Rayleigh, quando si propagano in un mezzo omogeneo, non presentano dispersione e la loro velocità è uguale a $0.92V_s$. In un mezzo disomogeneo, quale la Terra, la loro velocità varia in funzione della lunghezza d'onda tra i limiti 0 e $0.92 V_s$. La teoria della propagazione delle onde superficiali è ben conosciuta ed è descritta dettagliatamente da Ewing et al. (1957).



Rappresentazione grafica della propagazione delle onde superficiali di Rayleigh caratterizzata dall'oscillazione polarizzata in un piano verticale e con movimento delle particelle retrogrado rispetto al senso di propagazione dell'onda.



Le onde di Rayleigh, sulla destra, si muovono secondo una componente orizzontale e una componente verticale, contrariamente alle onde P ed S che presentano una sola componente, rispettivamente longitudinale e trasversale

La determinazione della velocità delle onde di taglio V_S tramite le misure delle onde superficiali di Rayleigh risulta particolarmente indicata per suoli altamente attenuanti e ambienti rumorosi poiché la percentuale di energia convertita in onde di Rayleigh è di gran lunga predominante (67%) rispetto a quella coinvolta nella generazione e propagazione delle onde P (7%) ed S (26%). Inoltre l'ampiezza delle onde superficiali dipende da r^{-2} e non da r come per le onde di volume.

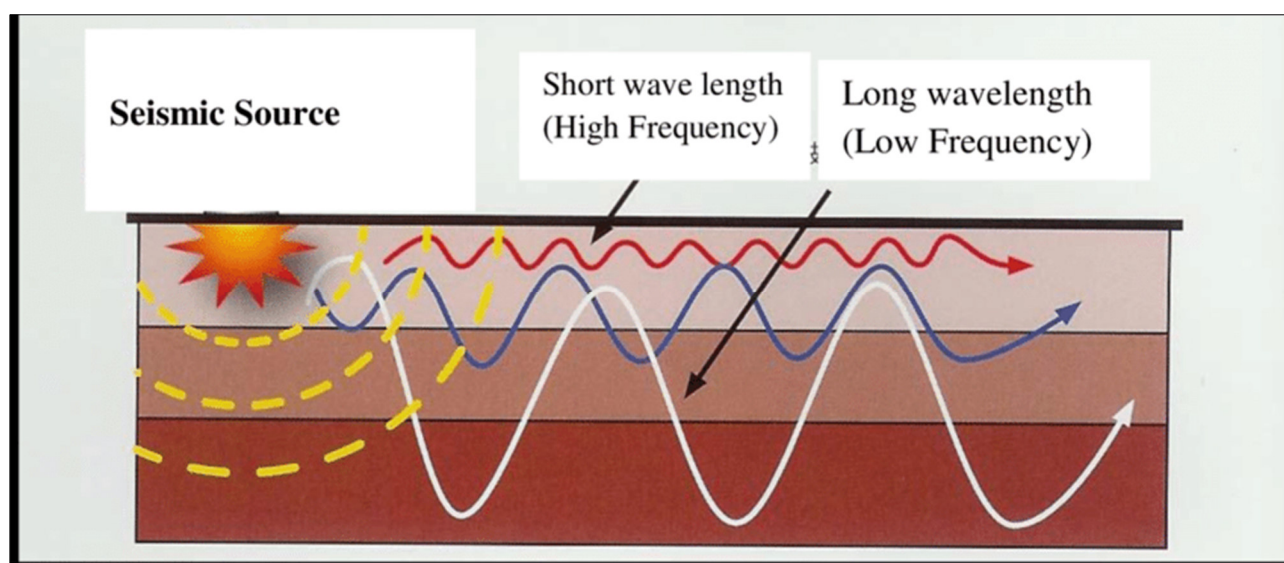
I metodi basati sull'analisi delle onde superficiali di Rayleigh forniscono una buona risoluzione e non sono limitati, a differenza del metodo a rifrazione, dalla presenza di inversioni di velocità in profondità.

Inoltre la propagazione delle onde di Rayleigh, anche se influenzata dalla V_p e dalla densità, è funzione, innanzi tutto, della V_s , parametro di fondamentale importanza per la caratterizzazione geotecnica di un sito secondo quanto previsto dalle "Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni" D.M. del 17/01/2008. Infatti, mentre la velocità delle onde P misurata in terreni saturi dipende in maniera sostanziale dalle vibrazioni trasmesse dal fluido interstiziale e non dallo scheletro solido del materiale, la velocità delle onde S è

caratteristica delle vibrazioni trasmesse dal solo scheletro solido e, pertanto, a differenza delle onde P, risulta rappresentativa delle reali proprietà meccaniche del terreno.

La proprietà fondamentale delle onde superficiali di Rayleigh, sulla quale si basa l'analisi per la determinazione delle V_s , è costituita dal fenomeno della dispersione che si manifesta in mezzi stratificati.

Pertanto, analizzando la curva di dispersione, ossia la variazione delle velocità di fase delle onde di Rayleigh in funzione della lunghezza d'onda (o della frequenza, che è l'inverso della lunghezza d'onda), è possibile determinare la variazione della velocità delle onde di taglio con la profondità tramite il processo d'inversione.



Le onde di Rayleigh si disperdono con lunghezze d'onda differenti a seconda della profondità

La tecnica MASW consente di misurare la velocità delle onde di taglio V_s sfruttando il carattere dispersivo delle onde di Rayleigh quando queste si propagano in un mezzo stratificato e di risalire all'andamento delle V_s lungo la verticale.

La dispersione consiste nella variazione della velocità di fase a diverse frequenze, con l'aumento della lunghezza d'onda (abbassamento di frequenza) la profondità coinvolta dalla propagazione dell'onda è via via maggiore.

È quindi possibile, impiegando onde di un certo intervallo di frequenza, caratterizzare le proprietà acustiche dei terreni sino ad una certa profondità. Nella maggior parte delle indagini sismiche per le quali si utilizzano le onde compressive, più di due terzi dell'energia sismica totale generata viene trasmessa nella forma di onde di Rayleigh, la componente principale delle onde superficiali.

Ipotizzando una variazione di velocità dei terreni in senso verticale, ciascuna componente di frequenza dell'onda superficiale ha una diversa velocità di propagazione (chiamata velocità di fase) che, a sua volta,

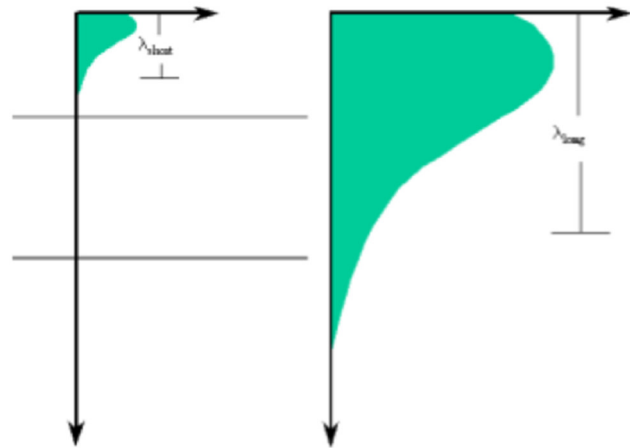
corrisponde ad una diversa lunghezza d'onda per ciascuna frequenza che si propaga. Questa proprietà si chiama dispersione.

L'ampiezza delle onde superficiali diminuisce esponenzialmente con la profondità. In realtà la rapidità di questa attenuazione dipende dalla lunghezza d'onda associata.

In particolare, all'aumentare della lunghezza d'onda λ , aumenta la profondità della parte interessata dalla perturbazione; la lunghezza d'onda è legata al periodo T o se si preferisce alla frequenza f dell'onda mediante la relazione

$$\lambda = V_r \times T = V_r / f$$

Quindi, a parità di velocità di fase (V_r), la profondità cresce all'aumentare del periodo e al diminuire della frequenza. In pratica, al crescere del periodo, aumenta la sensibilità dell'onda a caratteristiche del terreno sempre più profonde.



Quindi, la massima profondità di esplorazione dipende dalla massima lunghezza d'onda misurabile con lo stendimento di sensori disponibili. Si è riscontrato che le lunghezze d'onda di dimensioni fino al doppio della lunghezza massima dello stendimento sono effettivamente misurabili. Sapendo che la profondità di investigazione è pari a circa 0.5-0.8 della massima lunghezza d'onda misurabile, la profondità in genere raggiungibile è pari alla metà della lunghezza dello stendimento.

Sebbene le onde superficiali siano considerate rumore per le indagini sismiche che utilizzano le onde di corpo (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.

Questo tipo di analisi fornisce i parametri fondamentali comunemente utilizzati per valutare la rigidità superficiale, una proprietà critica per molti studi geotecnici.

L'intero processo comprende tre passi successivi: L'acquisizione delle onde superficiali (ground roll), la costruzione di una curva di dispersione (il grafico della velocità di fase rispetto alla frequenza) e l'inversione della curva di dispersione per ottenere il profilo verticale delle V_s .

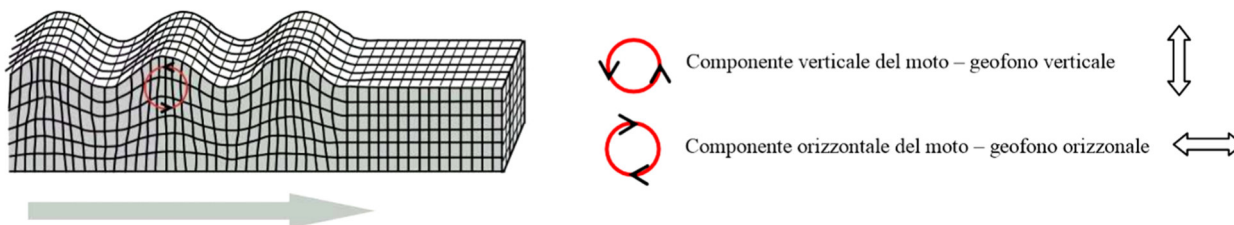
Il metodo si sviluppa attraverso la determinazione delle proprietà dispersive del mezzo individuabili dall'analisi dello spettro di velocità dei dati. Il range di frequenza si sviluppa comunemente tra i 5 Hz e i 70Hz, fornendo informazioni sino a profondità di circa 30 m a seconda della rigidità del suolo: la profondità massima di penetrazione è determinata dalla relazione fra velocità di propagazione dell'onda e frequenza più bassa identificabile.

Questa tipologia di prospezione si realizza con uno stendimento sismico costituito da 12/24 o più geofoni allineati a distanza intergeofonica variabile tipicamente fra 1 e 5 m (la lunghezza dello stendimento incide sulla focalizzazione del segnale nello spettro di velocità) che registrano le onde sismiche generate in corrispondenza di alcuni punti di energizzazione effettuati tipicamente ad una distanza compresa fra 2 m e 20 m dal primo geofono.

L'obiettivo della registrazione è quindi l'individuazione del treno di onde superficiali (Rayleigh), che a causa della stratificazione del mezzo subisce una dispersione le cui modalità sono direttamente correlate alla velocità delle onde di taglio S.

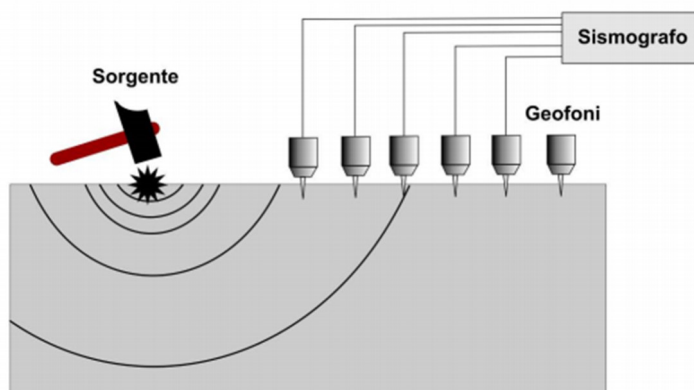
L'acquisizione delle onde di Rayleigh può essere fatta mediante geofoni verticali (come nel nostro caso), oppure mediante geofoni orizzontali con asse posto parallelo (radiale) allo stendimento (in entrambi i casi si utilizza una sorgente verticale - piastra-martello).

Rayleigh Wave



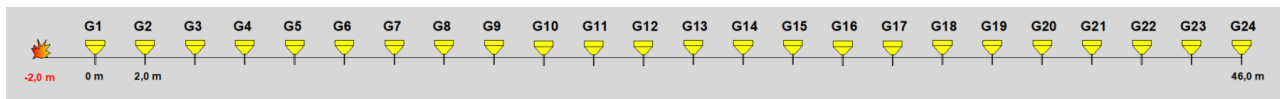
Modalità esecutiva MASW – La prova è consistita nel produrre sulla superficie del terreno, in prossimità del sito da investigare, sollecitazioni dinamiche verticali, per la generazione delle onde superficiali, e nel registrare le vibrazioni prodotte, sempre in corrispondenza della superficie, a distanze note e prefissate, mediante sensori (geofoni) a componente verticale.

I geofoni usati sono di tipo verticale da 4.5 Hz e, grazie alla dinamica dello strumento (117 dB di range dinamico), consentono la registrazione delle onde di superficie con contenuto in frequenza fino a circa 2 Hz.



Schema operativo acquisizione MASW – Gli stendimenti sismici sono stati realizzati con la stessa geometria e collocati in prossimità o in corrispondenza del punto di scavo della fondazione delle pale eoliche. La geometria dello stendimento ha adottato la seguente configurazione:

- N° geofoni: 24 con frequenza propria di risonanza 4,5 Hz;
- Distanza intergeofonica: 2,0 m, per complessivi 46 m di stendimento;
- Offset di battuta: battuta disposta a -2,0 m dal primo geofono.



Schema stendimento sismico

Per quanto riguarda l'acquisizione sono state utilizzate le seguenti impostazioni:

Tempo di acquisizione: 1.0 s;

Frequenza di campionamento: 1000 Hz;

Periodo di campionamento: 1.0 ms.

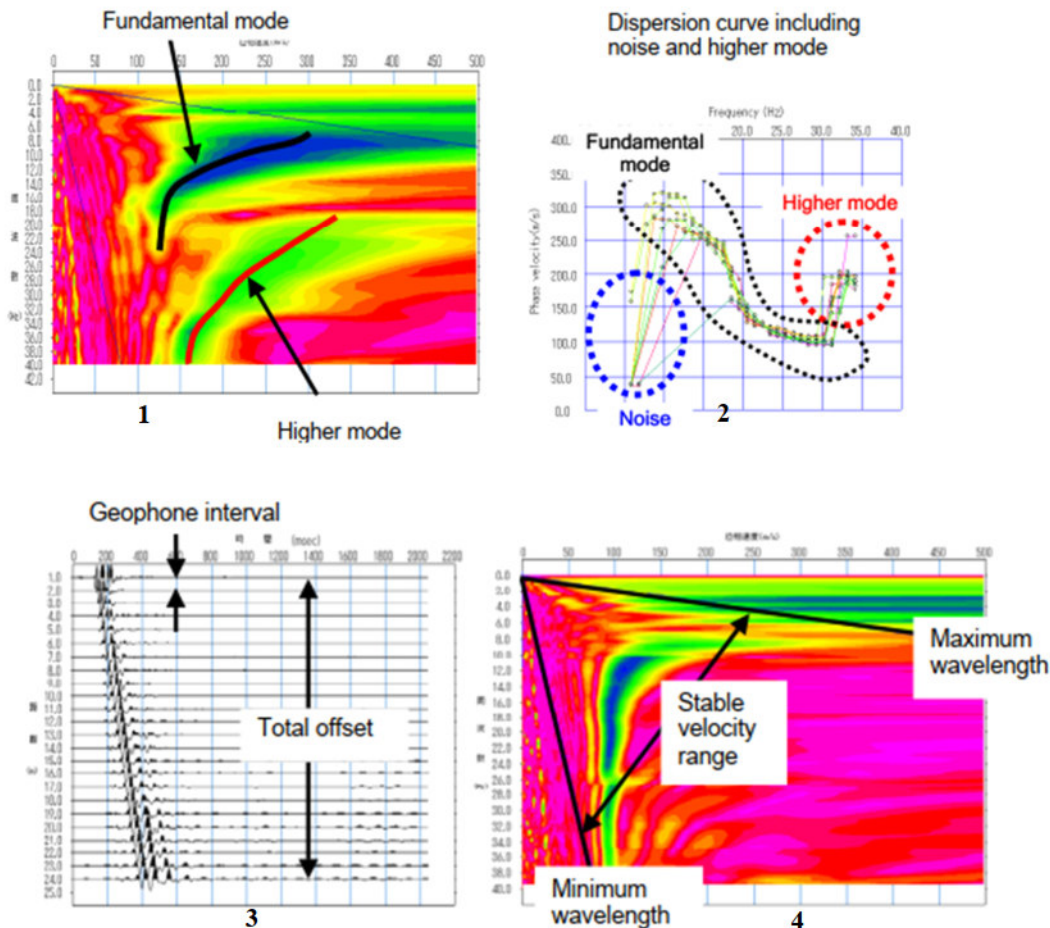
I dati acquisiti in campagna sono stati, quindi, elaborati ed è stato possibile ricostruire un modello attendibile V_s /profondità. Il metodo di investigazione MASW è detto "attivo" in quanto la generazione di onde sismiche si effettua artificialmente a mezzo di idonea massa battente, fucile sismico o altro. Il punto di energizzazione è posto lungo l'allineamento dei geofoni ad una certa distanza da un geofono esterno. Con questa procedura si ricostruisce l'assetto sismo-stratigrafico del sottosuolo che si basa sull'analisi delle onde di Rayleigh che si propagano entro un semispazio stratificato.

Il metodo prevede l'utilizzo di strumentazione classica per sismica a rifrazione ad elevata dinamica (24 bits di conversione A/D), con geofoni a bassa frequenza. Una volta acquisiti i dati sono stati riversati direttamente su p.c. per la successiva elaborazione.

2.3 ELABORAZIONE DATI

L'elaborazione dei dati è stata fatta una volta definita la curva di dispersione. I dati sono stati processati attraverso il codice SeisImager (Pickwin v. 3.14 WaveEq v. 2.07).

La procedura di elaborazione consiste nell'intervenire e modificare il profilo delle velocità V_s fino al raggiungimento di un buon accordo fra la curva di dispersione rilevata in sito e la curva simulata numericamente.

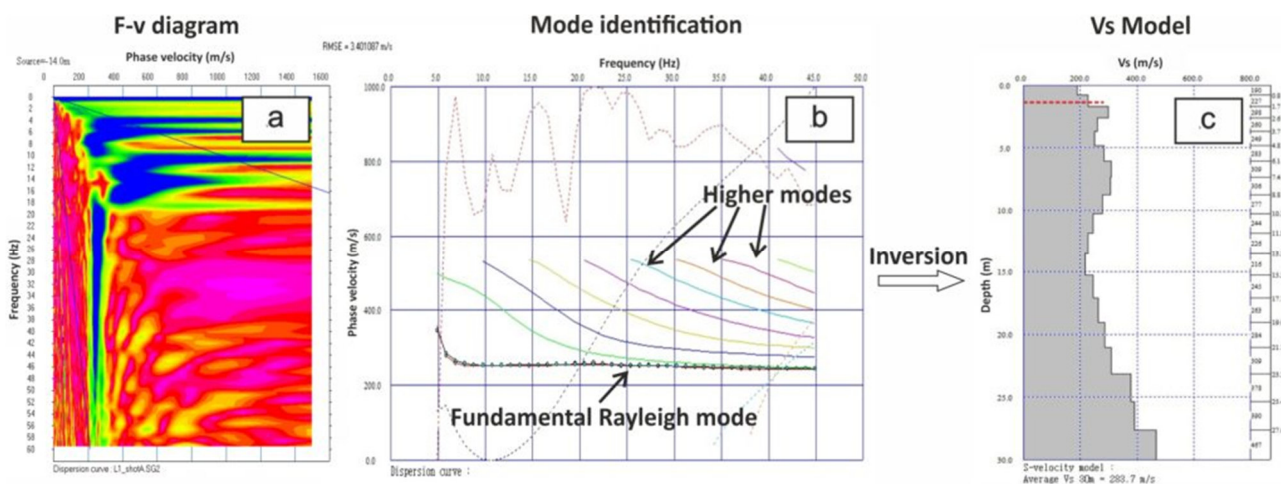


Nel processo di analisi si susseguono le seguenti fasi:

- Acquisizione dei sismogrammi;
- Esportazione del file in formato SEG-2 idoneo all'elaborazione finale;
- Elaborazione dello spettro nel dominio Velocità – N d'onda;

- Calcolo della velocità apparente sperimentale;
- Calcolo della velocità apparente numerica;
- Individuazione del profilo delle velocità delle onde Vs;
- Calcolo della Vs, eq.

La gamma di frequenza entro la quale la velocità di fase è considerata stabile corrisponde all'intervallo del ricevitore o geofono e l'offset totale per i rilevamenti sorgente attivi (e array lunghezza per indagini sulla fonte passiva). L'intervallo del geofono e l'offset totale in generale si riferiscono alla lunghezza d'onda della metà, il che significa che la lunghezza d'onda minima campionata per qualsiasi dato rilevamento è circa due volte l'intervallo del geofono e il massimo della lunghezza d'onda campionata è circa due volte l'offset totale. I valori di dispersione appartenenti a disturbi a bassa frequenza e ai modi superiori sono stati esclusi dall'interpretazione del profilo di velocità.



La gamma di frequenza è rappresentata sul grafico della velocità di fase da linee nere (mostrate alla pagina precedente nel grafico 4) con pendenze che corrispondono alle lunghezze d'onda minima e massima. La curva di dispersione in genere si presenta interpretabile sino a frequenze di circa 40-50 Hz, talvolta anche a frequenze maggiori

2.4 CLASSIFICAZIONE DEL SOTTOSUOLO

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, l'effetto della risposta sismica locale si valuta mediante specifiche analisi, da eseguire con le modalità indicate nel § 7.11.3 del DM 17 gennaio 2018. In alternativa, qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie

definite nella Tab. 3.2.II, si può fare riferimento a un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio, VS.

L'elaborazione delle diverse MASW ha permesso di classificare il sottosuolo in base ai valori di velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio Vs; per ogni indagine di seguito verrà illustrata la curva di dispersione, il modello sismico elaborato e la categoria di sottosuolo.

La MASW1 ha evidenziato una categoria sismica di tipo B (valutata con fondazione posizionata a piano campagna) e $V_{seq}=505$ m/s e categoria sismica A per fondazione oltre i 4/5 metri di profondità con $V_{seq}>800$ m/s.

La MASW1 evidenzia in superficie la presenza di alterazione con terreni argillosi superficiali, argille con abbondanti elementi di scisto e quarzo, detrito di alterazione spinta del sottostante scisto.

Le MASW 2 e 3 hanno fornito categoria sismica di tipo A con $V_{seq}>800$ m/s.

Il bedrock sismico è stato intercettato a profondità superiore ai 3 m solamente nella MASW1. Di seguito si riportano, per le differenti MASW eseguite, le tracce sismiche acquisite, la curva di dispersione delle onde di Rayleigh e il modello sismico che ne deriva a seguito di inversione dei dati.

Per quanto concerne i dettagli relativi alle caratteristiche geometriche dello stendimento, sono stati utilizzati 24 geofoni con passo intergeofonico pari a 2,0 m. La sorgente di energizzazione è stata posizionata a 2,0 m dal geofono G1. La $V_{s,eq}$ ricavabile dalla formula:

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

con:

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, dal piano di fondazione, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzato da V_s non inferiore a 800 m/s (bedrock sismico non necessariamente coincidente col substrato o basamento geologico)

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>

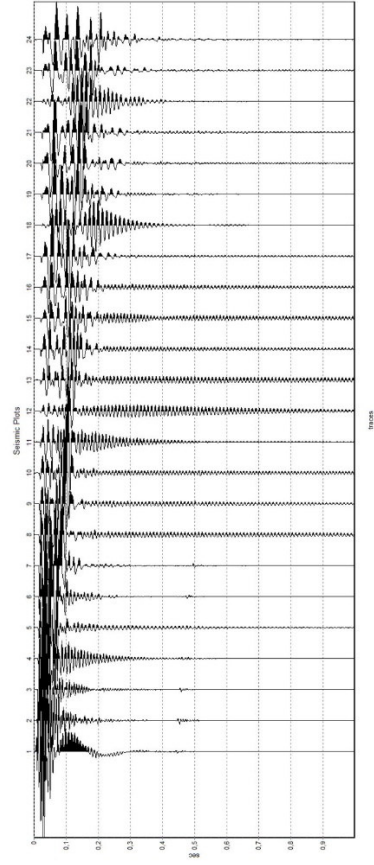
Tab. 3.2.II del DM 17.01.2018 (Norme Tecniche per le Costruzioni)

Solo la MASW1 evidenzia $V_{s,eq}$ che si posizionano su velocità di 505 m/s, determinando un suolo appartenente alla categoria B.

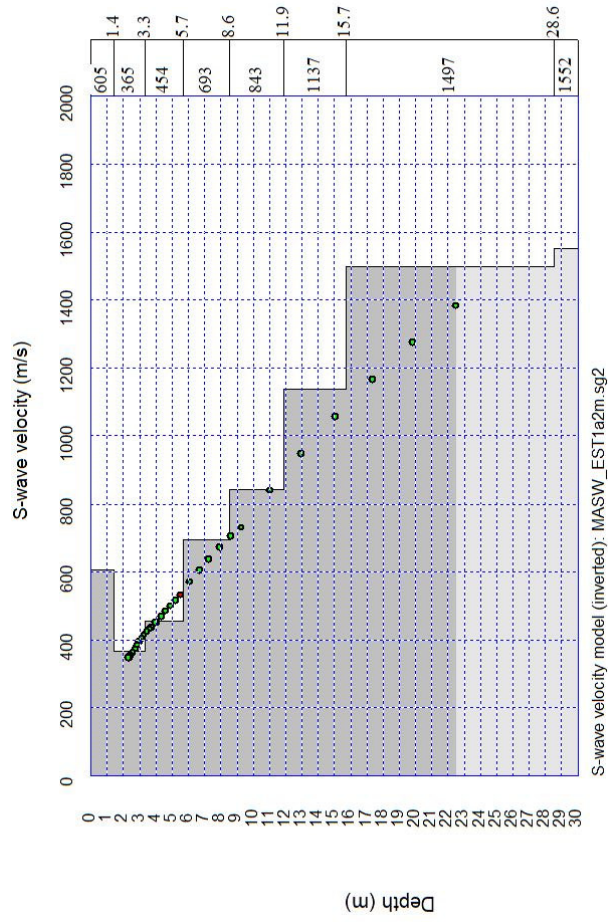
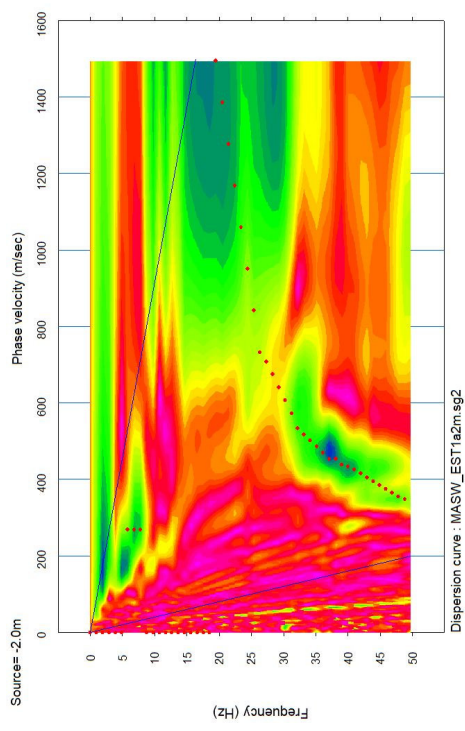
Le MASW restanti hanno indicato $V_s > 800$ m/s.

PROSPEZIONE MASW 1 (ESC03)

Dataset con 24 tracce sismiche



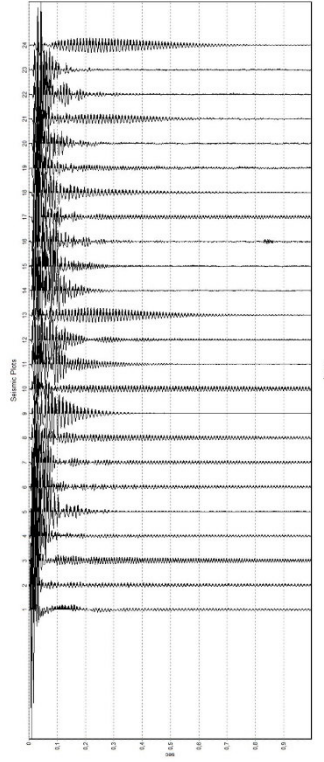
Curva di dispersione



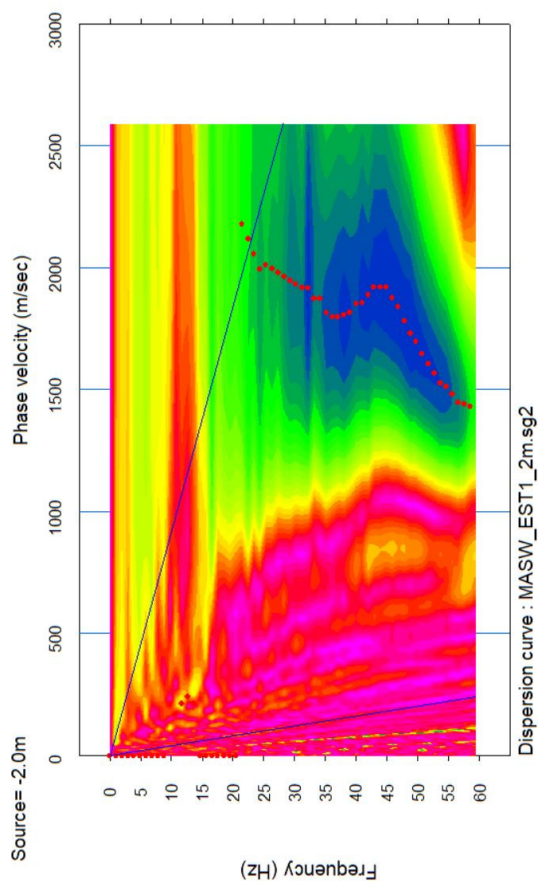
Modello sismico

PROSPERZIONE MASW 2 (EST03)

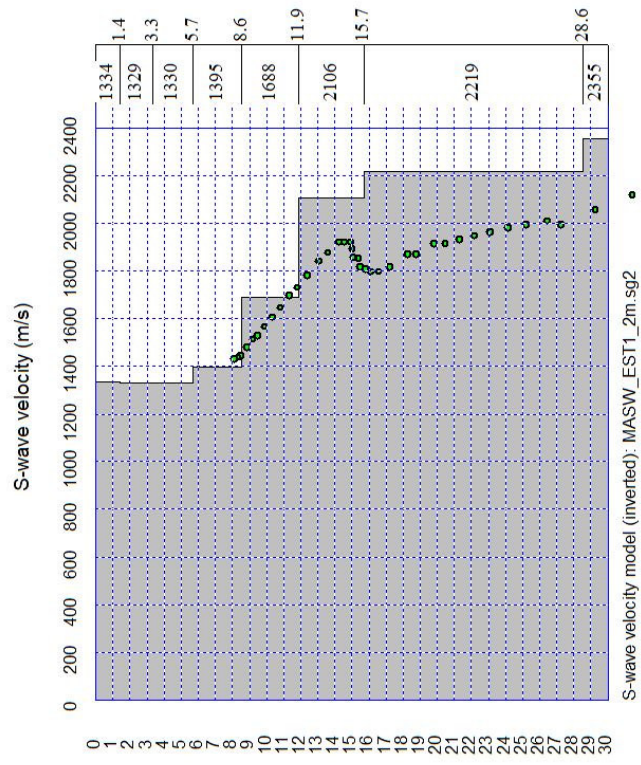
Dataset con 24 tracce sismiche



Curva di dispersione



Depth (m)

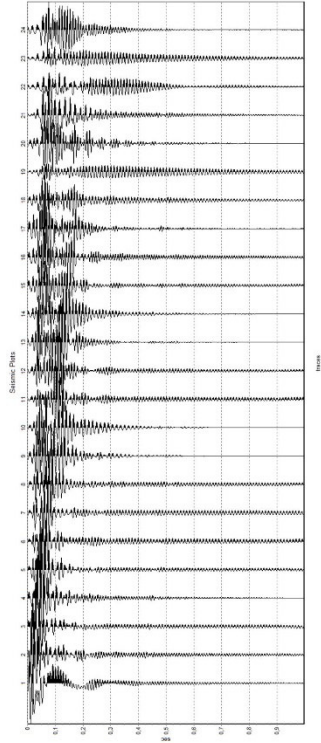


Modello sismico

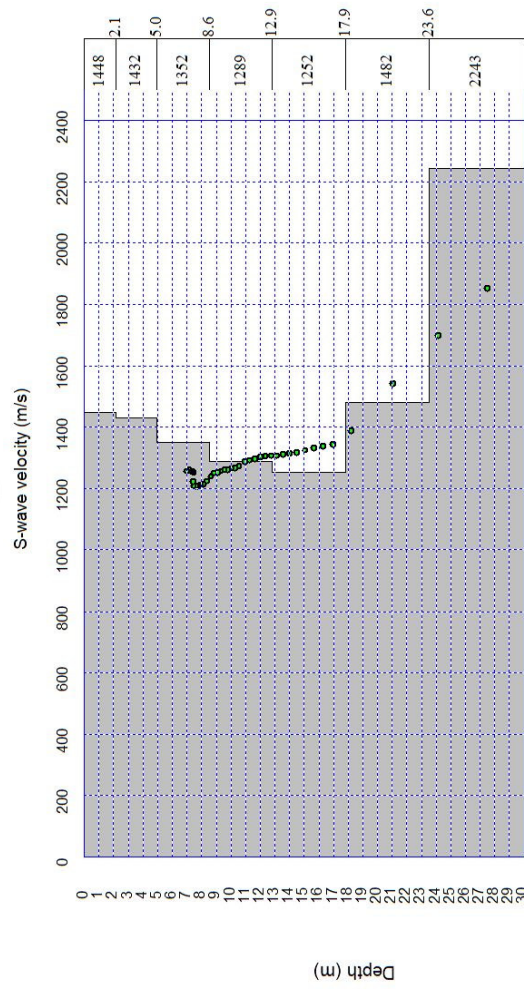
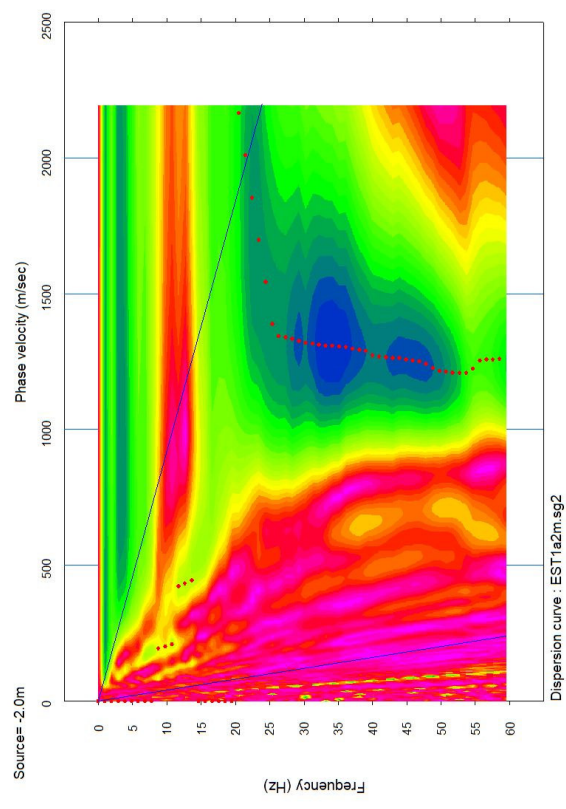
S-wave velocity model (inverted): MASW_EST1_2m.sg2

PROSPEZIONE MASW 3 (EST04)

Dataset con 24 tracce sismiche



Curva di dispersione



Modello sismico

3 PARAMETRI CORRELATI

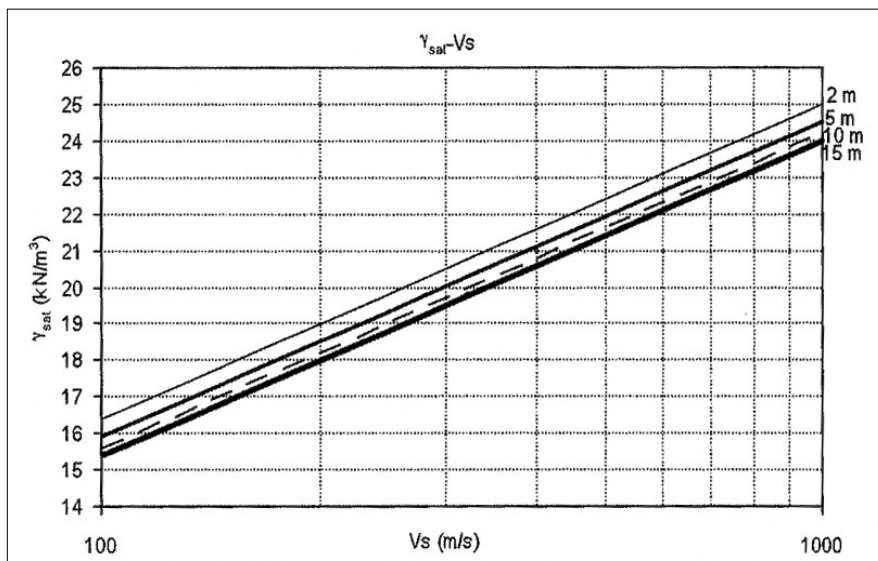
In via assolutamente preliminare è possibile utilizzare i valori di velocità delle Vs per estrapolare dei parametri geotecnici ottenibili dalla letteratura, utili in una prima fase di dimensionamento delle opere.

Le correlazioni utilizzate sono state attinte da “Stima dei parametri geotecnici in geofisica applicata” di Roccaforte-Cucinotta – Dario Flaccovio editore.

Correlazione γ -Vs

Esistono diverse correlazioni tra peso specifico e Vs e Vp, correlazioni che mettono in diretto contatto le velocità sismiche alla densità del materiale attraversato. La correlazione utilizzata nello studio è quella di

Keceli (2012) con $\gamma = 4,3 \cdot Vs^{0,25}$



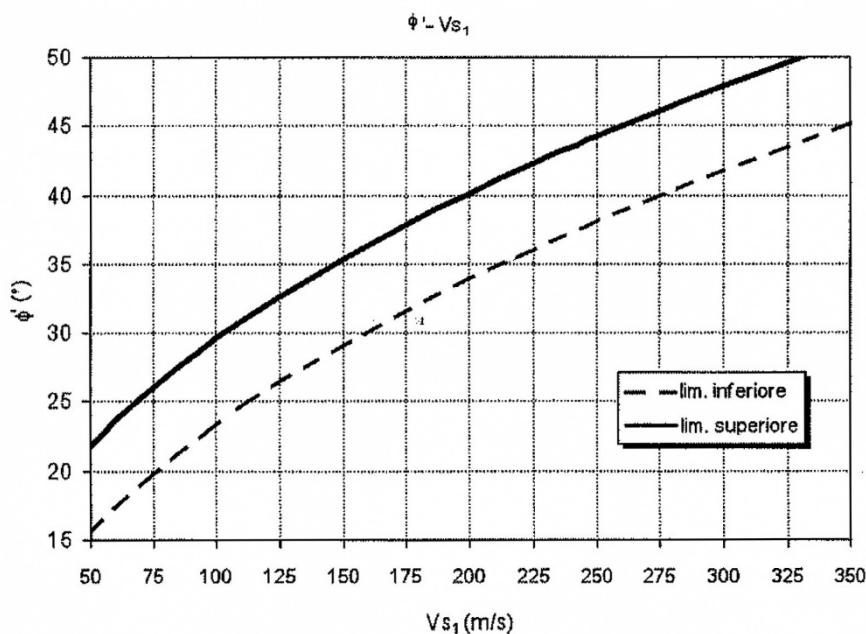
Correlazione ϕ -Vs

La correlazione per il calcolo dell'angolo di resistenza al taglio direttamente in funzione di Vs, valore normalizzato per la pressione litostatica, è ripresa da Uzielli et al. (2013) e Mayne (2014) e consente di definire il range dei valori di picco:

limite superiore: $\phi = 3,9 \cdot Vs^{0,44}$

limite inferiore: $\phi = (3,9 \cdot Vs^{0,44}) - 6,2$

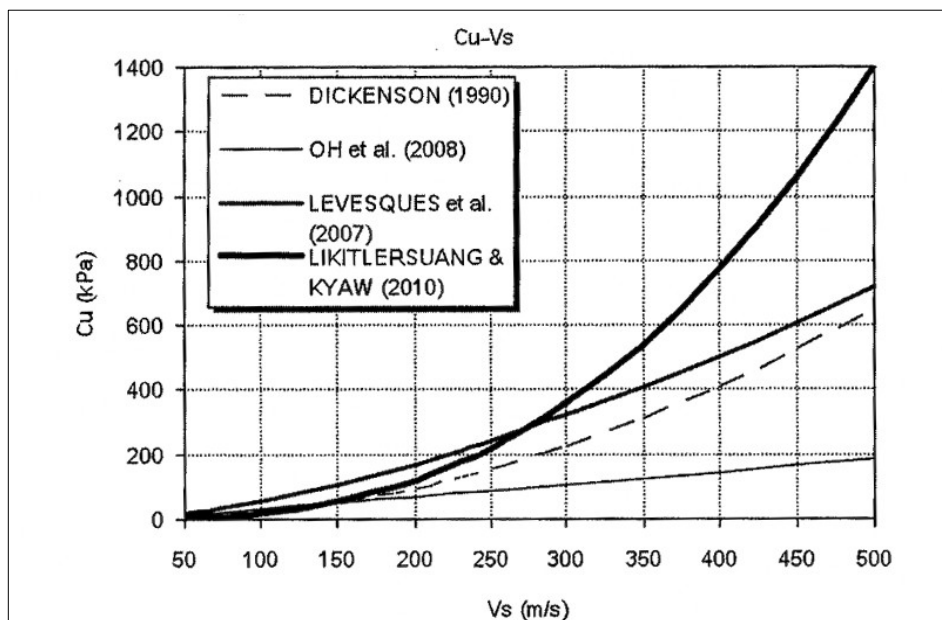
in via cautelativa si suggerisce l'utilizzo del limite inferiore.



Correlazione Cu-Vs

La correlazione per il calcolo della coesione non drenata (C_u in kPa) può essere calcolata con la formula di Dickenson (1990) valida per argille tenere:

$$C_u = (V_s/23)^{1/0.475}$$



Coefficiente di Poisson

Indica la misura del cambiamento geometrico di un corpo. E' definito dalla relazione

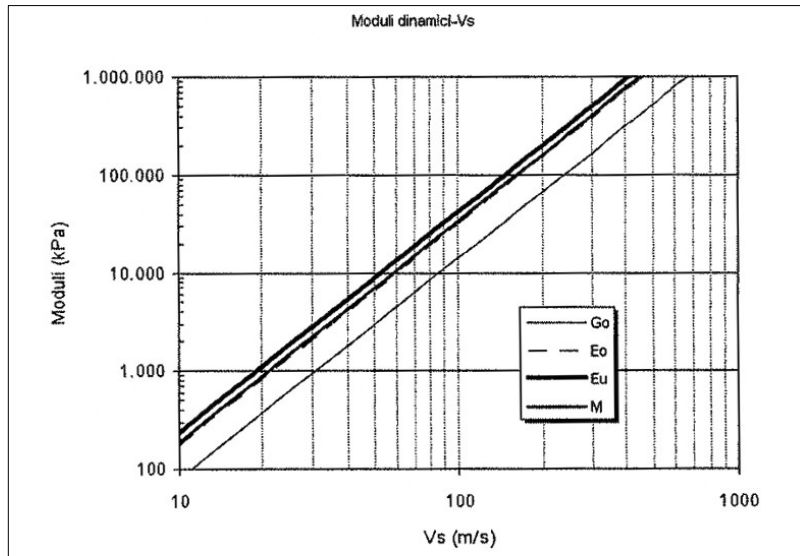
$$\rho = (V_p^2 - 2V_s^2) / 2(V_p^2 - V_s^2)$$

Modulo di deformazione al taglio

Per il calcolo del modulo di taglio iniziale o a piccole deformazioni si usa generalmente la nota relazione:

$$G_0 = (\gamma/g) V_s^2$$

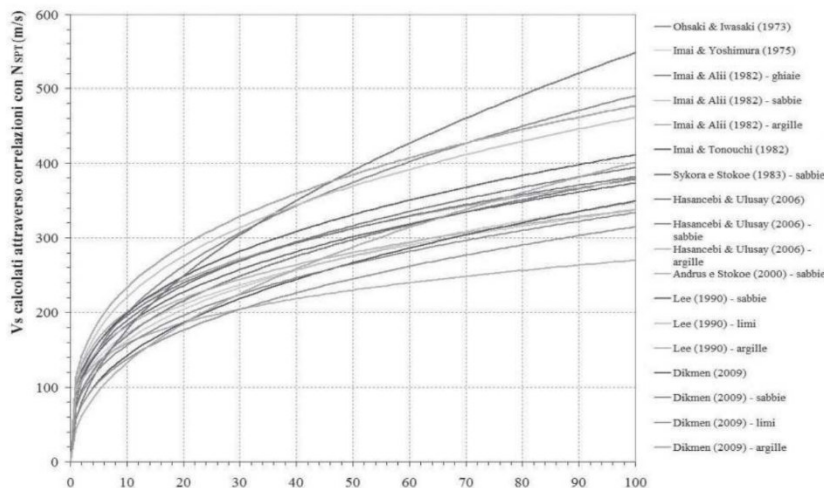
dove γ è il peso specifico e g l'accelerazione di gravità.



Correlazioni Nspt – Vs

In letteratura esistono diverse correlazioni tra Vs e i risultati di diverse prove penetrometriche, in particolare N_{SPT} e q_c (resistenza alla punta della prova CPT). Tali correlazioni sono tuttavia poco affidabili e devono essere tarate localmente, fatto per cui qualsiasi riferimento tra N_{SPT} e Vs è stato eliminato dalle NTC 2018.

DEFINIZIONE VELOCITA' ONDE DI TAGLIO (Vs)



Ciononostante le correlazioni geotecniche con le Vs costituiscono un riferimento di massima in assenza di indagini specifiche di tipo diretto.

Le principali correlazioni sono di tipo esponenziale con i coefficienti a e b variabili in funzione del tipo di terreno) e valide per tutti i tipi di terreno:

$$V_s = a \times N_{SPT}^b$$

$$V_s = 82,1 \times N_{SPT}^{0,35} \quad \text{Ohta e Goto(1978)}$$

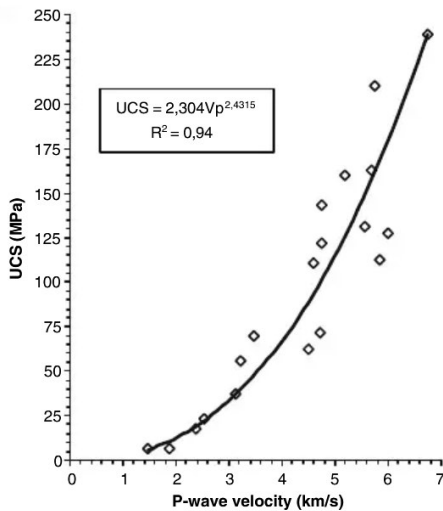
$$V_s = 93,7 \times N_{SPT}^{0,31} \quad \text{Imai e Tonouchi (1982)}$$

$$V_s = 20,0 \times N_{SPT}^{0,85} \quad \text{Jafari et al (1982)}$$

In tutti i casi le correlazioni tra le Vs e i parametri dinamici e geotecnici sono da utilizzare con cautela.

Correlazioni UCS– Vp

In letteratura esistono diverse correlazioni tra la resistenza alla compressione uniassiale e la velocità di onde di compressione indotte in laboratorio con ultrasuoni. I vari tipi di test sono standardizzati come suggerito dalla Society for Rock Mechanics and Rock Engineering (ISRM). Esistono diversi autori che hanno fornito delle correlazioni tra le Vp e la resistenza alla compressione uniassiale in differenti condizioni di saturazione.



La relazione che fornisce una buona correlazione in condizioni *dry* per terreni di tipo arenaceo (Kiliç, A.; Teymen, A. *Determination of mechanical properties of rocks using simple methods, 2008*) è:

$$UCS = 2,304 \times V_p^{2,4315}$$

4 PROSPEZIONE GEOELETRICA

Nell'area di posizionamento della pala eolica EST04, in adiacenza allo stendimento MASW3, è stata eseguita anche una prospezione geoelettrica. La numerazione dei picchetti segue quella dei geofoni (P1 con G1 e P24 con G24).

La tecnica adottata nello studio ha previsto l'utilizzo di una metodologia attiva (con energizzazione del terreno) di tipo geoelettrico. La strumentazione utilizzata è stata quella di acquisizione automatica tramite sistema multielettrodo ARES della GF Instruments. I dati acquisiti in campagna sono stati rielaborati attraverso software particolari che consentono di passare dalla resistività apparente a quella reale, con successiva associazione di certi range di resistività ai vari litotipi in modo da ottenere così una modellizzazione geologica del settore.

4.1 MISURE DI RESISTIVITÀ

Il rilievo geofisico è stato eseguito mediante un georesistivimetro ARES capace di apprezzare fino al centesimo di mV e di mA. La tecnica consiste nell'immettere corrente continua (I) nel terreno attraverso degli



elettrodi metallici e nel misurarne la differenza di potenziale (ΔV) grazie all'utilizzo di picchetti in acciaio. Si risale così alla resistività apparente:

$$\rho_a = \frac{K \Delta V}{I}$$

dove K è la costante geometrica del dispositivo quadripolare e dipende soltanto dalle distanze interelettrodiche.

Tale tecnica permette di visualizzare l'andamento in profondità della resistività e della caricabilità, apparente e reale.

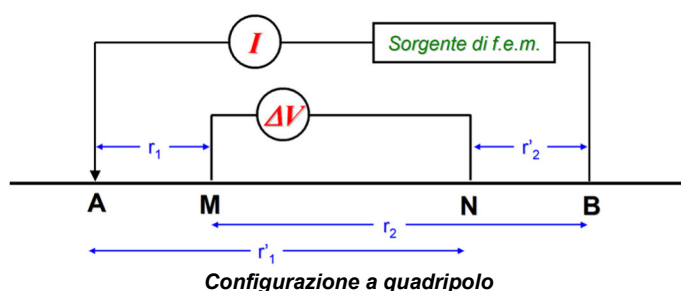
Il metodo della resistività si basa sull'immissione artificiale nel terreno di una determinata quantità di corrente continua attraverso due elettrodi in contatto con il terreno e collegati ad un generatore. Misurando la differenza di potenziale ai capi di un'altra coppia di elettrodi è possibile conoscere la resistività apparente del mezzo.

L'andamento del flusso di corrente viene determinato misurando le differenze di potenziale in diversi punti sulla superficie del terreno. Per un mezzo omogeneo ed isotropo, nota la corrente I (misurata in Ampere) e misurata la differenza di potenziale ΔV (misurata in Volt), attraverso la Legge di Ohm è possibile ricavare i valori di resistività apparente, utilizzando la relazione:

$$\Delta V = \rho \frac{1}{k} I$$

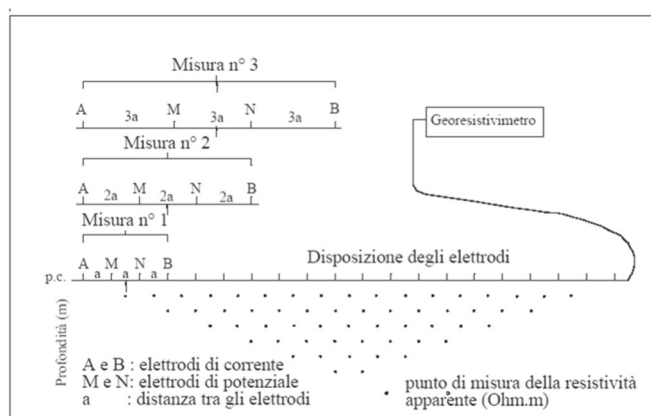
dove con ρ si indica la resistività ($\Omega \text{ m}$) e con k il fattore geometrico (m), che dipende dalla posizione reciproca degli elettrodi. Poiché il terreno non è un mezzo omogeneo ed isotropo ciò che viene ricavata è detta resistività apparente.

Per le misure di resistività elettrica si utilizza uno strumento multielettrodo, il georesistivimetro, in grado di energizzare il terreno attraverso due elettrodi di corrente A e B e misurare la differenza di potenziale ai capi di altri due elettrodi M e N: questa configurazione è detta quadripolo.



Variando la posizione delle coppie di elettrodi di corrente e di potenziale si realizza un'indagine che permette di caratterizzare le proprietà elettriche del sottosuolo a diverse profondità e con differenti risoluzioni spaziali. Per evitare continui riposizionamenti degli elettrodi, i moderni strumenti, come quello utilizzato durante il rilievo in questione, consentono di gestire l'energizzazione e l'acquisizione mediante stendimenti multielettrodo.

In particolare, il dispositivo dipolare che è stato utilizzato per l'indagine geoelettrica oggetto della presente indagine è quella di Schlumbergere e del dipolo-dipolo. La tecnica della geoelettrica dipolare di superficie consiste nella realizzazione di un'immagine 2D di estremo dettaglio del comportamento areale della resistività elettrica lungo il piano della sezione verticale passante per i profili scelti per la prospezione.



Stendimento multielettrodo

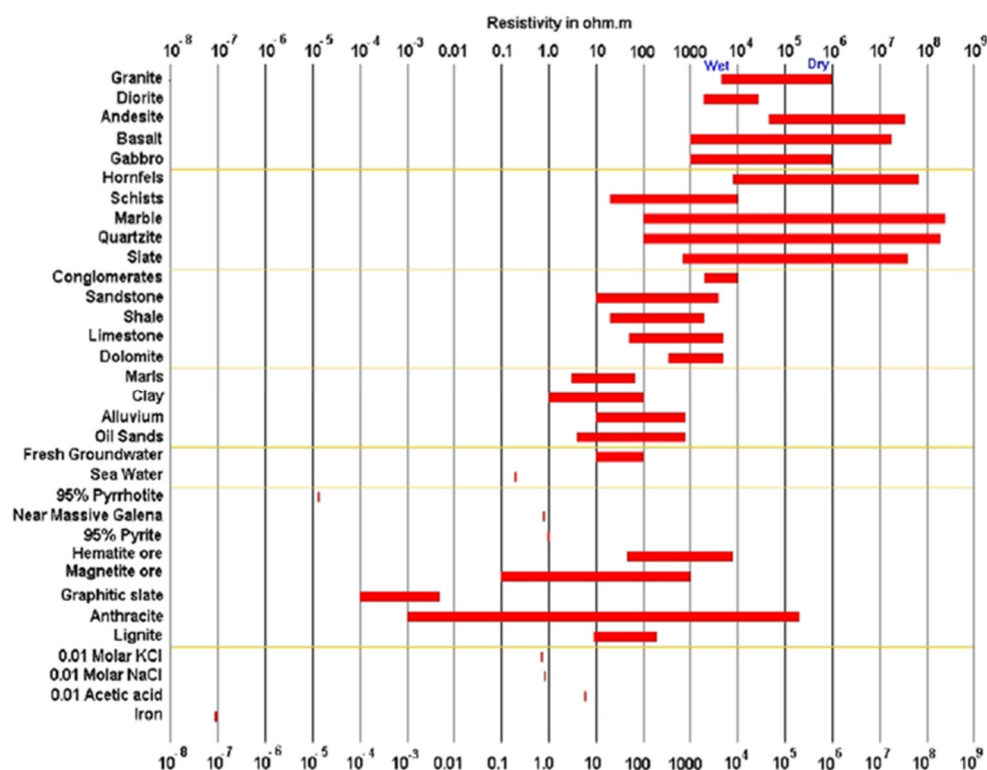
INDAGINI GEOFISICHE

PROGETTO DI UN PARCO EOLICO DA REALIZZARSI ALL'INTERNO DEL TERRITORIO COMUNALE DI ESCALAPLANO (SU) E ESTERZILI (SU)

La procedura tomografica di campagna consiste nell'eseguire vari transetti lungo il tracciato, ciascuno dei quali corrisponde ad un'assegnata posizione di uno dei due dipoli lungo il profilo, che viene mantenuto fisso, mentre l'altro dipolo si allontana progressivamente da questo lungo il medesimo profilo, assegnando valori crescenti ad n (1, 2,N).

Le resistività apparenti, distribuite nei punti della griglia che si viene a formare come conseguenza delle diverse disposizioni mutue dei due dipoli, vengono successivamente sottoposte ad una valutazione comparativa, che si concretizza nel tracciamento di una famiglia di isolinee di resistività apparente. Il quadro d'insieme che ne deriva, ulteriormente rifinito con l'uso di una scala di colori o di grigi o con altri mezzi di contrasto tra settori contigui, rappresenta di fatto una pseudo-sezione del sottosuolo lungo il profilo scelto.

Obiettivo delle indagini geoelettriche è la ricostruzione di modelli di resistività del sottosuolo partendo da misure di resistività apparente. Oltre alle inevitabili anisotropie e disomogeneità del terreno, che impediscono una ricostruzione univoca del modello geometrico, è necessario ricordare che la resistività dipende da diversi fattori quali porosità, presenza di fluidi, composizione mineralogica, grado di fratturazione, grado di saturazione etc. In particolare, la resistività delle rocce è sempre maggiore rispetto a quella dell'acqua nei pori, è minima in corrispondenza del grado di saturazione massimo ed è tanto minore quanto maggiore è la porosità. Tutti questi elementi contribuiscono ad una grande variabilità di valori anche per singole classi di rocce o terreni.



Intervalli di resistività per rocce, suoli e minerali

4.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Per l'esecuzione delle misure geoelettriche di cui si discute è stato utilizzato un georesistivimetro monocanale realizzato dalla ditta GF Instruments mod. ARES G4, alimentato con batteria al piombo ricaricabile.

Questo strumento è stato progettato per effettuare una serie completa di stendimenti geoelettrici: sondaggi elettrici verticali, profili di resistività, misure multi-elettrodo per tomografie elettriche 2D e 3D, misure di polarizzazione indotta e di potenziali spontanei.

Esso è costituito dall'apparato di energizzazione (immette corrente nel terreno attraverso gli elettrodi A e B), e dall'apparato di ricezione (misura la differenza di potenziale tra gli elettrodi di tensione M e N); racchiude, infatti, tre unità principali: trasmettitore, ricevitore e microprocessore.

Il trasmettitore, isolato elettricamente, è costituito da un generatore di tensione in continua, provvisto di commutatore automatico della polarità, per l'invio nel sottosuolo, tramite gli elettrodi del dipolo energizzante, di un flusso di corrente continua la cui intensità può variare fino a raggiungere un'intensità massima di 2.0 A ed un voltaggio compreso tra 10 e 550 V con una potenza massima di 300 W.

L'Ares G4 viene collegato ad un commutatore con cui è possibile programmare la gestione automatica degli elettrodi dello stendimento, ottenendo un elevato numero di combinazioni tra gli elettrodi nonché un notevole risparmio di tempo.

Al cavo multielettrodico del georesistivimetro sono collegati contemporaneamente tutti gli elettrodi attraverso appositi connettori. In base all'array prescelto, l'unità *switch* (commutatore) seleziona le coppie di elettrodi da energizzare.

La durata della fase di energizzazione, ossia di immissione di corrente nel terreno, è stata determinata nel corso della misura in base al rapporto segnale-rumore caratteristico del sito. Il ricevitore è costituito da un millivoltmetro digitale collegato a un microprocessore, che memorizza i valori di tensione ai capi degli elettrodi del dipolo di misura con un passo di campionamento regolare e tale da rientrare un numero intero di volte nel ciclo completo di un'onda di corrente. Alla fine di ogni ciclo, inoltre, un software di esercizio fornisce il valore della resistenza (visualizzato su un display digitale in Ohm·m) come rapporto tra la media di tutte le stime della tensione di picco, riferite ai cicli di corrente via via susseguirsi, e l'intensità della corrente preselezionata.

È opportuno qui evidenziare che la procedura computerizzata appena descritta, detta *stacking* mira ad isolare il segnale utile di tensione, ovvero il segnale direttamente collegato alla corrente di energizzazione, mediante il processo di rimozione immediata del fattore di disturbo stazionario (generato da fenomeni di polarizzazione spontanea), e di abbattimento progressivo di quello casuale (provocato da sorgenti naturali e/o artificiali spurie di vario genere).

Il primo obiettivo si raggiunge facilmente grazie all'inversione della polarità del flusso di corrente continua nel sottosuolo, cioè mediante l'invio di onde quadre di corrente.

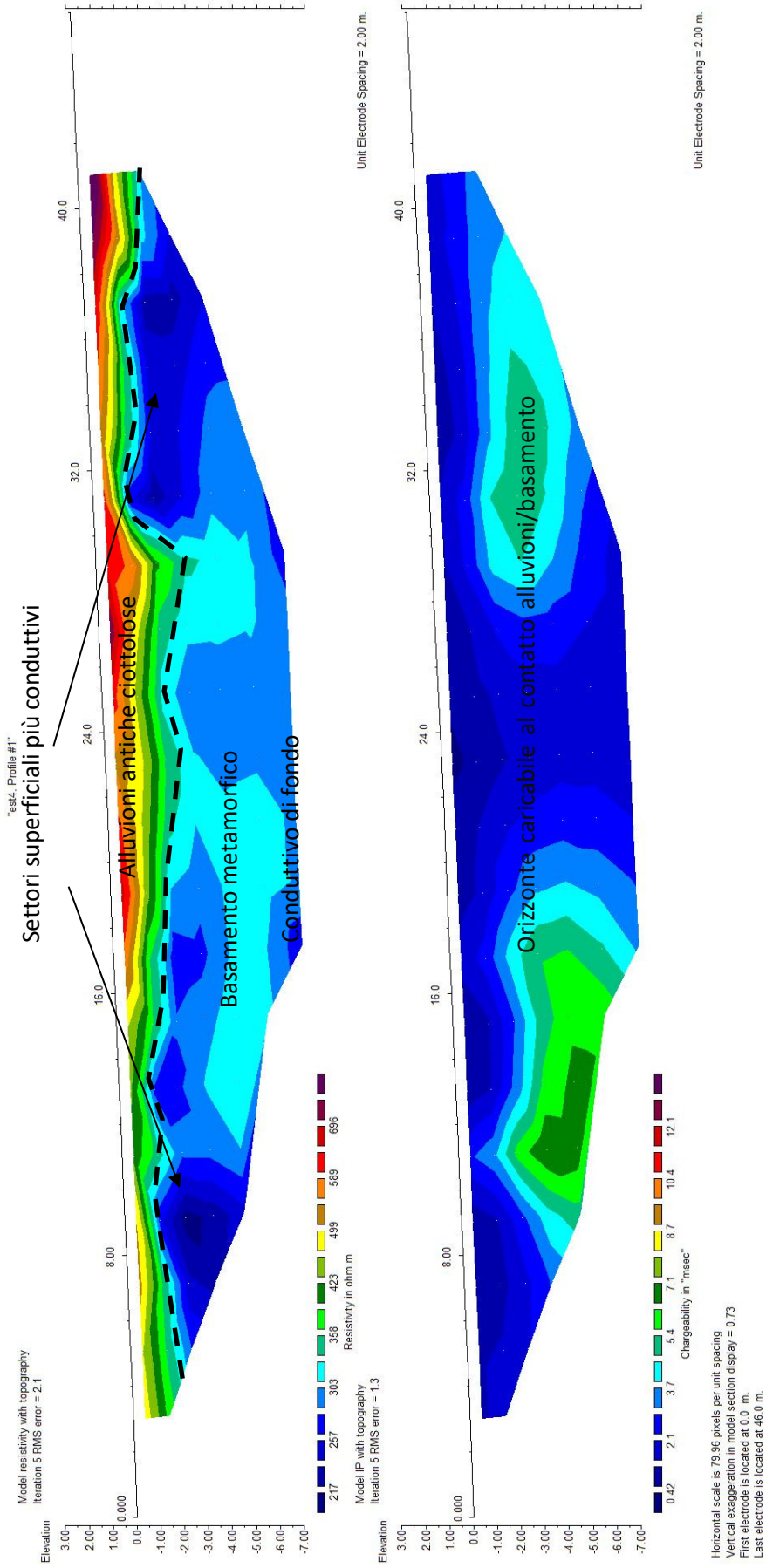
Il secondo obiettivo, invece, viene raggiunto tramite quella proprietà dei processi stocastici che afferma che la somma di m elementi di un rumore casuale comunque selezionati ne attenua la portata rispetto ad un segnale coerente di un fattore pari alla radice quadrata di m . La scelta del numero di cicli da utilizzare è legata all'entità del disturbo: quanto più esso è forte tanto maggiore deve essere il numero di cicli. Lo strumento utilizzato è dotato di un software interno che regola automaticamente il numero di cicli di misura sulla base delle impostazioni dell'operatore, finché non viene raggiunto un segnale ottimale. Per la Tomografia Geoelettrica sono stati utilizzati 24 elettrodi, con passo pari a 2,0 metri, lunghezza totale 46 m, collegati fra loro da un cavo multipolare schermato e gestito dal commutatore automatico comandato dallo strumento di misura.

4.3 CARATTERISTICHE DI RESISTIVITÀ

L'esame della sezione di resistività con disposizione Schlumberger e dipolo-dipolo definisce l'andamento delle caratteristiche elettriche con la profondità. Pur considerando le differenze assolute nei valori di resistività misurate con le differenti disposizioni elettrodiche, si può tentare di attribuire un range di resistività ad ogni litotipo:

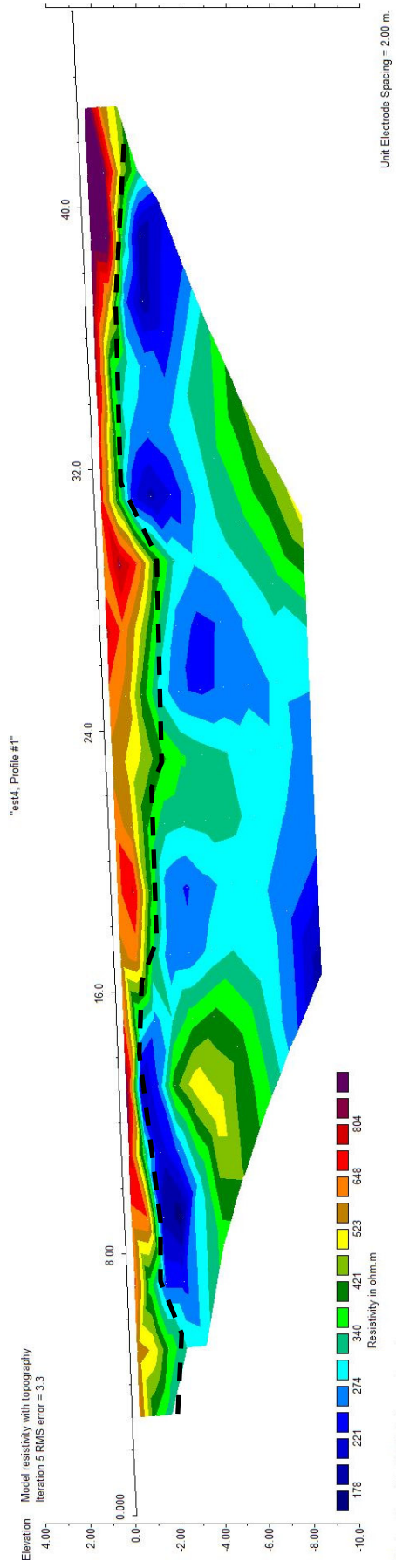
- Tipo 1 : la resistività reale ρ si colloca su valori elevati compresi tra a 300-400 ohm x m e 800 ohmxm; caratterizza i terreni alluvionali ciottolosi superficiali, caricabilità bassa inferiore a 0.5-1.0 msec; tale tipo elettrico si associa con terreni privi di circolazione idrica; lo spessore medio si colloca attorno ai 2m;
- Tipo 2 : caratterizza i terreni umidi presenti sotto il tipo elettrico 1; in questo tipo di elettrostrato ρ si colloca su valori compresi tra 170 e 220 ohmxm, caricabilità decisamente maggiore del tipo 1, con valori tra 2 e 7 msec; valori di resistività simili possono essere interpretabili con terreni metamorfici molto alterati e argillificati; considerato che valori di resistività simili non sono in genere associati a saturazione dei terreni (in genere valori di terreni saturi sono inferiori a 60-80 ohmxm circa), non si esclude nei tratti più conduttivi (progressive 8 m e 32-44 m) qualche fenomeno di umidità al contatto tra alluvioni antiche della F. di Ussana e basamento paleozoico.
- Tipo 3 : in questo tipo di elettrostrato ρ si colloca approssimativamente su valori compresi tra 250 e 500 ohmxm; rappresenta l'unità geoelettrica del basamento metamorfico.

SEZIONE DI RESISTIVITA' (in alto) E CARICABILITA' (in basso) – CONFIGURAZIONE SCHLUMBERGER



Sezione di resistività e caricabilità della sezione geoelettrica con disposizione di Schlumberger. Le aree più conduttive si localizzano in superficie ad una profondità media di circa 2 m; attorno agli 8-9 m le sezioni di resistività Schlumbergere e dipolo-dipolo con disposizione di resistività Schlumbergere e dipolo-dipolo mostrano una diminuzione della resistività

SEZIONE DI RESISTIVITA' - CONFIGURAZIONE DIPOLO DIPOLO



Sezione di resistività secondo la disposizione del dipolo-dipolo: oltre alla fascia conduttiva superficiale presente attorno ai -2 m risulta evidente il conduttivo di fondo attorno ai -8/-9 m di profondità.

5 CONCLUSIONI

Nell'ambito del progetto di *“Realizzazione di un parco eolico da realizzarsi all'interno del territorio comunale di Escalaplano (SU) e Esterzili (SU)”*, su commissione della società Maxxi Engineering Srl, il sottoscritto ha eseguito delle prospezioni geofisiche di tipo sismico volte a valutare la categoria sismica di suolo e la stratigrafia di tre settori su cui dovranno essere localizzate delle pale eoliche.

I siti indagati sono stati tre (in corrispondenza delle pale eoliche in progetto EST03, EST04 e ESC03), in ognuno di questi è stata eseguita una prova sismica MASW mentre nel sito destinato alla EST04 oltre alla MASW è stata realizzata una prospezione tomografica di tipo geoelettrico.

I risultati delle indagini sismiche hanno fornito per le MASW 2 e 3 categorie sismiche di tipo A date le elevate velocità delle onde di taglio ($V_s > 800$ m/s) con presenza del bedrock entro i tre metri di profondità.

La MASW1 ha evidenziato una categoria sismica di tipo B (valutata con fondazione posizionata a piano campagna) e $V_{seq} = 505$ m/s, categoria sismica che passa da B ad A ($V_{s,eq} = 800$ m/s) con fondazione posizionata oltre i 4/5 metri di profondità.

In corrispondenza della MASW3 è stato realizzato un rilievo geoelettrico per valutare la presenza di eventuali circolazioni idriche entro la profondità di circa 6 m utili per la realizzazione dello scavo di predisposizione dell'area di sedime. L'indagine ha evidenziato la presenza di una fascia conduttiva superficiale (profondità media attorno ai -2 m) con valori di resistività non così bassi da far pensare a fenomeni di circolazione idrica degne di nota. La presenza di fenomeni di polarizzazione e caricabilità fa ipotizzare in particolare a fenomeni di argillificazione presenti al di sotto della formazione resistiva (conglomerati terziari). Sembra più verosimile invece la possibilità di circolazione idrica in corrispondenza della fascia indicata come “conduttivo di fondo” attorno agli 8-9 m di profondità.

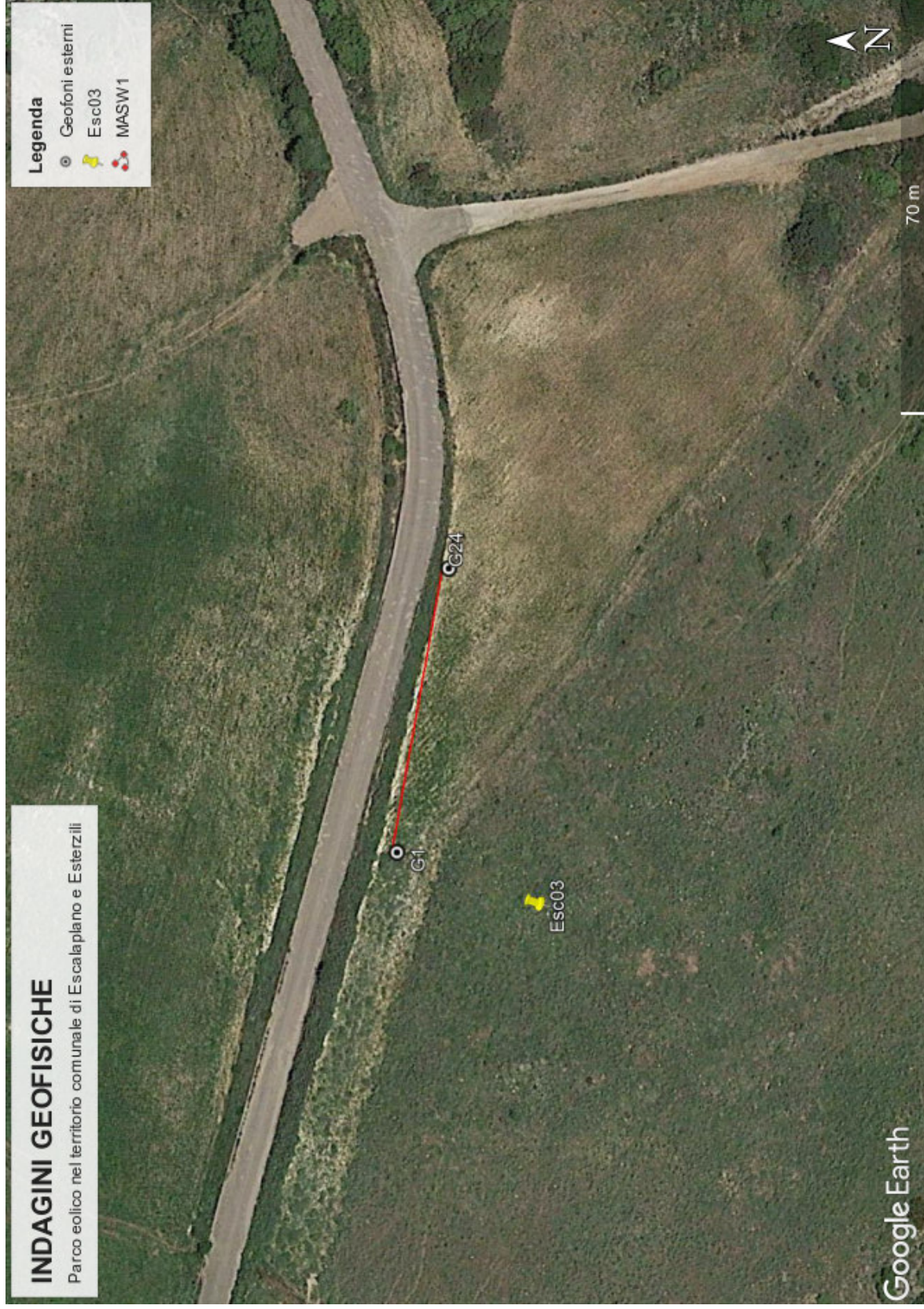
IL PROFESSIONISTA

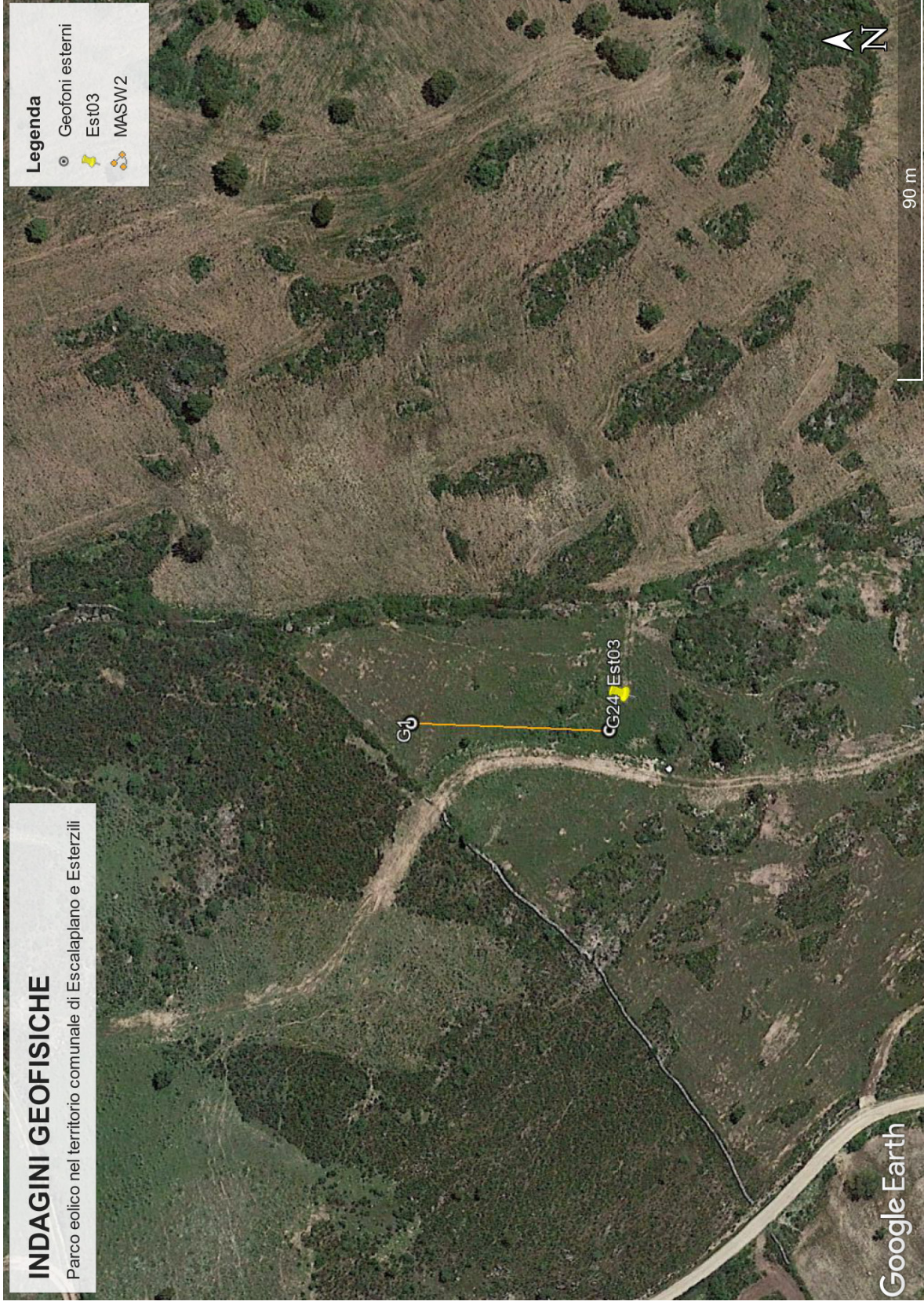
Allegati

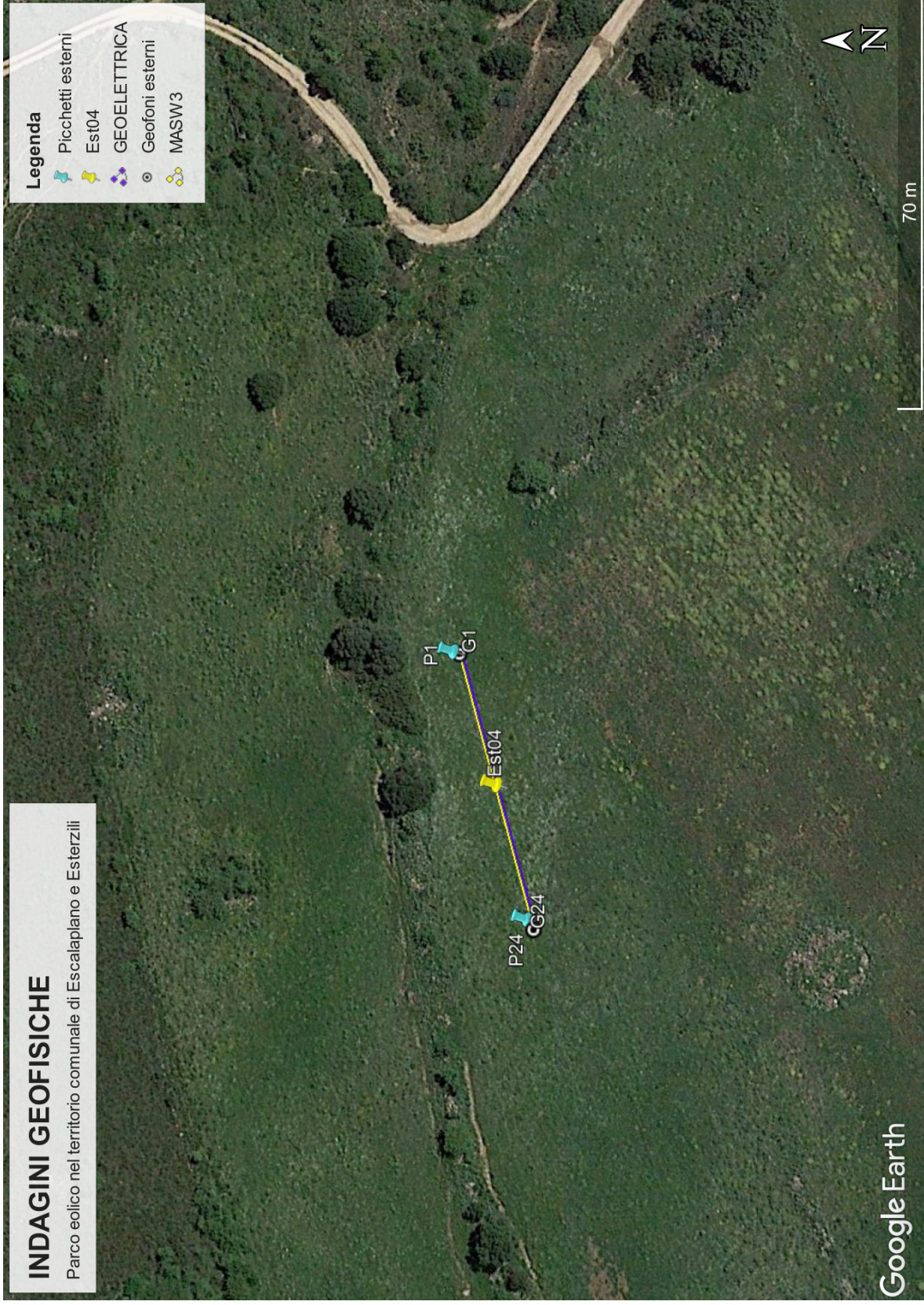
Localizzazione indagini

Tabelle classificazione sito

Documentazione fotografica







CLASSIFICAZIONE DEL SOTTOSUOLO (D.M. 17.01.2018) – **MASW1**

Località	Escalaplano (SU) – Progetto pale eoliche
Metodo indagine	MASW ZVF forza verticale
Strumentazione	Sismografo DAQLink III (Seismic Source U.S.A.), 24 canali, 24 bits
Geometria stendimento	24 geofoni interasse 2,0 m - sorgente a -2,0 m da G1

La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{s,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione:

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

Sulla base del valore calcolato di V_s vengono identificate 5 classi, A, B, C, D ed E alle quali corrispondono un differente spettro di risposta elastico. Lo schema indicativo di riferimento per la determinazione della classe del sito è il seguente:

Categorie**Caratteristiche della superficie topografica**

- | | |
|---|--|
| 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. |
| B | Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine 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 |
| C | Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine 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. |
| D | Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fine 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. |
| 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. |

I dati evidenziano che i terreni indagati rispondano alle caratteristiche di **suolo di tipo B** con **$V_S = 505$ m/s**.

Calcolo del V_s equivalente da NTC 2018

Identificazione della categoria di sottosuolo con l'approccio semplificato

Profondità del piano d'imposta delle fondazioni rispetto al p.c.: **0,00** [m]

Strato [N.]	z [m]	hi [m]	V_s [m/s]
1	1,40	1,40	600,00
2	3,30	1,90	365,00
3	5,70	2,40	454,00
4	8,60	2,90	693,00
5	11,90	3,30	843,00
6	15,70	3,80	1137,00
7	28,60	12,90	1497,00
8	30,00	1,40	1552,00
9			
10			

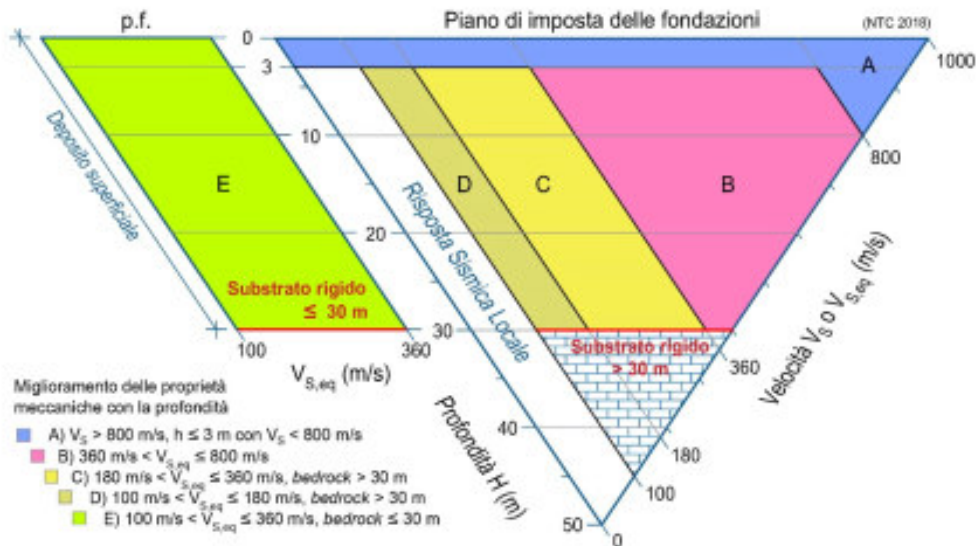
$z_{(cal)}$ [m]	$hi_{(cal)}$ [m]	$hi_{(cal)}/V_s$ [sec]
1,40	1,40	0,00233
3,30	1,90	0,00521
5,70	2,40	0,00529
8,60	2,90	0,00418
11,90	0,00	0,00000
15,70	0,00	0,00000
28,60	0,00	0,00000
30,00	0,00	0,00000

$V_{s,eq} =$ **505,59** [m/s]

Categoria sottosuolo: **B**

Descrizione:

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.



z = profondità sismostrati
 hi = spessori dei sismostrati
 V_s = velocità onde di taglio

$z_{(calc)}$ = profondità calcolata rispetto al p.f.
 $hi_{(calc)}$ = spessori calcolati
 $V_{s,eq}$ = velocità equivalente da NTC 2018

CLASSIFICAZIONE DEL SOTTOSUOLO (D.M. 17.01.2018) – **MASW2**

Località	Esterzili (SU) – Progetto pale eoliche
Metodo indagine	MASW ZVF forza verticale
Strumentazione	Sismografo DAQLink III (Seismic Source U.S.A.), 24 canali, 24 bits
Geometria stendimento	24 geofoni interasse 2,0 m - sorgente a -2,0 m da G1

La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{S,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione:

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

Sulla base del valore calcolato di V_S vengono identificate 5 classi, A, B, C, D ed E alle quali corrispondono un differente spettro di risposta elastico. Lo schema indicativo di riferimento per la determinazione della classe del sito è il seguente:

Categorie**Caratteristiche della superficie topografica**

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.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine 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
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine 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.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fine 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.
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.

I dati evidenziano che i terreni indagati rispondano alle caratteristiche di **suolo di tipo A** con **VS >800 m/s**.

Calcolo del V_S equivalente da NTC 2018

Identificazione della categoria di sottosuolo con l'approccio semplificato

Profondità del piano d'imposta delle fondazioni rispetto al p.c.: **0,00** [m]

Strato [N.]	z [m]	hi [m]	V_S [m/s]
1	1,40	1,40	1334,00
2	3,30	1,90	1329,00
3	5,70	2,40	1330,00
4	8,60	2,90	1395,00
5	11,90	3,30	1688,00
6	15,70	3,80	2106,00
7	28,60	12,90	2219,00
8	30,00	1,40	2355,00
9			
10			

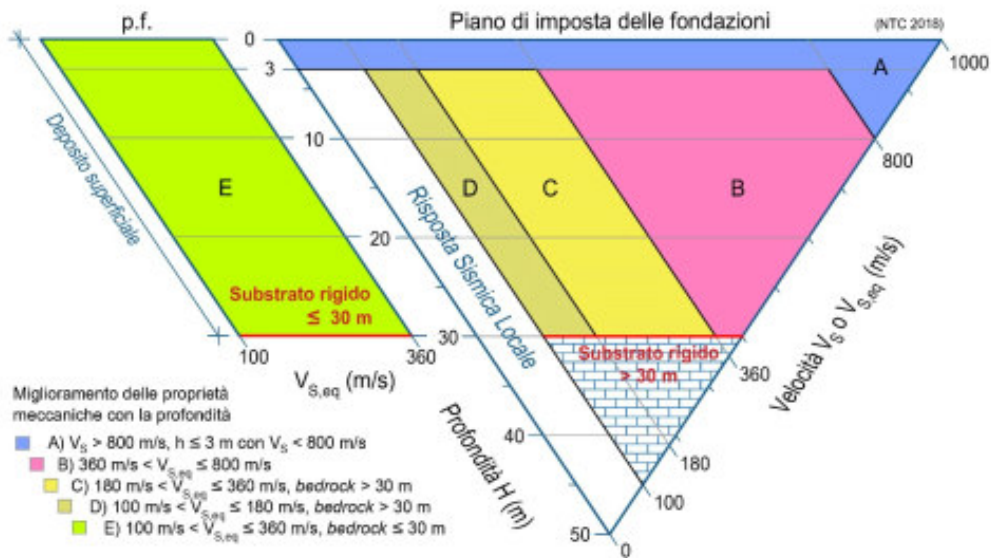
$Z_{(cal)}$ [m]	$hi_{(cal)}$ [m]	$hi_{(cal)}/V_S$ [sec]
1,40		
3,30	0,00	0,00000
5,70	0,00	0,00000
8,60	0,00	0,00000
11,90	0,00	0,00000
15,70	0,00	0,00000
28,60	0,00	0,00000
30,00	0,00	0,00000

$V_{S,eq} = > 800$ [m/s]

Categoria sottosuolo: **A**

Descrizione:

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.



z = profondità sismostrati
 hi = spessori dei sismostrati
 V_S = velocità onde di taglio

$Z_{(calc)}$ = profondità calcolata rispetto al p.f.
 $hi_{(calc)}$ = spessori calcolati
 $V_{S,eq}$ = velocità equivalente da NTC 2018

CLASSIFICAZIONE DEL SOTTOSUOLO (D.M. 17.01.2018) – **MASW3**

Località	Esterzili (SU) – Progetto pale eoliche
Metodo indagine	MASW ZVF forza verticale
Strumentazione	Sismografo DAQLink III (Seismic Source U.S.A.), 24 canali, 24 bits
Geometria stendimento	24 geofoni interasse 2,0 m - sorgente a -2,0 m da G1

La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{s,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione:

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

Sulla base del valore calcolato di V_s vengono identificate 5 classi, A, B, C, D ed E alle quali corrispondono un differente spettro di risposta elastico. Lo schema indicativo di riferimento per la determinazione della classe del sito è il seguente:

Categorie**Caratteristiche della superficie topografica**

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.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine 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
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine 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.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fine 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.
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.

I dati evidenziano che i terreni indagati rispondano alle caratteristiche di **suolo di tipo A** con **$V_S > 800$ m/s**.

Calcolo del V_S equivalente da NTC 2018

Identificazione della categoria di sottosuolo con l'approccio semplificato

Profondità del piano d'imposta delle fondazioni rispetto al p.c.: **0,00** [m]

Strato [N.]	z [m]	hi [m]	V_S [m/s]
1	2,10	2,10	1448,00
2	5,00	2,90	1432,00
3	8,60	3,60	1352,00
4	12,90	4,30	1289,00
5	17,90	5,00	1252,00
6	23,60	5,70	1482,00
7	30,00	6,40	2243,00
8			
9			
10			

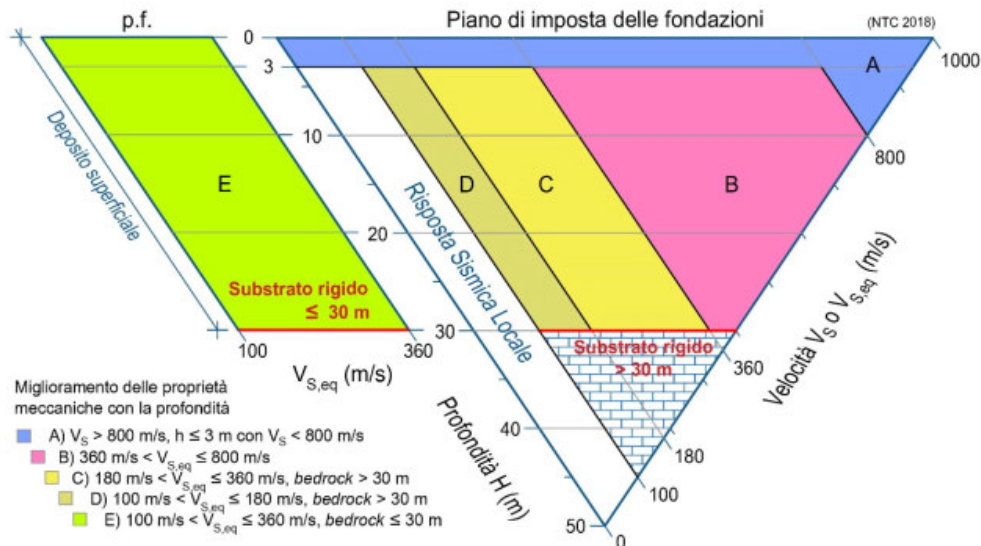
$Z_{(cal)}$ [m]	$hi_{(cal)}$ [m]	$hi_{(cal)}/V_S$ [sec]
2,10		
5,00	0,00	0,00000
8,60	0,00	0,00000
12,90	0,00	0,00000
17,90	0,00	0,00000
23,60	0,00	0,00000
30,00	0,00	0,00000

$V_{S,eq} = > 800$ [m/s]

Categoria sottosuolo: **A**

Descrizione:

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.



z = profondità sismostrati
 hi = spessori dei sismostrati
 V_S = velocità onde di taglio

$Z_{(cal)}$ = profondità calcolata rispetto al p.f.
 $hi_{(cal)}$ = spessori calcolati
 $V_{S,eq}$ = velocità equivalente da NTC 2018

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA

*PROGETTO DI UN PARCO EOLICO DA REALIZZARSI ALL'INTERNO DEL TERRITORIO COMUNALE
DI ESCALAPLANO (SU) E ESTERZILI (SU)*

INDAGINI GEOFISICHE DI TIPO SISMICO E GEOELETTTRICO



Foto 1 Stendimento sismico MASW1



Foto 2 Stendimento sismico MASW2



Foto 3 Vista da ovest dello stendimento sismico MASW3 adiacente allo stendimento geoelettrico



Foto 4 Particolare di picchetto e geofono affiancati per MASW3 e geoelettrica




Foto 5 Evidenza del DISTO per l'acquisizione delle quote relative dei picchetti per le correzioni topografiche



3E Ingegneria S.r.l.

Amistade - Progetto di un Parco Eolico nei territori dei Comuni di Esterzili e di Escalaplano (SU). - Marzo 2023

ALLEGATO 3: Schede Modello Geotecnico Opere

SCHEDA	ESCALAPLANO	AEROGENERATORE	ESC 01
 <p>Esterzili Escalaplano Posizione 01 39.68554, 9.35037 SP53, Escalaplano SU</p>			
Litologia	Litologia C2.2 – Depositi Carbonatici Marini (Marne, Calcari, Calcari Dolomitici, Calcari Oolitici, Calcari Bioplastici, Calcareniti)		
Morfologia	Pianeggiante e quasi pianeggiante		
Stratigrafia	Suolo di spessore inferiore ad 1 mt. Cappellaccio di alterazione di spessore < di 5 mt. Litologia C2.2		
Parametri	Str. 1 Calcari Litologia C2.2	Str.4 Calcari Litologia C2.2	
RMR	47	55	
C (KPa)	230	270	
Φ (°)	28,5	32,5	


MASW 1

Categoria sismica di tipo B (valutata con fondazione posizionata a piano campagna) e $V_{seq}=505$ m/s

SCHEDA	ESCALAPLANO	AEROGENERATORE	ESC 02
 <p>Esterzili Escalaplano Posizione esc02 39.68768, 9.36065 08043 Escalaplano SU</p>			
Litologia	Litologia C2.2 – Depositi Carbonatici Marini (Marne, Calcari, Calcari Dolomitici, Calcari Oolitici, Calcari Bioplastici, Calcareniti)		
Morfologia	Pianeggiante e quasi pianeggiante		
Stratigrafia	Suolo di spessore inferiore ad 1 mt. Cappellaccio di alterazione di spessore < di 5 mt. Litologia C2.2		
Parametri	Str. 1 Calcari Litologia C2.2	Str.4 Calcari Litologia C2.2	
RMR	47	55	
C (KPa)	230	270	
Φ (°)	28,5	32,5	


MASW 1

Categoria sismica di tipo B (valutata con fondazione posizionata a piano campagna) e $V_{seq}=505$ m/s

SCHEDA	ESCALAPLANO	AEROGENERATORE	ESC 03
 <p>Esterzili Escalaplano2 Posizione_esc3 39.69186,9.37178 Strada senza nome, 08037 SU</p>			
Litologia	Litologia C2.2 – Depositi Carbonatici Marini (Marne, Calcari, Calcari Dolomitici, Calcari Oolitici, Calcari Bioplastici, Calcareniti)		
Morfologia	Pianeggiante o quasi pianeggiante		
Stratigrafia	Suolo di spessore inferiore ad 1 mt. Cappellaccio di alterazione di spessore < di 5 mt. Litologia C2.2		
Parametri	Str. 1 Calcari Litologia C2.2	Str.4 Calcari Litologia C2.2	
RMR	47	55	
C (KPa)	230	270	
Φ (°)	28,5	32,5	


MASW 1

Categoria sismica di tipo B (valutata con fondazione posizionata a piano campagna) e $V_{seq}=505$ m/s

SCHEDA	ESCALAPLANO	AEROGENERATORE	ESC 04
 <p data-bbox="120 846 581 930">Esterzili Escalaplano2 39.68674, 9.37389 Strada senza nome, 08043 Escalaplano SU</p>			
Litologia	Litologia C2.2 – Depositi Carbonatici Marini (Marne, Calcari, Calcari Dolomitici, Calcari Oolitici, Calcari Bioplastici, Calcareniti)		
Morfologia	Pianeggiante o quasi pianeggiante		
Stratigrafia	Suolo di spessore inferiore ad 1 mt. Cappellaccio di alterazione di spessore < di 5 mt. Litologia C2.2		
Parametri	Str. 1 Calcari Litologia C2.2	Str.4 Calcari Litologia C2.2	
RMR	47	55	
C (KPa)	230	270	
Φ (°)	28,5	32,5	

MASW 1

Categoria sismica di tipo B (valutata con fondazione posizionata a piano campagna) e $V_{seq}=505$ m/s

SCHEDA	ESCALAPLANO	AEROGENERATORE	ESC 05
 <p>Esterzili Escalaplano 39.6829, 9.36859 08043 Escalaplano SU</p>			
Litologia	Litologia C2.2 – Depositi Carbonatici Marini (Marne, Calcari, Calcari Dolomitici, Calcari Oolitici, Calcari Bioplastici, Calcareniti)		
Morfologia	Pianeggiante o quasi pianeggiante		
Stratigrafia	Suolo di spessore inferiore ad 1 mt. Cappellaccio di alterazione di spessore < di 5 mt. Litologia C2.2		
Parametri	Str. 1 Calcari Litologia C2.2	Str.4 Calcari Litologia C2.2	
RMR	47	55	
C (KPa)	230	270	
Φ (°)	28,5	32,5	

MASW 1

Categoria sismica di tipo B (valutata con fondazione posizionata a piano campagna) e $V_{seq}=505$ m/s

SCHEDA	ESCALAPLANO	AEROGENERATORE	ESC 06
Litologia	Litologia C2.2 – Depositi Carbonatici Marini (Marne, Calcari, Calcari Dolomitici, Calcari Oolitici, Calcari Bioplastici, Calcareniti)		
Morfologia	Pianeggiante o quasi pianeggiante		
Stratigrafia	Suolo di spessore inferiore ad 1 mt. Cappellaccio di alterazione di spessore < di 5 mt. Litologia C2.2		
Parametri	Str. 1 Calcari Litologia C2.2	Str.4 Calcari Litologia C2.2	
RMR	47	55	
C (KPa)	230	270	
Φ (°)	28,5	32,5	

MASW 1

Categoria sismica di tipo B (valutata con fondazione posizionata a piano campagna) e $V_{seq}=505$ m/s

SCHEDA	ESCALAPLANO	AEROGENERATORE	ESC 07
---------------	--------------------	-----------------------	---------------



Esterzili Escalaplano
 Esc07
 39 67686 9 36027
 08043 Escalaplano SU

Litologia	Litologia C2.2 – Depositi Carbonatici Marini (Marne, Calcari, Calcari Dolomitici, Calcari Oolitici, Calcari Bioplastici, Calcareniti)	
Morfologia	Pianeggiante e quasi pianeggiante	
Stratigrafia	Suolo di spessore inferiore ad 1 mt. Cappellaccio di alterazione di spessore < di 5 mt. Litologia C2.2	
Parametri	Str. 1 Calcari Litologia C2.2	Str.4 Calcari Litologia C2.2
RMR	47	55
C (KPa)	230	270
Φ (°)	28,5	32,5

MASW 1
 Categoria sismica di tipo B (valutata con fondazione posizionata a piano campagna) e Vseq=505 m/s

SCHEDA	ESCALAPLANO	AEROGENERATORE	ESC 08
---------------	--------------------	-----------------------	---------------



Esterzili Escalaplano
39 67725, 9 37156
08043 Escalaplano SU

Litologia	Litologia C2.2 – Depositi Carbonatici Marini (Marne, Calcari, Calcari Dolomitici, Calcari Oolitici, Calcari Bioplastici, Calcareniti)	
Morfologia	Pianeggiante e quasi pianeggiante	
Stratigrafia	Suolo di spessore inferiore ad 1 mt. Cappellaccio di alterazione di spessore < di 5 mt. Litologia C2.2	
Parametri	Str. 1 Calcari Litologia C2.2	Str.4 Calcari Litologia C2.2
RMR	47	55
C (KPa)	230	270
Φ (°)	28,5	32,5

MASW 1

Categoria sismica di tipo B (valutata con fondazione posizionata a piano campagna) e $V_{seq}=505$ m/s

SCHEDA	ESCALAPLANO	AEROGENERATORE	ESC 09
Litologia	Litologia C2.2 – Depositi Carbonatici Marini (Marne, Calcari, Calcari Dolomitici, Calcari Oolitici, Calcari Bioplastici, Calcareniti)		
Morfologia	Pianeggiante e quasi pianeggiante		
Stratigrafia	Suolo di spessore inferiore ad 1 mt. Cappellaccio di alterazione di spessore < di 5 mt. Litologia C2.2		
Parametri	Str. 1 Calcari Litologia C2.2	Str.4 Calcari Litologia C2.2	
RMR	47	55	
C (KPa)	230	270	
Φ (°)	28,5	32,5	

MASW 1

Categoria sismica di tipo B (valutata con fondazione posizionata a piano campagna) e $V_{seq}=505$ m/s

SCHEDA	ESCALAPLANO	AEROGENERATORE	ESC 10
---------------	--------------------	-----------------------	---------------



Litologia	Litologia C2.2 – Depositi Carbonatici Marini (Marne, Calcari, Calcari Dolomitici, Calcari Oolitici, Calcari Bioplastici, Calcareniti)	
Morfologia	Pianeggiante e quasi pianeggiante	
Stratigrafia	Suolo di spessore inferiore ad 1 mt. Cappellaccio di alterazione di spessore < di 5 mt. Litologia C2.2	
Parametri	Str. 1 Calcari Litologia C2.2	Str.4 Calcari Litologia C2.2
RMR	47	55
C (KPa)	230	270
Φ (°)	28,5	32,5


MASW 1

Categoria sismica di tipo B (valutata con fondazione posizionata a piano campagna) e $V_{seq}=505$ m/s

SCHEDA	ESCALAPLANO	AEROGENERATORE	ESC 11
			
Litologia	Litologia C2.2 – Depositi Carbonatici Marini (Marne, Calcari, Calcari Dolomitici, Calcari Oolitici, Calcari Bioplastici, Calcareniti)		
Morfologia	Pianeggiante o quasi pianeggiante		
Stratigrafia	Suolo di spessore inferiore ad 1 mt. Cappellaccio di alterazione di spessore < di 5 mt. Litologia C2.2		
Parametri	Str. 1 Calcari Litologia C2.2	Str.4 Calcari Litologia C2.2	
RMR	47	55	
C (KPa)	230	270	
Φ (°)	28,5	32,5	

MASW 1

Categoria sismica di tipo B (valutata con fondazione posizionata a piano campagna) e $V_{seq}=505$ m/s

SCHEDA	ESCALAPLANO	AEROGENERATORE	ESC 12
			
<p>Esterzili Escalaplano 39.67092, 9.37177 SP53, 08043 Escalaplano SU</p>			
Litologia	Litologia C2.2 – Depositi Carbonatici Marini (Marne, Calcari, Calcari Dolomitici, Calcari Oolitici, Calcari Bioplastici, Calcareniti)		
Morfologia	Pianeggiante o quasi pianeggiante		
Stratigrafia	Suolo di spessore inferiore ad 1 mt. Cappellaccio di alterazione di spessore < di 5 mt. Litologia C2.2		
Parametri	Str. 1 Calcari Litologia C2.2		Str.4 Calcari Litologia C2.2
RMR	47		55
C (KPa)	230		270
Φ (°)	28,5		32,5


MASW 1

Categoria sismica di tipo B (valutata con fondazione posizionata a piano campagna) e $V_{seq}=505$ m/s

SCHEDA	ESCALAPLANO	AEROGENERATORE	ESC 13
			
Litologia	Litologia C2.2 – Depositi Carbonatici Marini (Marne, Calcari, Calcari Dolomitici, Calcari Oolitici, Calcari Bioplastici, Calcareniti)		
Morfologia	Pendio Lieve		
Stratigrafia	Suolo di spessore inferiore ad 1 mt. Cappellaccio di alterazione di spessore < di 5 mt. Litologia C2.2		
Parametri	Str. 1 Calcari Litologia C2.2	Str.4 Calcari Litologia C2.2	
RMR	47	55	
C (KPa)	230	270	
Φ (°)	28,5	32,5	


MASW 1

Categoria sismica di tipo B (valutata con fondazione posizionata a piano campagna) e $V_{seq}=505$ m/s

SCHEDA	ESCALAPLANO	AEROGENERATORE	ESC 14
 <p>Esterzili Escalaplano 39.66764, 9.3703 SP53, 08043 Escalaplano SU</p>			
Litologia	Litologia C2.2 – Depositi Carbonatici Marini (Marne, Calcari, Calcari Dolomitici, Calcari Oolitici, Calcari Bioplastici, Calcareniti)		
Morfologia	Pianeggiante e quasi pianeggiante		
Stratigrafia	Suolo di spessore inferiore ad 1 mt. Cappellaccio di alterazione di spessore < di 5 mt. Litologia C2.2		
Parametri	Str. 1 Calcari Litologia C2.2	Str.4 Calcari Litologia C2.2	
RMR	47	55	
C (KPa)	230	270	
Φ (°)	28,5	32,5	

MASW 1

Categoria sismica di tipo B (valutata con fondazione posizionata a piano campagna) e $V_{seq}=505$ m/s

SCHEDA	ESTERZILI	AEROGENERATORE	EST 01
 <p>Esterzili Escalaplano3 Posizione est01 39.72607, 9.31182 Strada senza nome, 08030 Esterzili SU</p>			
Litologia	Litologia B1.1 - Metarioliti, Metariodaciti, "Porfiroidi" Auct., Metavulcaniti acide		
Morfologia	Sub pianeggiante		
Stratigrafia	Suolo di spessore inferiore ad 1 mt. Litologia B1.1		
Parametri	Str. 2 Metaepiclastiti Litologia B1.1	Str.3 Metaepiclastiti Litologia B1.1	
RMR	40	52	
C (KPa)	200	260	
Φ (°)	25	31	

MASW 2

Categoria sismica A con $V_{seq} > 800 \text{ m/s}$

SCHEDA	ESTERZILI	AEROGENERATORE	EST 03
---------------	------------------	-----------------------	---------------




Esterzili Escalaplano3
 Posizione est03
 39.72209, 9.34471
 Strada senza nome, 08030 Esterzili SU

Litologia	Litologia B1.1 - Metarioliti, Metariodaciti, "Porfiroidi" Auct., Metavulcaniti acide	
Morfologia	Aree con forme da aspre a sub pianeggianti.	
Stratigrafia	Suolo di spessore inferiore ad 1 mt. Litologia B1.1	
Parametri	Str. 2 Metaepiclastiti Litologia B1.1	Str.3 Metaepiclastiti Litologia B1.1
RMR	40	52
C (KPa)	200	260
Φ (°)	25	31

MASW 2

Categoria sismica A con $V_{seq} > 800 \text{ m/s}$

SCHEDA	ESTERZILI	AEROGENERATORE	EST 04
 <p>Esterzili Escalaplano2 Posizione est04 39.71169, 9.34419 SP53, 08030 Escalaplano SU</p>			
Litologia	Litologia C1.2 – Depositi terrigeni continentali di conoide e piana alluvionale (ghiaie sabbie, limi, argille) conglomerati, arenarie, siltiti, peliti		
Morfologia	Pianeggiante e sub pianeggiante con depositi		
Stratigrafia	Suolo di spessore inferiore ad 1 mt. Depositi spessore massimo 2 metri (vedi stendimento geoelettrico) Sotto probabile presenza Litologia B1.1 o B2.1		
Parametri	Str. 2 Metaepiclastiti Litologia B1.1	Str.3 Metaepiclastiti Litologia B1.1	
RMR	40	52	
C (KPa)	200	260	
Φ (°)	25	31	

MASW 3
 Geoelettrica 1
 Categoria sismica A con $V_{seq} > 800 \text{ m/s}$ (depositi spessore < a 3 metri)

SCHEDA	ESTERZILI	AEROGENERATORE	EST 05
--------	-----------	----------------	--------




Esterzili Escalaplano3
 Posizione est05
 39.7143, 9.35105
 08030 Esterzili SU


Litologia	Litologia B1.1 - Metarioliti, Metariodaciti, "Porfiroidi" Auct., Metavulcaniti acide	
Morfologia	Pianeggiante e sub pianeggiante	
Stratigrafia	Suolo di spessore inferiore ad 1 mt. Litologia B1.1	
Parametri	Str. 2 Metaepiclastiti Litologia B1.1	Str.3 Metaepiclastiti Litologia B1.1
RMR	40	52
C (KPa)	200	260
□□□□□	25	31

MASW 2


Categoria sismica A con $V_{seq} > 800 \text{ m/s}$

SCHEDA	ESTERZILI	AEROGENERATORE	EST 06
			
Litologia	Litologia C1.2 – Depositi terrigeni continentali di conoide e piana alluvionale (ghiaie sabbie, limi, argille) conglomerati, arenarie, siltiti, peliti		
Morfologia	Pianeggiante e sub pianeggiante		
Stratigrafia	Suolo di spessore inferiore ad 1 mt. Depositi spessore massimo 2 metri (vedi stendimento geoelettrico) Sotto probabile presenza Litologia B1.1 o B2.1		
Parametri	Str. 2 Metaepiclastiti Litologia B1.1	Str.3 Metaepiclastiti Litologia B1.1	
RMR	40	52	
C (KPa)	200	260	
Φ (°)	25	31	

MASW 3
 Geoelettrica 1
 Categoria sismica A con $V_{seq} > 800 \text{ m/s}$ (depositi spessore < a 3 metri)

SCHEDA	ESTERZILI	AEROGENERATORE	EST 07
			
Litologia	Litologia C1.2 – Depositi terrigeni continentali di conoide e piana alluvionale (ghiaie sabbie, limi, argille) conglomerati, arenarie, siltiti, peliti		
Morfologia	Pianeggiante e sub pianeggiante		
Stratigrafia	Suolo di spessore inferiore ad 1 mt. Depositi spessore massimo 2 metri (vedi stendimento geoelettrico) Sotto probabile presenza Litologia B1.1 o B2.1		
Parametri	Str. 2 Metaepiclastiti Litologia B1.1	Str.3 Metaepiclastiti Litologia B1.1	
RMR	40	52	
C (KPa)	200	260	
Φ (°)	25	31	

MASW 3
 Geoelettrica 1
 Categoria sismica A con $V_{seq} > 800 \text{ m/s}$ (depositi spessore < a 3 metri)

SCHEDA	ESTERZILI	AEROGENERATORE	EST 08
			
Litologia	Litologia C1.2 – Depositi terrigeni continentali di conoide e piana alluvionale (ghiaie sabbie, limi, argille) conglomerati, arenarie, siltiti, peliti		
Morfologia	Pianeggiante e sub pianeggiante su depositi		
Stratigrafia	Suolo di spessore inferiore ad 1 mt. Depositi spessore massimo 2 metri (vedi stendimento geoelettrico) Sotto probabile presenza Litologia B1.1 o B2.1		
Parametri	Str. 2 Metaepiclastiti Litologia B1.1	Str.3 Metaepiclastiti Litologia B1.1	
RMR	40	52	
C (KPa)	200	260	
Φ (°)	25	31	

MASW 3

Geoelettrica 1

Categoria sismica A con $V_{seq} > 800 \text{ m/s}$ (depositi spessore < a 3 metri)