



Comune di Nuoro

Regione Sardegna



PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DEL PARCO EOLICO "INTERMONTES" NEL TERRITORIO DEL COMUNE DI NUORO PROGETTO DEFINITIVO

PROPONENTE

EDP Renewables Italia Holding s.r.l.

Via Roberto Lepetit 8/10

20124 - Milano

Tel +39 02 669 6966

C.F. e P.IVA IT01832190035



OGGETTO

2 - STUDI GEOLOGICI E GEOTECNICI

RELAZIONE GEOLOGICA E IDROGEOLOGICA

TIMBRI E FIRME

SRIA
s.r.l.

STUDIO ROSSO
INGEGNERI ASSOCIATI

VIA ROSOLINO PILO N. 11 - 10143 - TORINO

VIA IS MAGLIAS N. 178 - 09122 - CAGLIARI

TEL. +39 011 43 77 242

studiorosso@legalmail.it

info@sria.it

www.sria.it

dott. geol. Francesca DEMURTAS

Ordine dei Geologi Regione Sardegna

Posizione n.644

Cod. Fisc. DMR FNC 79S55 E441X



CONSULENZA

Coordinatore e responsabile delle attività:



Studio Gioed

VIA IS MIRRIONIS N. 178 - 09121 - CAGLIARI

Dott. ing. Giorgio Efsio DEMURTAS

CONTROLLO QUALITA'

DESCRIZIONE	EMISSIONE
DATA	GEN/2022
COD. LAVORO	492/SR21
TIPOL. LAVORO	D
SETTORE	G
N. ATTIVITA'	02
TIPOL. ELAB.	RS
TIPOL. DOC.	E
ID ELABORATO	01
VERSIONE	0

REDATTO

geol. Francesca DEMURTAS

CONTROLLATO

ing. Roberto SESENNA

APPROVATO

Dott. ing. Giorgio DEMURTAS

ELABORATO

2.1

INDICE

1. PREMESSA	2
2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE	3
3. QUADRO NORMATIVO DI RIFERIMENTO	4
3.1 PIANO STRALCIO DI ASSETTO IDROGEOLOGICO REGIONALE	4
4. INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO GENERALE	5
4.1 ASSETTO GEOLOGICO DI INQUADRAMENTO.....	5
4.2 CARATTERI TETTONICI E STRUTTURALI GENERALI	5
4.3 INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO	7
5. IDROGEOLOGIA DELL'AREA	9
5.1 SCHEMA DELLA CIRCOLAZIONE IDRICA SUPERFICIALE E SOTTERRANEA	9
5.2 UNITÀ IDROGEOLOGICHE	9
5.3 CARTA IDROGEOLOGICA.....	10
6. CARTA GEOTECNICA	11
6.1 ACCLIVITÀ.....	11
6.2 CLASSIFICAZIONE GEOTECNICA DEI LITOTIPI AFFIORANTI.....	11
7. INDAGINI GEOGNOSTICHE	13
7.1 SONDAGGIO A CAROTAGGIO CONTINUO.....	14
7.2 QUADRO DELLE ANALISI DI LABORATORIO	15
7.3 INDAGINI GEOFISICHE	16
7.3.1 <i>Indagine sismica mediante metodologia MASW</i>	17
7.3.2 <i>Indagine sismica a Rifrazione</i>	19
7.4 CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA DELLA ROCCIA	21
8. MODELLO GEOLOGICO DI RIFERIMENTO	22
9. CONCLUSIONI	24

ALLEGATI

ALLEGATO 1 – Inquadramento sito di intervento su area PAI

ALLEGATO 2 – Relazione sulle indagini geognostiche

1. PREMESSA

La presente relazione geologica supporta il progetto per la realizzazione di un nuovo parco eolico denominato "INTERMONTES", sito nel comune di Nuoro, a nord dell'area industriale di Prato Sardo, composto da 13 aerogeneratori con potenza nominale di 6,0 MW, per una potenza complessiva del parco eolico di 78 MW, e da una sottostazione elettrica di collegamento alla rete elettrica nazionale, prevista in prossimità dell'area industriale di Prato Sardo circa 4,5 km a sud del settore di sviluppo del parco.

Lo studio ha lo scopo di determinare le caratteristiche geologiche, geomorfologiche ed idrogeologiche dei terreni interessati dallo sviluppo del progetto, e di un loro intorno significativo.

L'analisi è stata sviluppata a partire da una verifica dei dati disponibili, di carattere bibliografico e cartografico, come cartografia geologica ufficiale e aerofotogrammetrie, sulla cui base è stato svolto un rilevamento di campagna geologico e geomorfologico, necessario alla definizione dei caratteri geostrutturali generali dell'area, delle superfici di discontinuità e gli aspetti idrogeologici e geotecnici del territorio indagato. Nel corso dei rilievi è stata effettuata una campagna di indagini geognostiche per la ricostruzione stratigrafica del terreno, attraverso l'esecuzione di n. 1 sondaggio a carotaggio continuo, spinto a -10 m dal p.c., e indagini geofisiche (MASW e indagine sismica a rifrazione). Dalle carote di sondaggio sono stati prelevati dei campioni per le analisi di laboratorio utili alla determinazione dei parametri geotecnici dei sedimenti indagati, necessari per le verifiche geotecniche di progetto.

I dati raccolti sono stati restituiti in forma cartografica, utilizzando come base la cartografia tecnica della Regione Sardegna alla scala 1:10.000.

Il settore oggetto di intervento ricade nelle perimetrazioni del PAI (Piano Assetto Idrogeologico) caratterizzato da pericolosità geomorfologica mappate a seguito di studi derivanti dall'applicazione dell'Art. 8 comma 2 delle Norme di Attuazione del P.A.I aggiornate alla data del 31/01/2018.

Si precisa che le indagini geognostiche di seguito descritte sono servite ad una descrizione preliminare delle litologie affioranti; esse dovranno essere necessariamente approfondite, in fase esecutiva, in modo da valutare nel dettaglio le caratteristiche geologiche e geotecniche in corrispondenza di ogni aerogeneratore in progetto.

2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE

L'area in esame è individuata cartograficamente al Foglio 499 sezione I dell'IGM, in scala 1:25.000, nella sezione 499 080 "Nuoro" della cartografia tecnica della Regione Sardegna, in scala 1:10.000, al Foglio 207 "Nuoro" della Carta geologica d'Italia, in scala 1:100.000.

Il territorio in esame ricade in comune di Nuoro, nel settore settentrionale del territorio amministrativo, e si estende su un areale che dal Km 8 della S.P. 41 Nuoro – Benetutti in località "Sa 'e Balia" dove si colloca l'aerogeneratore WGT 01, si sviluppa verso est fino al km 2 della stessa S.P. 41 in località "Janna 'e sa Chida", in corrispondenza della torre WGT 12, e verso sud per circa 4 km, lungo la strada comunale "Intramontes", interessando una fascia altimetrica che va da 590 a 810 m s.l.m. Le torri eoliche si sviluppano principalmente sulla sommità di un esteso altipiano formato da rilievi di origine granitica molto arrotondati e livellati, intersecati da numerosi corsi d'acqua a regime torrentizio, principalmente di primo ordine, che ricalcano le lineazioni principali della zona, e che si sviluppano con direzione principale NE-SW e secondariamente ortogonale ad essa NW-SE.

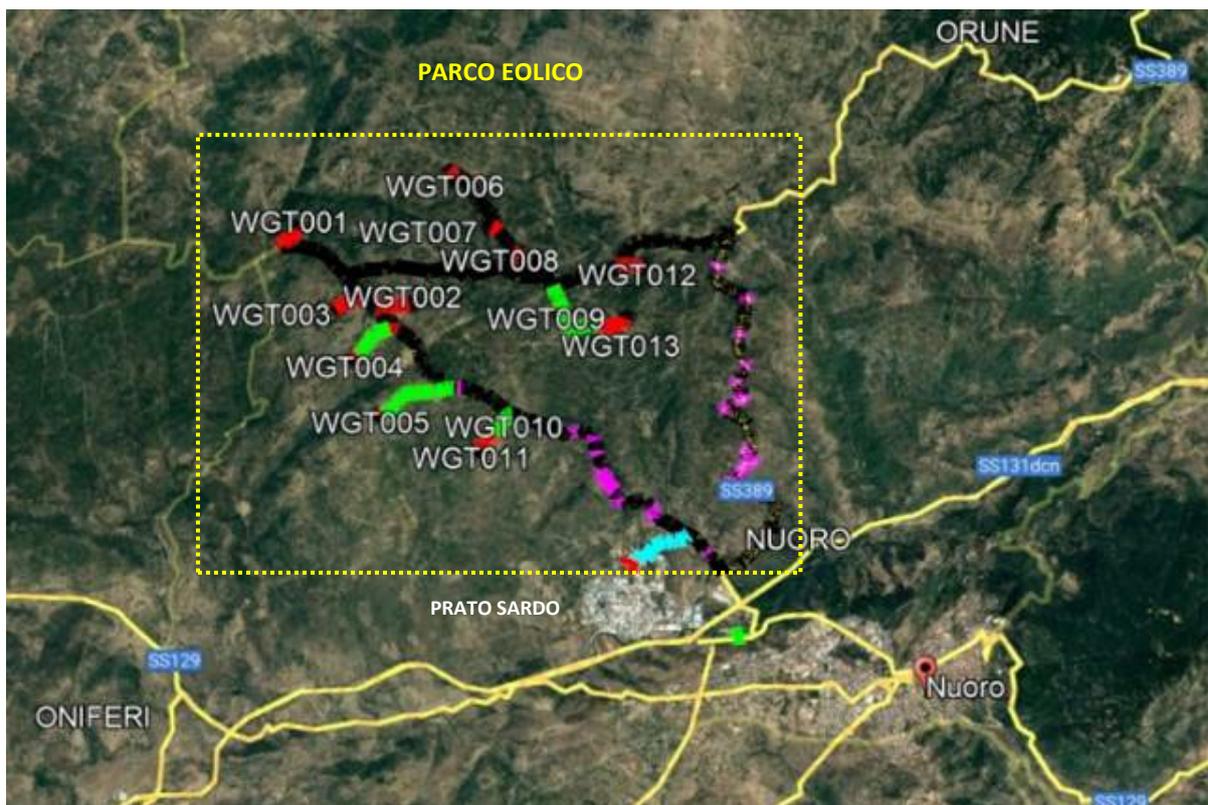


Figura 1 – Ubicazione del Parco Eolico in comune di Nuoro (zona a nord area industriale di Prato Sardo).

3. QUADRO NORMATIVO DI RIFERIMENTO

Lo studio dell'area è stato eseguito a norma di quanto richiesto dal D.M. 17.01.18 Testo Unico "Norme Tecniche per le Costruzioni", ai paragrafi 7.1.1 e 7.2. che individuano le fasi riguardanti la caratterizzazione e modellazione geologica del sito nonché le indagini, la caratterizzazione e modellazione geotecnica. La caratterizzazione e la modellazione geologica del sito consiste nella ricostruzione dei caratteri litologici, stratigrafici, strutturali, idrogeologici, geomorfologici e, più in generale, di pericolosità geologica del territorio.

Il lavoro è stato sviluppato anche con riferimento al Piano Stralcio per l'assetto idrogeologico "Interventi sulla rete idrografica e sui versanti" Legge 18 maggio 1989, n. 183, art. 17, comma 6, ter D.L. 180/98 e ss. mm. ii.

3.1 PIANO STRALCIO DI ASSETTO IDROGEOLOGICO REGIONALE

Alcuni aerogeneratori in progetto ricadono in aree censite dal PAI (Piano Assetto Idrogeologico) della Regione Sardegna, in particolare le piazzole e relative fondazioni degli aerogeneratori WGT 01, WGT 02, WGT 03, WGT 04, WGT 05, WGT 10, WGT 11, WGT 12, WGT 13, sono perimetrate in aree a pericolosità da frana moderata Hg1: "Zone con fenomeni franosi presenti o potenziali marginali".

Dai rilievi eseguiti in loco, la collocazione delle torri eoliche fa sì che non sussistano particolari situazioni di instabilità geomorfologica né in atto né potenziale: la pericolosità da frana censita nel settore è verosimilmente dovuta a incrementi di pendenza e alla presenza di compluvi dove comunque non sono presenti indizi di dinamiche geomorfologiche in corso. La posizione degli aerogeneratori in progetto è stata valutata al fine di prediligere aree pianeggianti che non mostrano alcun elemento di pericolosità geomorfologica apprezzabile, in quanto distanti dai versanti e dai punti di maggior declivio.

Il cavidotto interrato in progetto, che si estende per vari chilometri sfruttando in gran parte la viabilità esistente, interessa areali a pericolosità moderata Hg1 e per alcuni brevi tratti a pericolosità media Hg2, con interferenze al reticolo idrografico ufficiale regionale. Esso, così come da progetto, verrà collocato all'interno dell'attuale percorso stradale, e lungo gli attraversamenti all'interno del cassonetto stradale esistente o eventualmente in banchina, e dovranno in questo caso essere rispettate le prescrizioni previste dal PAI.

Nell'Allegato 1 alla presente relazione è riportato l'inquadramento del progetto sulla cartografia PAI frana, mentre nella tavola "3.2 – Carta della rete idrografica e delle interferenze idrauliche" allegata al progetto sono individuate le interferenze delle opere di progetto con il reticolo idrografico art. 30 ter N.T.A. del PAI e la pericolosità idraulica individuata nel territorio (esterna alle aree di progetto).

4. INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO GENERALE

4.1 ASSETTO GEOLOGICO DI INQUADRAMENTO

Nel territorio la litologia predominante è rappresentata dal "Complesso intrusivo ercinico" e dal sistema filoniano, la cui messa in posto è da ricondursi alle fasi distensive dell'orogenesi ercinica avvenuta nel tardo Paleozoico (Carbonifero sup.- Permiano, \pm 280-300 Ma).

Il complesso granitico intrusivo è rappresentato in prevalenza da granodioriti monzogranitiche e tonaliti granodioritiche a grana medio-grossa, inequigranulari. La continuità litologica è interrotta dal sistema di ammassi e filoni a chimismo sia acido che basico, rappresentati principalmente da porfidi granitici, aplitici e filoni idrotermali a quarzo prevalente. Il loro spessore è variabile da pochi centimetri fino a qualche metro, con estensione longitudinale fino a 500 m.

La messa in posto del complesso granitico intrusivo e i successivi stress tettonici subiti hanno determinato la scomposizione del basamento secondo fratture tettoniche allungate con direzioni preferenziali NE - SW e NNE - SSW, e secondarie ortogonali tra loro NWE - SE e WNW - ESE.

Sulle principali lineazioni tettoniche si è avuta l'impostazione della rete idrografica superficiale in epoca quaternaria, che ha prodotto la profonda erosione del basamento roccioso con il progressivo approfondimento e conseguente formazione di valli strette ad andamento rettilineo che drenano le acque di ruscellamento verso il settore sud occidentale dell'area. La roccia granitica in tutta l'area di sviluppo del parco ed in corrispondenza dell'area di posa della nuova sottostazione in progetto, si presenta per lo più affiorante o sub affiorante, sono presenti in tutta l'area elementi litici isolati, dell'ordine del metro cubo, che mostrano una differente erodibilità ad opera degli agenti esogeni per differenze mineralogiche e petrografiche del basamento roccioso.

Nell'area il Quaternario è rappresentato da una modesta e discontinua copertura detritica eluvio colluviale e di versante, costituita da elementi detritici provenienti dal disfacimento della roccia granitica sottostante, in matrice sabbiosa prevalente, rinvenibili per lo più nelle aree di compluvio, sulla quale si sono sviluppati suoli più o meno evoluti, arricchiti in frazione organica. Il loro spessore è in genere modesto, e varia da pochi cm fino all'ordine del metro nelle zone più depresse del sito.

Lungo i corsi d'acqua sono riconoscibili depositi torrentizi, anche nelle aste tributarie di primo e secondo ordine, che, ove presenti, risultano di modesto spessore e con ciottoli per lo più spigolosi, poco arrotondati, in matrice arenacea spesso cementata.

4.2 CARATTERI TETTONICI E STRUTTURALI GENERALI

L'area, come l'intero territorio isolano, è stata interessata da varie fasi deformative legate a più eventi tettonici che nel corso delle varie epoche hanno profondamente influenzato la morfologia dell'intera regione, conferendole la conformazione attuale.

A livello regionale la fase deformativa più importante che ha definito la morfologia odierna è l'orogenesi ercinica. Essa si è manifestata in due eventi deformativi principali: una prima fase compressiva, avente come

conseguenze un metamorfismo di medio grado dei sedimenti arenacei Paleozoici, esterni all'area in esame e affioranti nel settore più orientale del sito, associato a sistemi di pieghe isoclinali coricate con direzione assiale principale NE-SW, e a locale rottura della placca scistosa e parziale rotazione di zolle. Durante la seconda fase tardo-orogena, caratterizzata da movimenti più distensivi, si è avuta la messa in posto del Complesso intrusivo granitico, affiorante in modo diffuso nell'area in esame, lungo fratture e faglie preesistenti, e riattivazione delle faglie a carattere prevalentemente distensivo con direzione preferenziale E-W e ENE-WSW. Lungo tali direzioni successivamente si sono impostati i filoni a chimismo acido, che pervadono in modo diffuso la grande placca del Complesso scistoso cristallino.

Successivamente alla fase ercinica il territorio dal punto di vista tettonico è stato interessato da una relativa stabilità, interrotta lievemente dall'orogenesi nord appenninica prima e successivamente con l'orogenesi alpina, che hanno coinvolto solo marginalmente il settore regionale in esame: la prima tramite l'attivazione di una debole tettonica trascorrente con faglie orientate NE-SW, mentre la seconda mediante la riattivazione delle fratture N-S e NE - SW già esistenti, con deboli trascorrenze.

Queste fasi deformative hanno portato alla intensa strutturazione della roccia affiorante, la quale si presenta allo stato attuale intensamente fratturata e variamente alterata, che ha determinato la scomposizione della roccia con fratturazioni da poco pervasive a profonde. Lungo i sistemi di frattura presenti, come detto, si sono impostati i corsi d'acqua, che nel settore in esame scorrono per lo più secondo aste di ordine primario e secondario in prevalenza ortogonali tra loro; i rilievi sono caratterizzati da sommità sub-pianeggianti risalenti all'antico spianamento post-ercinico, interrotte da valli profonde e strette, dovute alla profonda attività erosiva dei corsi d'acqua.

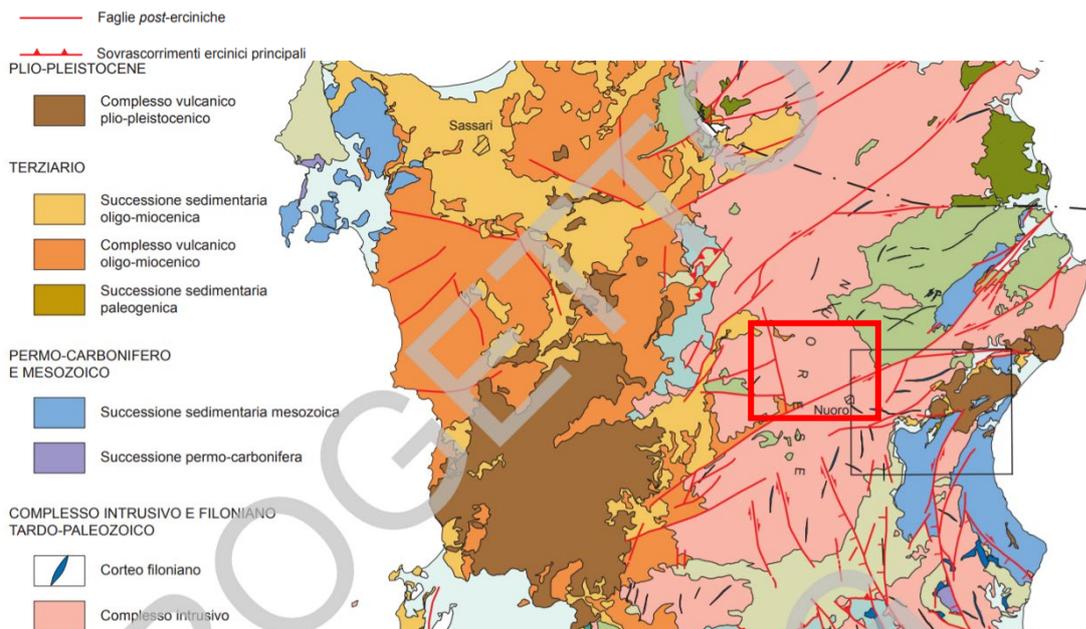


Figura 2 –Schema geologico strutturale della Sardegna. In rosso l'area in esame (immagine estratta dalle Note illustrative del Foglio n. 500 "Nuoro est" della Carta geologica d'Italia).

4.3 INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

Il territorio indagato è costituito sostanzialmente da un esteso altipiano di forma allungata secondo l'asse NW-SE, costituente lo spartiacque delle acque di ruscellamento superficiale; la forma prevalentemente pianeggiante è il risultato della graduale demolizione del rilievo granitico paleozoico ad opera degli agenti erosivi, avvenuta alla fine dell'orogenesi ercinica, che ha portato alla formazione di una estesa superficie erosionale in rilievo, con il denudamento delle roccia granitica costituente il basamento affiorante. I fenomeni di sollevamento tettonico recente hanno ridefinito la morfologia del paesaggio con la ridefinizione della superficie erosionale post ercinica, oggi solcata da profonde incisioni vallive che riprendono le linee di fratturazione tettoniche.

L'area in esame rientra nella fascia altimetrica collinare-montana, compresa tra 550 e 850 m s.l.m. L'affioramento dell'unità litologica del Complesso intrusivo granitico determina una monotonia del paesaggio, caratterizzato per lo più da forme arrotondate e poco acclivi, con rocciosità dominante, spezzate da incisioni torrentizie profonde.

In corrispondenza delle aree di medio basso versante sono adagate le coperture detritiche eluvio colluviali, soprattutto lungo i versanti più acclivi, sovente soggetti a processi erosivi ad opera delle acque di ruscellamento superficiale, che si incanalano lungo gli impluvi naturali presenti marginalmente all'area indagata.

Sono diffusi lungo tutto il settore sommitale, elementi litici a carattere residuale, frutto di una erosione profonda differenziale delle litologie granitiche, che hanno determinato l'isolamento di blocchi rocciosi, dell'ordine medio del metro cubo, lungo la superficie dell'altipiano indagato. Tali blocchi non costituiscono di per sé una pericolosità morfologica o un danno potenziale nel territorio in quanto poggianti su superfici per lo più orizzontali. Si dovrà comunque tenere conto della presenza diffusa di questi massi durante le operazioni di scavo per l'esecuzione delle opere in progetto.

I lineamenti morfologici dell'area, esaminati a seguito del rilievo di superficie e di un'accurata indagine fotointerpretativa, non presentano segnali di processi morfoclimatici e di versante in atto nell'area di studio.



Figura 3 – Pianoro su cui andrà posizionato l'aerogeneratore WTG 07. Sulla superficie sono presenti elementi litici a carattere residuale.



Figura 4 – Ubicazione dell'aerogeneratore WTG 011



Figura 5 – Esecuzione del sondaggio nel sito dove è prevista la posa dell'aerogeneratore WTG 010

5. IDROGEOLOGIA DELL'AREA

5.1 SCHEMA DELLA CIRCOLAZIONE IDRICA SUPERFICIALE E SOTTERRANEA

Il reticolo idrografico della zona in esame è influenzato dall'assetto strutturale e dalla litologia affiorante. L'altipiano in studio presenta una forma pressoché allungata secondo un asse NW-SE, costituente lo spartiacque dei corsi idrici superficiali, che drenano le acque rispettivamente nel settore SW e NE e fanno parte del più ampio bacino del Riu Mannu, uno dei principali affluenti del Fiume Tirso (Sub bacino n. 2 del bacino unico della Sardegna, PAI). Il settore indagato è rappresentato dalle aree sommitali dei rilievi, costituenti le testate dei bacini idrografici presenti, l'idrografia superficiale è particolarmente sviluppata nel basamento cristallino, e sfrutta le numerose discontinuità di origine tettonica: i bacini idrografici scorrono secondo un andamento rettilineo e ortogonale tra loro, alimentando corpi idrici di modeste dimensioni. Gli impluvi costituiscono essenzialmente le aste tributarie di primo e secondo ordine dei torrenti che scorrono più a valle, nei settori esterni alle aree indagate: essi presentano carattere essenzialmente torrentizio con deflussi stagionali legati strettamente alle precipitazioni.

Lungo i versanti a maggiore pendenza i corsi d'acqua assumono un elevato potere erosivo, mentre solamente a valle, in corrispondenza di aste di ordine intermedio sono evidenti fenomeni di deposizione interessanti coltri alluvionali di spessore rilevante (Riu Piscine, Riu Sa Badde, Riu S'Istetta, Riu Nurdole e Riu Mannu ad ovest, Rio Giunturas e Riu Marreri ad est). Complessivamente, le forti pendenze dei versanti non sono favorevoli alla ritenzione delle acque meteoriche: la circolazione idrica profonda è di modesta entità, e si riflette nello scarso numero di sorgenti in tutta l'area. Le piccole emergenze idriche rinvenute durante i sopralluoghi, presentano portate limitate, essendo legate all'andamento stagionale delle precipitazioni, e sono utilizzate esclusivamente per scopi zootecnici.

Dalle analisi idrogeologiche, bibliografiche e cartografiche condotte, e dai rilievi diretti in situ si evince che nel sito indagato non è presente una falda idrica superficiale, intesa quella ospitata nei depositi detritici delle formazioni quaternarie, non presenti nell'area di indagine. Nei litotipi intrusivi granitici la circolazione idrica profonda, in genere scarsa nel settore di indagine, è limitata alla presenza di discontinuità e fratture nella roccia: dalla presenza nel territorio di alcuni pozzi per scopi zootecnici, si attesta la presenza della falda acquifera profonda a -15 m dal p.c.

5.2 UNITÀ IDROGEOLOGICHE

Da un punto di vista idrogeologico, nel settore indagato è presente un'unica Unità idrogeologica a permeabilità medio bassa, comprendente il complesso granitoide fratturato.

I sistemi di fratturazione presenti nel basamento impermeabile definiscono una permeabilità secondaria per fratturazione, con parziale infiltrazione delle acque meteoriche che alimentano la circolazione idrica profonda, fortemente condizionata dunque dalla presenza di discontinuità, maggiormente intensa in prossimità delle faglie principali.

Il coefficiente di permeabilità varia da valori molto bassi ($>10^{-7}$ m/s) nella roccia sana fino a valori di 10^{-5} m/s nelle zone intensamente fratturate o nelle fasce arenizzate. La trasmissività può avere quindi valori compresi tra 10^{-3} e 10^{-4} mq/s e coefficiente di immagazzinamento compreso tra 10^{-1} e 10^{-4} (RAS, 2009).

Dagli studi condotti nel Piano di Tutela delle Acque (RAS, 2009), nella stazione idrometeorologica di Nuoro è stata misurata una evapotraspirazione pari a 325,6 mm (secondo *Thornthwhite*), riferita a 714,8 mm annui di precipitazioni. Da questi dati è possibile calcolare per l'acquifero contenuto in questo complesso idrogeologico un coefficiente di evapotraspirazione CE pari a 0,55% ed un coefficiente di infiltrazione pari a 0,1%.

5.3 CARTA IDROGEOLOGICA

La monotonia delle unità litologiche, le condizioni stratigrafiche e strutturali del territorio determinano una caratterizzazione idrogeologica del sito piuttosto omogenea, riportata nell'Elaborato "2.5 - Carta Idrogeologica", che definisce i litotipi principali interessati dalle opere di progetto secondo le caratteristiche di permeabilità, ed in particolare:

Litotipi permeabili per porosità (permeabilità primaria):

Permeabilità medio-alta: depositi a granulometria mista, in matrice sabbioso limosa, talora debolmente argillosa, parzialmente/mediamente addensati; in questa classe sono inseriti i depositi detritici di versante e i depositi alluvionali, poco diffusi nel territorio in esame, localizzati unicamente nelle aree di compluvio e fondovalle; sono compresi inoltre i prodotti di disfacimento del basamento granitico presenti negli strati più superficiali, poco profondi, costituiti in prevalenza da granito arenizzato, con matrice sabbioso argillosa.

Litotipi permeabili per fratturazione (permeabilità secondaria):

Permeabilità medio-bassa: Graniti in facies rocciosa diffusamente fratturati, con discontinuità da poco profonde a profonde con presenza di materiale di riempimento in prevalenza argilloso.

6. CARTA GEOTECNICA

L'analisi geotecnica finalizzata a definire le caratteristiche meccaniche dei terreni direttamente interessati alla posa degli aerogeneratori, è stata effettuata sulla base della litologia e dell'assetto strutturale dei terreni, che ha consentito di ipotizzare un modello geotecnico del terreno in esame, riportato nell'elaborato "2.6 - Carta Geotecnica", di seguito descritta.

Il modello proposto discende dai risultati del rilievo diretto in campagna, unitamente alle indagini geognostiche dirette eseguite, descritte nei successivi paragrafi, e alla analisi delle acclività, seguendo la norma UNI EN ISO 14689:2018 "Identificazione e classificazione delle rocce". La classificazione della roccia è stata effettuata dove possibile attraverso analisi di tipo speditivo *in situ* e dalle risultanze dei carotaggi, attraverso l'identificazione dell'indice RQD "Rock Quality Designation", espresso in funzione del valore della frequenza dei giunti che attraversano la matrice lapidea, il cui indice ne classifica la qualità (i cui dettagli sono descritti nei paragrafi successivi).

I risultati dello studio hanno consentito di effettuare una classificazione geotecnica, che ha portato all'individuazione di unità geotecniche considerate omogenee, in riferimento alla costituzione geologica dei terreni, al grado di alterazione, alle condizioni morfologiche (acclività) e alle condizioni idrogeologiche dell'area. Essi sono sintetizzati nell'Elaborato "2.6 - Carta Geotecnica" effettuata in scala 1:10.000, che contiene una prima distinzione dei litotipi sulla base delle caratteristiche tecnico meccaniche. Si tratta di una valutazione di massima, che dovrà essere verificata puntualmente nella fase progettuale esecutiva.

6.1 ACCLIVITÀ

Attraverso l'analisi morfometrica sulla acclività del territorio, elaborata in ambiente GIS attraverso il rilievo planomaltrimetrico eseguito nel corso delle indagini, è stato possibile definire due classi di acclività:

- la prima include i terreni aventi morfologia pianeggiante, con pendenze che vanno dallo 0 al 35%,
- la seconda include i terreni con pendenze che vanno dal 35 al 50%: tali pendenze tuttavia non interessano i siti scelti di posa degli aerogeneratori.

Attraverso questa indagine di acclività del pendio, insieme alle caratteristiche litologico stratigrafiche, è stata effettuata una suddivisione del territorio per aree omogenee, in riferimento alle proprietà geologiche, idrogeologiche, morfologiche, fisiche e meccaniche. Tali areali definiscono le unità geotecniche osservate nell'area di rilevamento, riportate nella cartografia di sintesi allegata (Elaborato 2.6 - Carta geotecnica).

6.2 CLASSIFICAZIONE GEOTECNICA DEI LITOTIPI AFFIORANTI

La classificazione geotecnica effettuata ha portato all'individuazione di due unità geotecniche sulle litologie granitiche, I₁ e I₂, e una unità geotecnica sulle litologie afferenti ai depositi quaternari dell'area continentale, quali depositi detritici di versante e di trasporto fluviale, antropici e eluvio colluviali: in generale questa ultima unità non presenta spessori elevati, ma presentano potenze massime di 2-3 m, poggianti direttamente sul substrato granitico in facies massiva e con buone caratteristiche meccaniche.

La classe I₁ si riferisce ad aree interessate dall'affioramento in superficie di litologie granitiche, con morfologia da pianeggiante a debolmente acclive (0 – 35%), con indice RQD compreso tra 50-75%, classe II, classificabile come "discreta", corrispondente a resistenza a compressione monoassiale di 75-100 MPa. In queste litologie sono verosimilmente rinvenibili dei depositi di alterazione superficiali poco profondi, da 0 a 0,70 m, al di sotto del quale la roccia, consistente, assume buone caratteristiche meccaniche i cui parametri sono riassumibili nel Modello geologico indicato (capitolo § 8).

La classe I₂ è riferita a zone caratterizzate da graniti in affioramento, con pendenze che vanno dal 35 al 50%, in cui la fratturazione della roccia è stata considerata sfavorevolmente orientata rispetto al pendio, per cui l'indice RQD ha dato valori in classe III, con valori di resistenza a compressione monoassiale di 50-75 MPa, pur essendo litotipi molto competenti. Non è prevista in questo settore la posa degli aerogeneratori in progetto, ma ricadono in questa litologia i lavori di scavo per le opere di connessione. Dovrà pertanto essere posta particolare cura ai lavori di posa del cavidotto in fase esecutiva sui fronti di scavo e sui lavori di movimento terra.

Alla classe II₁ corrispondono in affioramento i depositi detritici, di versante, di trasporto fluviale, eluvio colluviale e i depositi antropici, che seppure in aree in sommità a morfologia sub-pianeggiante, con pendenze da 0 a 20%, sono caratterizzate da sedimenti incoerenti e semicoerenti, con caratteristiche geotecniche assimilabili a un deposito ghiaioso sabbioso non consolidato. Il loro spessore è in genere ridotto, con profondità massima di 3 m, oltre il quale si è riscontrata la presenza della roccia granitica in facies massiva, con buone caratteristiche tecniche.

7. INDAGINI GEOGNOSTICHE

Lo studio geologico - geotecnico è stato esteso in profondità fino ad indagare il volume di terreno direttamente influenzato dalla costruzione delle opere in progetto. Le indagini di seguito descritte, eseguite per una caratterizzazione di massima dei terreni utile alla presente progettazione definitiva, sono state rapportate alle caratteristiche strutturali e all'importanza dell'opera, nonché alle caratteristiche del sottosuolo e allo stato delle conoscenze della zona.

Per le opere previste in progetto, si è proceduto alla caratterizzazione dei terreni di fondazione con indagini e prove in situ ed in laboratorio geotecnico certificato. In caso di esito positivo di autorizzazione, in fase di progettazione esecutiva sarà necessario effettuare ulteriori indagini puntuali per ciascun punto di posa delle pale eoliche.

La campagna di indagini, eseguita dalla "Ditta Geol. Antonello Angius" di Cagliari, ha visto la realizzazione di:

- n. 1 sondaggio verticale a rotazione a carotaggio continuo, di diametro 101 mm;
- prelievo di spezzoni di carota lapidea da sottoporre a prove Point Load;
- prospezione geofisica con n. 1 stendimento con metodologie sismica a rifrazione e MASW.

Il sondaggio, denominato S10 poiché ricadente nel punto di posa dell'aerogeneratore WG 010 in progetto, è stato spinto fino alla profondità di 10 m dal p.c., permettendo di ricostruire esaustivamente la stratigrafia del sottosuolo. I materiali prelevati durante i sondaggi sono stati catalogati su apposite cassette catalogatrici in plastica a 5 scomparti.

Durante la loro esecuzione sono stati prelevati dei campioni per le analisi di laboratorio.

Al sondaggio sono state associate delle indagini geofisiche utili alla ricostruzione della sequenza stratigrafica delle litologie riscontrate nel sondaggio.

L'omogeneità litologica del sito riscontrata a seguito delle indagini, permette una attribuzione di massima delle caratteristiche litostratigrafiche nel sito di indagine.

Nell'immagine seguente si riporta l'ubicazione delle indagini eseguite su inquadramento aerofotogrammetrico.

Si rimanda a "Allegato 2 – Relazione sulle indagini geognostiche" per la descrizione delle modalità operative delle indagini e le risultanze geognostiche.

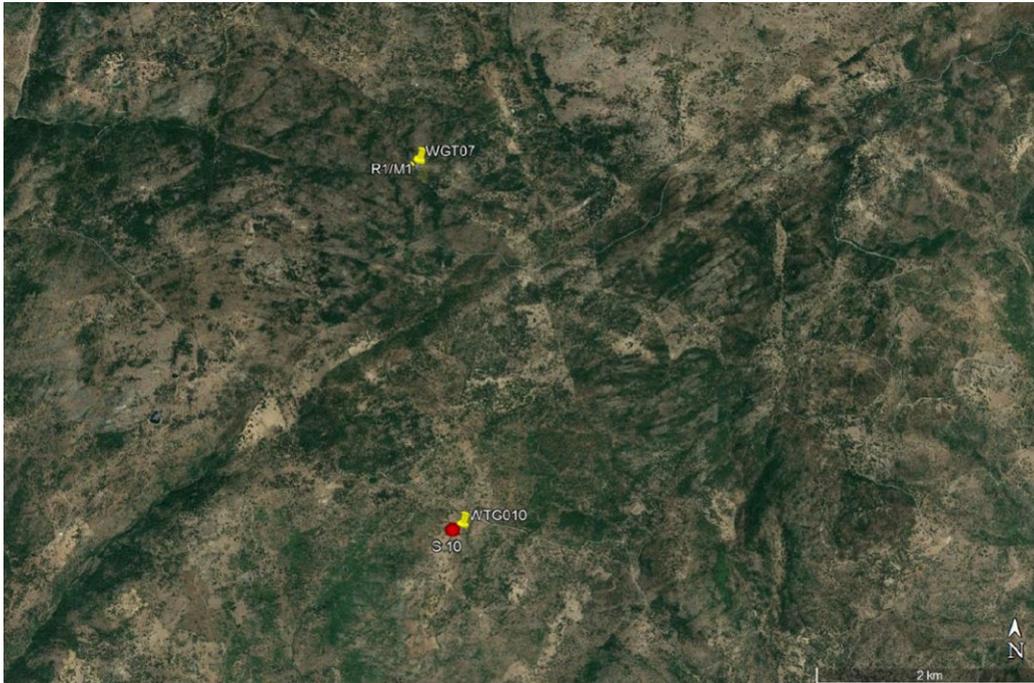


Figura 6 – Ubicazione delle indagini geognostiche eseguite.

7.1 SONDAGGIO A CAROTAGGIO CONTINUO

Il sondaggio eseguito in corrispondenza dell'area di posa dell'aerogeneratore WTG 10 ha messo subito in evidenza la presenza, al di sotto di un primo strato di suolo superficiale di spessore 60 cm, del Complesso granitico intrusivo, il quale si presenta arenizzato e alterato, da addensato a semi lapideo superficialmente, fino a raggiungere la facies semilapidea e poi lapidea col progredire della profondità, con buone caratteristiche geomeccaniche sin dai primi metri dal piano campagna, ed in particolare da -3,70 m si presenta integra e poco fratturata .

Nel corso del sondaggio non è stata rilevata la falda idrica superficiale.

La stratigrafia rilevata è nel dettaglio di seguito descritta.

- 0.00 – 0.60 m: Suolo sabbioso, da bruno a marrone;
- 0.60 – 2.30 m: Granito totalmente arenizzato, da nocciola a beige chiaro, da addensato a semilapideo;
- 2.30 – 3.70 m: Granito arenizzato, semilapideo con intervalli lapidei, beige-marroncino, ossidato;
- 3.70 – 10.0 m: Granito lapideo, grigio, poco fratturato, con giunti obliqui o molto inclinati, scabri, serrati.

Per la realizzazione del sondaggio a rotazione con carotaggio continuo, di diametro 101 mm, sono state utilizzate le seguenti attrezzature:

- Sonda idraulica cingolata BOART LONGYEAR, modello DELTABASE 520;
- Carotiere semplice con corone *widia* Ø 101 mm;
- Carotiere doppio T6 con corone *diamantate* Ø 101 mm;
- Cassette catalogatrici monostampo in PVC.

7.2 QUADRO DELLE ANALISI DI LABORATORIO

Durante l'esecuzione del sondaggio sono stati prelevati degli spezzoni di carota lapidea al fine di determinare i parametri geotecnici utili per la progettazione degli aerogeneratori. Le risultanze stratigrafiche riscontrate durante le indagini, e le caratteristiche litologiche del granito hanno fatto optare per l'esecuzione di prove Point Load al fine di evitare che il detensionamento dei campioni alterasse i valori di resistenza.

La prova Point Load è stata effettuata utilizzando l'apparecchiatura Point Load digitale CONTROLS mod. 45-D0550/D matr.06053686, in pieno accordo con le Norme di riferimento: ASTM D5731, Raccomandazioni ISRM. Tali prove hanno permesso di definire l'indice I_s (Point Load Strength Index), dato dalla seguente espressione

$$I_s = (P \times 1000) / D_e^2$$

dove I_s (MPa) = resistenza al punzonamento (Point Load Strength Index)

P (kN) = Resistenza massima a rottura

D_e (mm) Diametro equivalente della carota (diametro del provino) ($D_e = 89$ mm)

Il valore I_s , prima corretto per rapportarlo a provini con diametro pari a 50 mm, come segue:

$$I_{s(50)} = F \times I_s \quad F = (D_e / 50)^{0,45} \quad (F = 1,296)$$

viene poi moltiplicato per un coefficiente K (vedi Tabella 5) variabile in funzione della litologia indagata.

I risultati della prova sono riportati nella tabella che segue.

Sondaggio	Prof. campione	P (KN)	Tipo rottura	I_s (MPa)	$I_{s(50)}$ (MPa)	S_u (MPa)	Litotipo	Resistenza
S10 – C1	3,75-4,00	5.55	Diametricale	0.77	0.98	17.56	Granito	Bassa
S10 – C2	5,50-5,65	6.81	Diametricale	0.94	1.20	21.55	Granito	Bassa
S10 – C3	7,60-7,75	18.24	Diametricale	2.52	3.21	57.71	Granito	Elevata

Tabella 1: Risultati della prova di laboratorio Point Load test.

Dalle analisi effettuate in laboratorio si evince che la roccia presenta valori di resistenza da bassa a elevata (*Brown E.T., Rock characterization, testing and monitoring-ISRMS suggest methods*). I valori di resistenza bassi sono riconducibili alla porzione di roccia più alterata, mentre i valori di resistenza più elevati sono riferiti alla roccia sana.

LITOTIPO	K
Rocce effusive	22
Rocce intrusive	18
Rocce sedimentarie a grana grossa	18
Rocce sedimentarie a grana fine	8
Rocce metamorfiche a basso metamorfismo	18-24
Rocce metamorfiche a medio metamorfismo	16-19
Rocce metamorfiche ad alto metamorfismo	14

Tabella 2: Valori del coeff. di correlazione K (Bruschi, 2004)

Sulla base dei risultati dei valori di resistenza I_s ricavati in laboratorio e per confronto bibliografico con materiali simili, si assume un peso di volume naturale come riportato di seguito:

Sondaggio	Prof. da p.c.	Litotipo	Massa volumica apparente (Ton/m ³)
S10 – C1	3,75-4,00	Granito	2,30
S10 – C2	5,50-5,65	Granito	2,30
S10 – C3	7,60-7,75	Granito	2,35

Tabella 3: Risultati della prova di laboratorio sulla determinazione della massa volumica.

7.3 INDAGINI GEOFISICHE

Nel corso della campagna di indagini sono state effettuate due indagini di tipo sismico: la MASW, al fine di determinare la classificazione del suolo di fondazione per le categorie semplificate indicate nel Decreto 17 gennaio 2018 - NTC 2018 aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni", e la geofisica a rifrazione in onde P, al fine di ricostruire l'assetto sismo-stratigrafico dei terreni sede di posa delle opere di fondazione:

- l'indagine sismica attiva con tecnica MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva, che attraverso la definizione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s , è in grado di ricostruire una sismo-stratigrafia atta a permettere la definizione della categoria di suolo ai sensi del Decreto 17/01/2018;
- l'indagine sismica a rifrazione con acquisizione ed elaborazione tomografica in onde longitudinali (P) permette di ricostruire l'andamento stratigrafico, nel senso di spessori elastomogenei, del terreno investigato e le velocità dei sismostrati.

E' stato effettuato un unico stendimento geofisico sul quale si sono impiegate entrambe le tecniche di indagine descritte, le cui caratteristiche principali sono riportate nella Tabella seguente:

ID intervento	Sigla stendimento	Intervallo Geofoni (m)	Lunghezza (m)
WG 07	R1/M1	2	46

Tabella 4: Caratteristiche principali dei profili sismici

7.3.1 Indagine sismica mediante metodologia MASW

Durante i lavori di indagine è stata portata avanti una campagna investigativa geofisica al fine di definire la categoria di sottosuolo dei terreni interessati dalle opere di progetto, in accordo con le NTC 2018. L'indagine è stata condotta mediante la metodologia MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves).

La tecnica consiste nella registrazione multicanale di segnali sismici generati da sorgenti impulsive all'interfaccia della superficie libera del terreno. Si tratta di una prova totalmente non invasiva basata sulla propagazione di onde di superficie (Rayleigh e Love) per la stima del profilo di velocità delle onde di taglio V_s , nell'ipotesi di semispazio monodimensionale, caratterizzato da legame costitutivo (visco-) elastico lineare. Le prove per onde superficiali sfruttano le caratteristiche dispersive dei mezzi stratificati. In altre parole, in presenza di un mezzo multistrato, la velocità di fase e di gruppo del segnale risulta dipendente dalla frequenza di eccitazione. Per questo motivo, le componenti spettrali ad alta frequenza forniscono informazioni sugli strati più superficiali, perché caratterizzate da una minor capacità penetrativa, a causa della maggiore attenuazione subita durante il percorso all'interno del mezzo di propagazione. Viceversa, le componenti a grande lunghezza d'onda e bassa frequenza permettono di ricavare informazioni circa le proprietà dei terreni più profondi, così come schematizzato in Figura 2. Il profilo di velocità $V_s(z)$ in funzione della profondità z viene determinato attraverso la soluzione di un problema inverso.

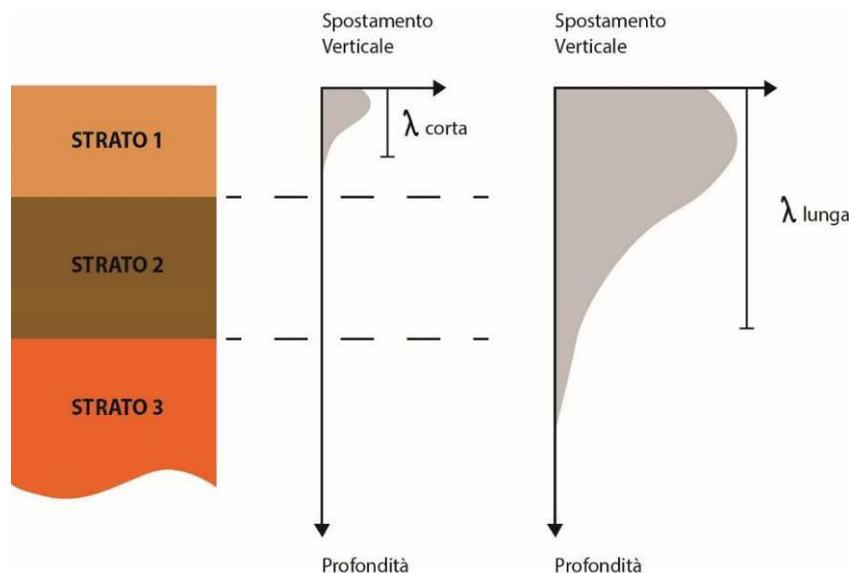


Figura 7 – Dipendenza della profondità di indagine dalla frequenza del segnale.

L'analisi MASW dei segnali sismici può essere sintetizzata in alcuni passi fondamentali: la prima fase consiste nell'estrazione, mediante picking, della curva di dispersione sperimentale a partire dall'analisi spettrale del segnale nel dominio di Fourier. In altre parole, dopo aver selezionato l'intervallo caratterizzato da massima ampiezza nello spettro f - k (frequenza-numero d'onda) o f - V (frequenza-velocità) si ricostruisce la curva $V(f)$ (velocità – frequenza) o $S=S(f)$ (lentezza – frequenza). La seconda fase di elaborazione consiste nella soluzione

del problema inverso. Solitamente si parte da un modello di partenza con un numero prestabilito di strati sovrapposti, ciascuno caratterizzato da un proprio valore di velocità V_s .

Per l'esecuzione del cantiere d'interesse, è stata impiegata una strumentazione di acquisizione modello GEA24, prodotto dalla PASI Geophysics, con frequenza di campionamento 1500 Hz per ognuno dei canali registrati, ciascuno attrezzato con geofoni verticali e orizzontali della PASI Geophysic con frequenza propria di 4,5 Hz. Il numero di canali è risultato pari a n° 24 canali. Per l'energizzazione è stata utilizzata una mazza battente da 10 kg impattante verticalmente su piastra di battuta in duralluminio, diametro 18 cm, spessore 4 cm, peso 2 kg.

Dall'indagine eseguita, spiegata nel dettaglio nella relazione sismica riportata nell'Allegato 2 "Relazione sulle indagini geognostiche", sono stati riscontrati valori di V_s progressivamente crescenti con la profondità e compresi tra circa 730 e 4020 m/s.

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

MASW

H = 4,7 m Profondità di posa della fondazione = -4,7 m da cui deriva: $V_{s,eq} = 730$ m/s
--

Nell'ipotesi in cui le fondazioni siano realizzate a -3,00 m dal p.c., la V_s equivalente diventa:

$$H = 4.70 - 3.00 = 1.70 \text{ m dal piano della fondazioni}$$

Le categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato in funzione del parametro V_s eq, sono definite dalla Tab. 3.2.II, delle NTC 2018 (Tabella 1), da cui si ricava una categoria di sottosuolo, per entrambe le aree di indagine, di **tipo B**.

CATEGORIA	CARATTERISTICHE DELLA SUPERFICIE TOPOGRAFICA
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>

Tabella 5 - Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.

L'indagine MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali V_s , dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati.

M SOTTO IL P.C.	DESCRIZIONE
0 - 4,7	1° SISMOSTRATO CON V_s DI 730 M/S - TERRE DI RIPORTO E/O GRANITO ARENIZZATO E/O MOLTO FRATTURATO
4,7 - 10,60	2° SISMOSTRATO CON V_s 1310 M/S - GRANITO MOLTO FRATTURATO
10,60 - 15,50	3° SISMOSTRATO CON V_s 1770 M/S - GRANITO DEBOLMENTE FRATTURATO
15,50 - 30,00	4° SISMOSTRATO CON V_s 3610 E 4020 M/S - GRANITO INTEGRO

Tabella 6: MASW - Profilo V_s eq da p.c. 730 m/s

Di seguito si indicano le correlazioni bibliografiche che possono essere utilizzate per il calcolo dei parametri di deformazione dinamici calcolati tramite correlazione bibliografica dei parametri di input V_p , V_s e densità per ciascun sismostrato definito dalle indagini geofisiche.

$$\text{Modulo di Young dinamico } E_d = \gamma V_s^2 [(3V_p^2 - 4V_s^2)/(V_p^2 - V_s^2)]$$

$$\text{Modulo di taglio (rigidità) } G_0 = \gamma V_s^2$$

$$\text{Modulo di comprimibilità o di Bulk } K = \gamma (V_p^2 - 4/3 V_s^2)$$

Sismostrato	V_s	V_p	Densità γ	Modulo di Young dinamico $E_{d_{dyn}}$	Modulo di taglio iniziale G_0	Modulo di comprimibilità o di Bulk K
	<i>m/s</i>	<i>m/s</i>	<i>kg/m³</i>	<i>MPa</i>	<i>MPa</i>	<i>MPa</i>
1	730	1460	1900	2700.03	1012.51	2700.03
2	1310	2620	2200	10067.79	3775.42	10067.79
3	1770	3540	2300	19215.12	7205.67	19215.12
4	3610	7220	2700	93831.12	35186.67	93831.12
5	4020	8040	2800	120664.32	45249.12	120664.32

Tabella 7: Parametri elastici calcolati tramite i parametri di input V_p , V_s ricavati dall'indagine MASW M1

7.3.2 Indagine sismica a Rifrazione

L'esecuzione delle indagini geofisiche mediante sismica a rifrazione in onde P, ha consentito di valutare le proprietà fisico - meccaniche dei terreni oggetto di studio, e valutare il loro grado di addensamento / compattezza dei materiali attraversati. Tale indagine risulta tra le metodologie più affermate e meglio sperimentate. Il metodo si basa sugli effetti di rifrazione del segnale sismico in corrispondenza dell'interfaccia tra un mezzo soprastante a velocità sismica minore rispetto ad uno strato sottostante al primo con velocità sismica superiore.

La tecnica di prospezione sismica a rifrazione consiste nella misura dei tempi di primo arrivo delle onde sismiche generate in un punto in superficie (punto di energizzazione/sparo), in corrispondenza di una molteplicità di ricevitori (geofoni) disposti allineati sulla superficie topografica.

Le profondità raggiunte sono al massimo la metà della distanza compresa tra lo shot esterno e l'ultimo geofono della stesa sismica sviluppata. È comunque generalmente assunto che la profondità esplorata non superi 1/3 dello sviluppo geometrico sopradescritto. La capacità risolutiva in termini di spessore degli strati sismici viene ad essere valutata in circa il 25÷30% della distanza geofonica.

Nel caso in esame, in funzione della lunghezza degli stendimenti sono state eseguite 9 energizzazioni shot, al fine di meglio descrivere la geometria degli orizzonti rifrattori lungo l'intera base sismica.

Per l'esecuzione delle indagini è stata impiegata una strumentazione di acquisizione modello GEA24, prodotto dalla PASI Geophysics, con frequenza di campionamento 1500 Hz per ognuno dei canali registrati, ciascuno

attrezzato con geofoni verticali e orizzontali della PASI Geophysic con frequenza propria di 4,5 Hz. Il numero di canali è risultato pari a n° 24.

Per l'energizzazione è stata utilizzata una mazza battente da 10 kg impattante verticalmente su piastra di battuta in duralluminio, diametro 18 cm, spessore 4 cm, peso 2 kg.

La quota relativa di ciascun geofono-shot è stata rilevata tramite una livella digitale in modo da poter ricostruire la morfologia del terreno e utilizzarla in fase di elaborazione dei dati acquisiti.

Le sezioni sismiche ottenute dalla modellizzazione e interpretazione dei segnali acquisiti, riportati di seguito mediante sezioni litosismografiche, hanno permesso di individuare due principali unità geologiche nel sito di intervento. Sulla base delle velocità misurate, dei dati bibliografici e sui sondaggi eseguiti, nelle sezioni tomografiche sono stati definiti i seguenti sismostrati:

- A - Sismostrato A: Unità delle terre e/o dei graniti arenizzati e/o molto fratturati
- B - Sismostrato B: Unità dei graniti lapidei poco fratturati e/o integri

La delimitazione dei sismostrati ha lo scopo principale di distinguere le terre in rocce scavabili e queste da quelle non rippabili. I valori di velocità sono indicativi, e possono presentare delle oscillazioni locali a causa delle variazioni delle caratteristiche dei litotipi. Nei paragrafi precedenti sono state indicate le differenti classificazioni del grado di rippabilità delle rocce. Nel contesto in esame per definire le rocce "rippabili" si ritiene ragionevole impiegare quale valore indicativo di velocità $V_p < 1.250$ m/s.

RIFRAZIONE

<i>SISMOSTRATI</i>	<i>Profondità da pc (m)</i>	<i>Velocità in m/s</i>
A - Unità delle terre e/o dei graniti arenizzati e/o molto fratturati	da 0 a 3/5	450-1250
B - Unità dei graniti lapidei poco fratturati e/o integri	da 3/5 a 9	1250-3000

Dall'esame della sezione tomografica R1 si riconoscono 2 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 450 m/s ai 3000 m/s. L'aumentare delle velocità delle onde P Φ riconducibile al graduale miglioramento delle caratteristiche fisico-meccaniche dei litotipi presenti nel sottosuolo all'aumentare della profondità.

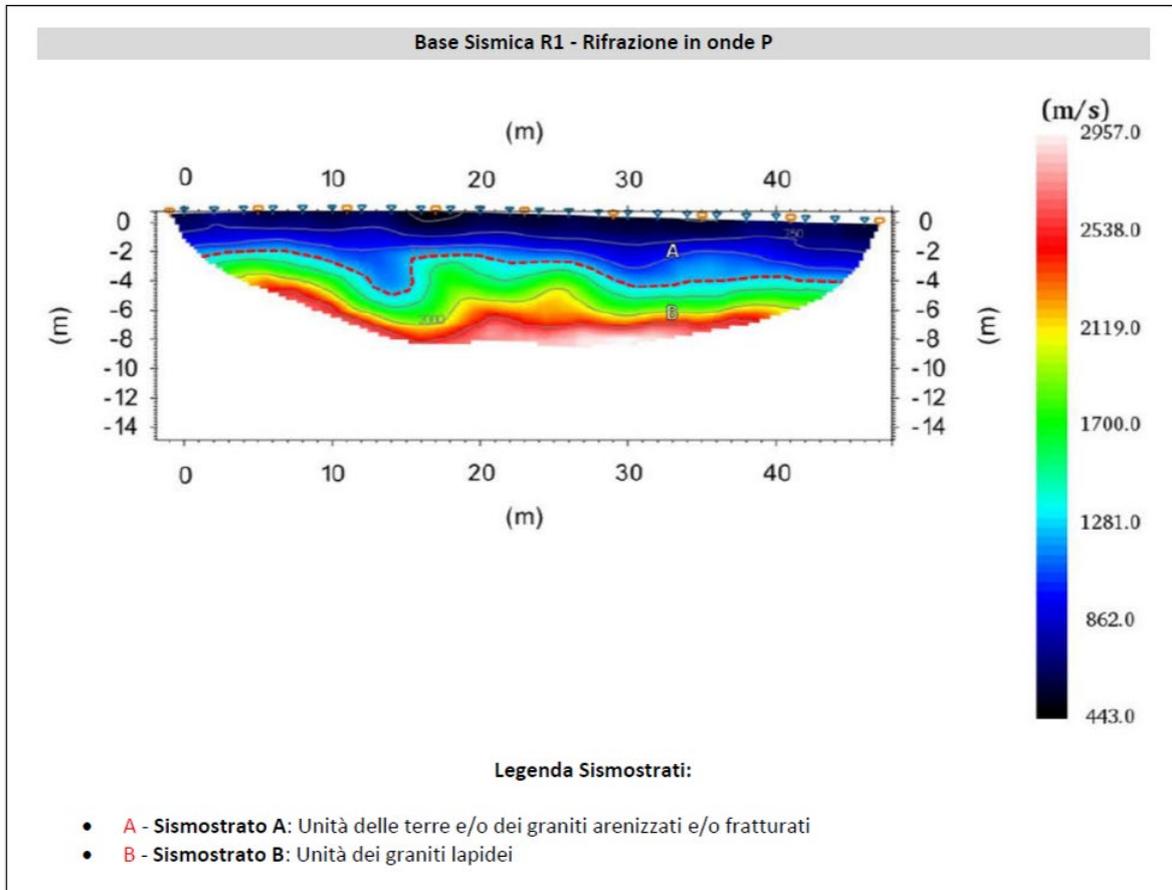


Figura 8 – Risultati indagine a rifrazione R 1

7.4 CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA DELLA ROCCIA

Gli ammassi rocciosi sono stati analizzati tramite la classificazione di Beniaowski (1989), in funzione dell'indice RMR calcolato sulla base dei risultati della prova Point Load test, dell'indice RQD e dalle caratteristiche delle discontinuità ricavate dai sondaggi.

Il metodo Beniaowski si basa sul rilievo di sei parametri geotecnici, ad ognuno dei quali è stato assegnato un peso:

- R1 resistenza a compressione uniassiale della roccia intatta
- R2 indice RQD
- R3 spaziatura delle discontinuità
- R4 condizioni delle discontinuità (rugosità, alterazione, apertura, riempimento, continuità)
- R5 condizioni idrauliche
- R6 orientamento delle discontinuità (favorevolezza delle giaciture rispetto all'opera da realizzare).

La classificazione definisce due valori dell'indice RMR:

- $RMR_{base} = R1+R2+R3+R4+R5$

- $RMR_{corretto} = R1+R2+R3+R4+R5+R6$.

In base al valore dell'indice RMR, gli ammassi rocciosi vengono suddivisi in cinque classi, per ciascuna delle quali viene indicata una stima di massima dell'angolo di attrito, della coesione, una valutazione della qualità e un giudizio sulle difficoltà di scavo degli ammassi stessi.

Il calcolo del valore dell'indice RMR hanno permesso di definire i parametri caratteristici dell'ammasso, riportati nella tabella seguente. Di seguito si riportano anche i dati di input e il calcolo dei parametri determinati.

Sondaggio	Prof. campione	RMR base	RMR corretto	Classe	Descrizione	Modulo di deformazione (GPa)	Geological Strength Index (GSI)	Coesione di picco (kPa)	Angolo di attrito di picco (°)	Coesione residua (kPa)	Angolo di attrito residuo (°)
S10 – C1	3,75-4,00	63,91	61,91	Seconda	Buono	27,82	58,91	319,55	36,96	255,64	30,56
S10 – C2	5,50-5,65	64,12	62,12	Seconda	Buono	28,24	59,12	320,60	37,06	256,48	30,65
S10 – C3	7,60-7,75	45,32	38,32	Seconda	Buono	34,22	62,11	335,55	38,56	268,44	31,84

Tabella 8: Caratterizzazione dell'ammasso roccioso secondo il Metodo di Bieniawsky (1989)

8. MODELLO GEOLOGICO DI RIFERIMENTO

La ricostruzione litostratigrafica dei terreni presenti nell'area in esame è stata effettuata sulla base dei risultati acquisiti con il rilievo di superficie e sulla base delle informazioni ottenute con la campagna di indagini eseguite nel mese di Gennaio 2022, che hanno consentito di ricostruire un modello geologico dell'area, così come richiesto dal Testo Unico "Norme tecniche per le costruzioni" NTC 2018, schematizzato nel profilo geologico riportato di seguito.

Nel complesso, le indagini eseguite tramite sondaggio geognostico in corrispondenza della WTG 10, e gli stendimenti geofisici eseguiti in prossimità della WTG 06 e WTG 07, riportano un unico modello litologico stratigrafico, a cui fare riferimento per le opere di fondazione in progetto. Il modello geologico fa riferimento ad una stratigrafia rappresentata dal basamento granitico roccioso, costituito da un primo strato, in facies arenizzata e semilapidea, fino alla profondità di -3,7 m, al quale si sussegue in profondità la roccia più compatta, in facies lapidea, fratturata, fino alla profondità di fine sondaggio, attestata a - 10 m.

Si evidenzia l'assenza di circolazione idrica superficiale in queste profondità. Di seguito si riporta uno schema grafico del modello geologico di riferimento.

<i>Unità litologica</i>	<i>profondità</i>	<i>Descrizione</i>
	- 0,60 m	SUOLO
	-3,70 m	GRANITO ARENIZZATO Peso di Volume = 2,20 Ton/m ³ Coesione = 9,8 KPa Angolo di attrito = 34°
	- 10,0 m	GRANITO IN FACIES LAPIDEA Peso di Volume = 2,30 Ton/m ³ Resistenza a compressione monoassiale = 21,55 Mpa Coesione di picco = 320,60 KPa Angolo di attrito di picco = 37,061° Coesione residua = 256,48 KPa Angolo di attrito residuo = 30,65° Modulo di deformazione = 28,24 GPa GSI = 59,12

9. CONCLUSIONI

Nella presente relazione sono riportate le caratteristiche geologiche, stratigrafiche, morfologiche e idrogeologiche di massima dell'area interessata dallo sviluppo del parco eolico, sulla base dei rilievi di superficie eseguiti nell'area, la fotointerpretazione, l'analisi cartografica dei dati di base, unitamente alla campagna di indagini geognostiche descritte nei precedenti paragrafi e all'osservazione della roccia in affioramento.

In particolare, lo studio ha evidenziato che le aree direttamente interessate dallo sviluppo degli aerogeneratori sono delle superfici pianeggianti e subpianeggianti, con pendenze prossime allo 0,5 – 10% e caratterizzate dall'affioramento della roccia granitica sin dalla superficie, che si presenta in facies arenizzata e semilapidea nelle porzioni più superficiali, e ricoperta da un debole strato pedogeneizzato. Localmente i processi di arenizzazione e degradazione che avvengono tipicamente negli strati più superficiali dei graniti in affioramento, ad opera degli agenti esogeni, determinano una diminuzione delle proprietà geotecniche che tuttavia, come rilevato nel corso delle indagini eseguite, migliorano nettamente all'aumentare della profondità.

I parametri geotecnici dei materiali, utili per la verifiche geotecniche propedeutiche alla progettazione, sono riportati nel modello geologico di riferimento così come richiesto dalla normativa vigente (NTC 2018).

Dal punto di vista geomorfologico, nell'area esaminata non sono stati rilevati movimenti gravitativi profondi che possano coinvolgere estese porzioni di territorio; localmente sono stati rilevati, nei settori più acclivi, processi legati alla dinamica dei versanti, interessanti porzioni di roccia e blocchi granitici, fratturati e dislocati, comunque distanti dalle aree di posa previste per gli aerogeneratori e dalle opere ad essi connesse.

Dal punto di vista idrogeologico, la tipologia di intervento in progetto non comporta alterazioni nell'attuale assetto idrologico del territorio, in quanto è presente una falda la cui superficie piezometrica è attestata a profondità superiore a 15 m, mentre le poche sorgenti presenti sono ubicate distanti dai siti di intervento. Le lavorazioni previste interessano solamente i primi metri del substrato e non vanno a incidere sulla circolazione idrica sotterranea; dovrà comunque essere curato il drenaggio delle acque superficiali, in particolare nelle piste e nelle strade di accesso, per scongiurare i fenomeni di ruscellamento incanalato ed erosione degli strati più superficiali del suolo.

Particolare cura dovrà essere posta ai lavori di posa del cavidotto, in particolare dove esso andrà a intercettare zone a pericolosità Hg2 secondo il PAI regionale: in questo caso dovranno essere rispettate le prescrizioni previste dal PAI; esso, così come da progetto verrà collocato all'interno dell'attuale cassonetto stradale o eventualmente in banchina, senza intaccare le condizioni di funzionalità del regime idraulico del reticolo idrografico e alle condizioni di permeabilità dei suoli, non compromettendo la riduzione o l'eliminazione delle cause di pericolosità potenziale né la sistemazione idrogeologica; pertanto le interferenze evidenziate non generano alcuna modifica all'assetto geomorfologico attuale.

La presente relazione geologica di massima dovrà essere necessariamente approfondita in fase esecutiva, in modo da valutare nel dettaglio le caratteristiche geologiche e geotecniche in corrispondenza di ogni aerogeneratore in progetto.



Comune di Nuoro
Provincia di Nuoro - REGIONE SARDEGNA

**PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DEL PARCO EOLICO
"INTERMONTES" NEL TERRITORIO DEL COMUNE DI NUORO**

Progetto definitivo



ALLEGATI



Comune di Nuoro
Provincia di Nuoro - REGIONE SARDEGNA

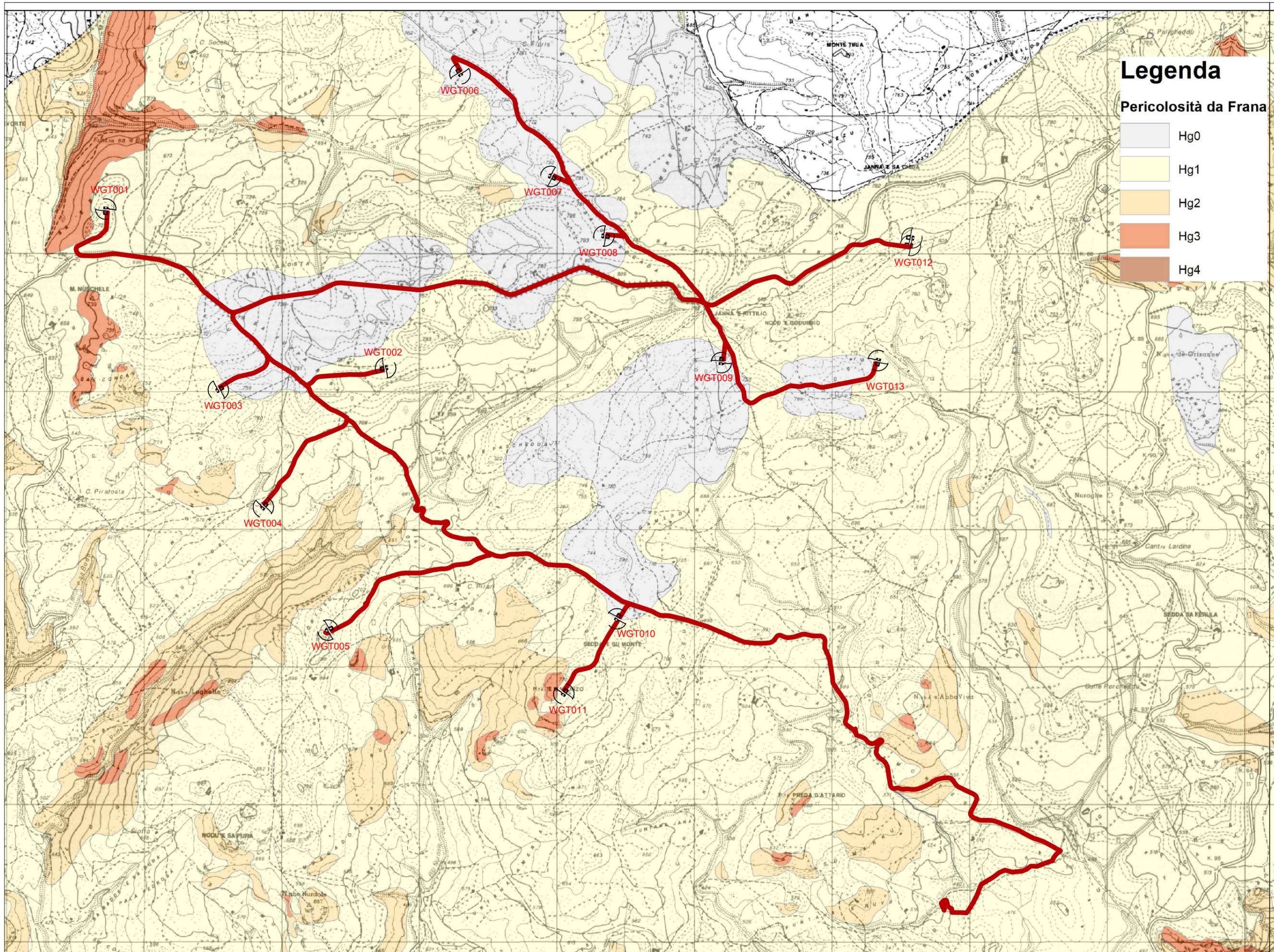
**PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DEL PARCO EOLICO
"INTERMONTES" NEL TERRITORIO DEL COMUNE DI NUORO**

Progetto definitivo



ALLEGATO 1

Inquadramento del sito di intervento su area PAI



Legenda

Pericolosità da Frana

- Hg0
- Hg1
- Hg2
- Hg3
- Hg4



Comune di Nuoro
Provincia di Nuoro - REGIONE SARDEGNA

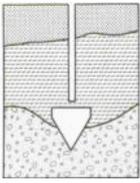
**PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DEL PARCO EOLICO
"INTERMONTES" NEL TERRITORIO DEL COMUNE DI NUORO**

Progetto definitivo



ALLEGATO 2

Relazione sulle indagini geognostiche



DR. ANTONELLO ANGIUS

Web site: www.angiusgeo.com

**INDAGINI GEOGNOSTICHE, PROVE GEOTECNICHE, MONITORAGGIO AMBIENTALE,
PROSPEZIONI MINERARIE, CONSOLIDAMENTI, POZZI PER ACQUA, PROSPEZIONI GEOFISICHE**

Tel/Fax: +39 070 40 32 74

Pec: angiusgeo@pec.it

e-mail: angiusgeo@tiscali.it

Comune di Nuoro

Provincia di Nuoro

Progetto:

Indagini geognostiche per la realizzazione di un impianto eolico in agro di Nuoro



GENNAIO 2022

INDAGINE GEOGNOSTICA

Committente: Dr. Geol. Francesca Demurtas

SEDE LEGALE e UFFICI: Via Italia, 143 – 09134 Cagliari (ITALY)
Codice Fiscale: NGSNNL61H07B354Y
Partita IVA: 01985230927
CCIAA Cagliari: 154185 del 07/01/1991
Albo Nazionale Gestori Ambientali: CA04576

RINA SOA
Società attestata da
OS20b CLASS. I

Sommario

Premessa	1
1.0 Inquadramento geografico e topografico del sito	2
2.0 Caratteristiche della campagna geognostica	4
3.0 Sondaggi geognostici	4
4.0 Point load test	5
5.0 Indagine geofisica	9

Allegati

ALLEGATO 1 – Planimetria ubicazione indagini

ALLEGATO 2 – Report fotografico

ALLEGATO 3 – Stratigrafie sondaggi

ALLEGATO 4 – Indagine geofisica

PREMESSA

Nel mese di Gennaio 2022 la Dott.ssa Geol. Francesca Demurtas ha affidato all’*Impresa Dott. Antonello Angius*, specializzata in indagini geognostiche, l’esecuzione di un sondaggio a carotaggio e una prospezione geofisica con metodi sismici a rifrazione e MASW nell’ambito del progetto per la realizzazione di un impianto eolico in agro di Nuoro.

Le prove in sito sono state eseguite nel mese di Gennaio 2022.

L’area di indagine ricade nel Comune di Nuoro (NU).

L’immagine sottostante (**Figura 1**) riporta una panoramica del luogo d’intervento su foto satellitare.

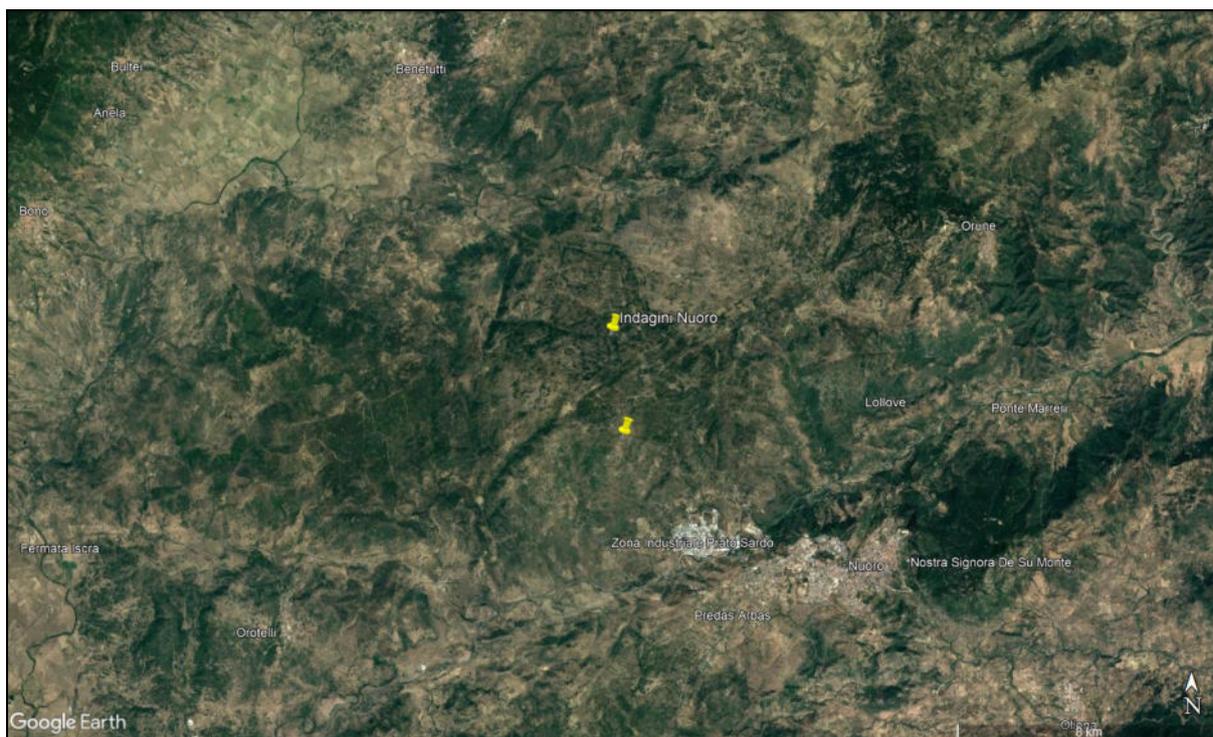


Figura 1 - Panoramica dei luoghi d’intervento (Google Earth)

La relazione illustra le modalità esecutive dei lavori e ne riassume le risultanze geognostiche.

Le operazioni d’indagine rispondono alla normativa tecnica ufficialmente riconosciuta, e in particolare fanno riferimento alle Raccomandazioni A.G.I. (*Associazione Geotecnica Italiana*) e ISRM (*International Society for Rock Mechanics*).

Tutti i lavori sono stati eseguiti dal personale specializzato dell’Impresa ed assistiti in cantiere da Geologi esperti in geognostica e indagini in sito.

1.0 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E TOPOGRAFICO DEL SITO

L’area oggetto d’indagine ricade nel Comune di Nuoro (NU) (**Figura 2**), e i riferimenti cartografici sono rappresentati da:

- ➔ Foglio 499 sez. I “Nùoro Ovest” dell’IGM (scala 1: 25.000) (**Figura 3**);
- ➔ Sez. 499-030 “Monte Nuscheli” della Nuova Carta Tecnica Regionale (scala 1:10.000) (**Figura 4**).

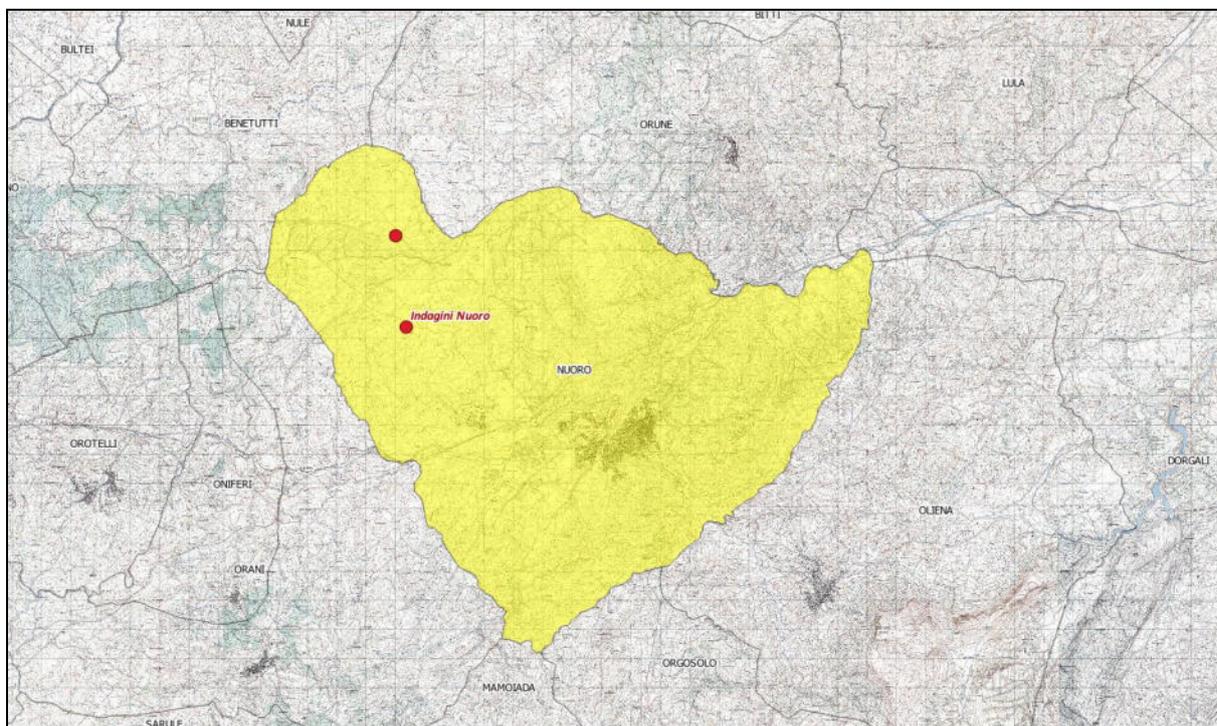


Figura 1 - Inquadramento geografico del sito

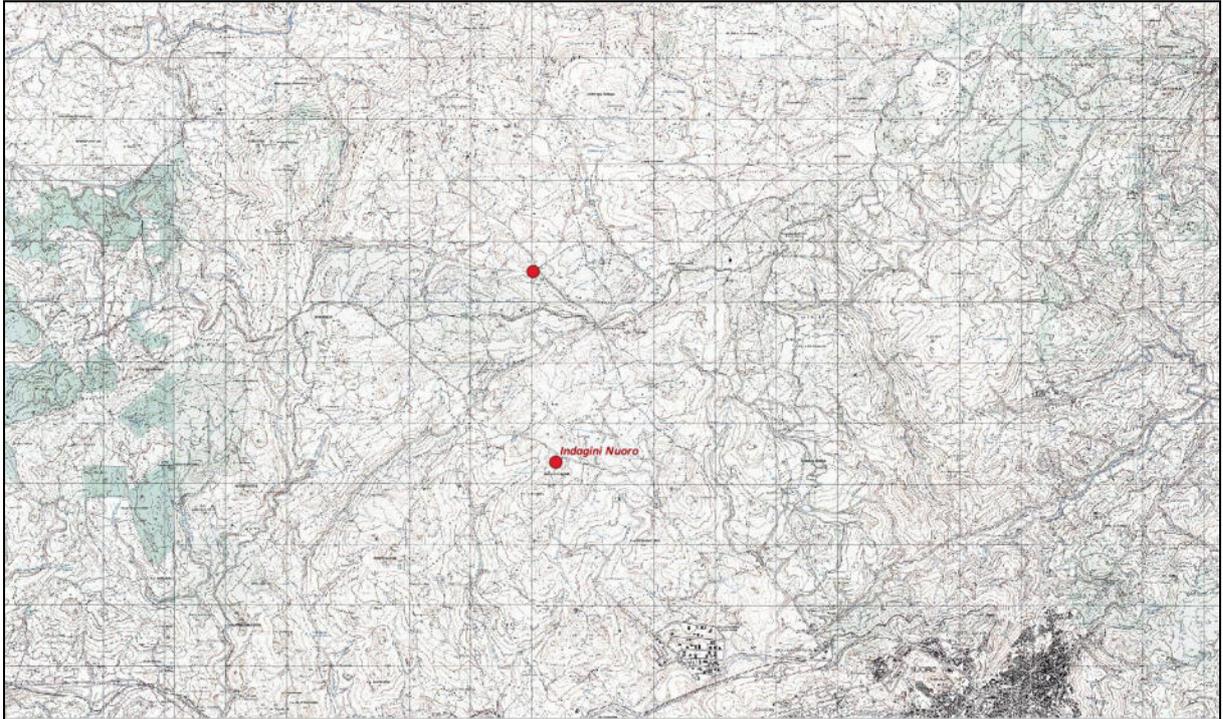


Figura 2 - Stralcio Cartografia I.G.M. – Foglio 499 Sez. I

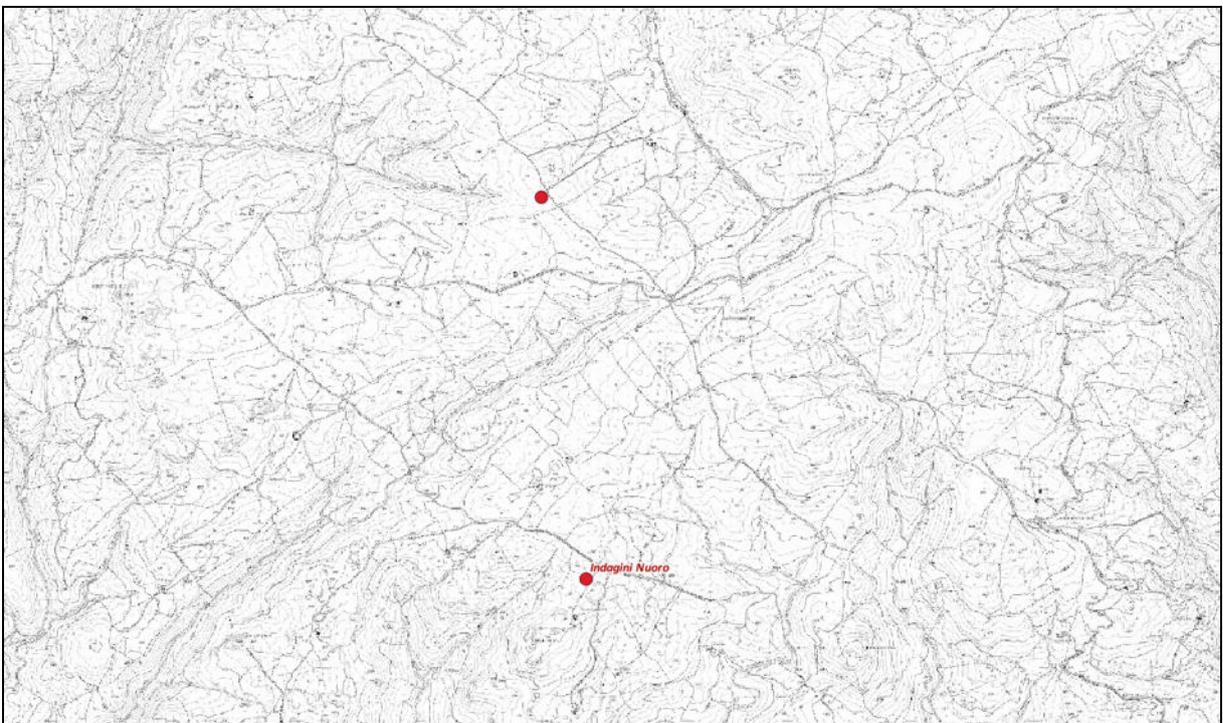


Figura 3 - Stralcio Carta C.T.R. – Sez. 499-030

2.0 CARATTERISTICHE DELLA CAMPAGNA GEOGNOSTICA

L'indagine è stata articolata come segue:

- esecuzione di n. 1 sondaggio a rotazione a carotaggio continuo (\varnothing 101 mm), spinto a profondità di 10.00 m dal p.c.;
- prelievo di spezzoni di carota lapidea da sottoporre a prove Point Load;
- prospezione geofisica con n. 1 stendimento con metodologie sismica a rifrazione e MASW.

3.0 SONDAGGI GEOGNOSTICI

È stato eseguito n.1 sondaggio a rotazione con carotaggio continuo, di diametro 101 mm, spinto alla profondità massima di 10.00 metri dal p.c.. Per la realizzazione del carotaggio continuo sono state utilizzate le seguenti attrezzature:

- Sonda idraulica cingolata EGT, modello VD710;
- Carotiere semplice con corone *widia* \varnothing 101 mm;
- Carotiere doppio T6 con corona diamantata;
- Cassette catalogatrici monostampo in PVC.

La tabella sottostante riporta l'identificativo del sondaggio e la profondità raggiunta (**Tab.1**).

Area	ID Sondaggio	Profondità (m)
WGT010	S 10	10.00

Tab. 1 - Sondaggi e profondità raggiunte

La perforazione è stata eseguita con sonda cingolata idraulica, a rotazione EGT VD710.

Per l'avanzamento della perforazione, nei livelli non lapidei, sono stati utilizzati carotieri semplici, costituiti da un tubo metallico cilindrico avente diametro di 101 mm e lunghezza pari a 1.50 m, munito all'estremità inferiore di una corona in carburo di tungsteno (*widia*) e provvisto,

nella parte sommitale, di un dispositivo (valvola di ritenzione) che impedisce la perdita dei campioni di terreno prelevati. Nei livelli lapidei è stato utilizzato il carotiere doppio T6 con corona diamantata.

Le carote estratte durante le perforazioni sono state riposte in cassette monostampo in PVC, dotate di coperchio, per lunghezze di 5 ml cadauna, opportunamente siglate e fotografate.

L’ubicazione dei sondaggi geognostici eseguiti è riportata nell’**Allegato 1 - Planimetria ubicazione indagini**.

L’**Allegato 2 – Report fotografico** riporta le foto delle cassette catalogatrici e dei posizionamenti, mentre le **stratigrafie dei sondaggi** sono riportate nell’**Allegato 3**.

4.0 POINT LOAD TEST

Durante l’esecuzione dei sondaggi sono stati prelevati vari spezzoni di roccia lapidea da sottoporre a prove Point Load, eseguite da personale specializzato dell’impresa.

La tabella alla pagina seguente (**Tab.2**) riporta l’elenco dei campioni prelevati, la profondità di prelievo, la tipologia di campione e le relative prove.

ID Campione	Quota (m)	Prova
S 10 – C1	3.75-4.00	Point Load Test
S 10 – C2	5.50-5.65	Point Load Test
S 10 – C3	7.60-7.75	Point Load Test

Tab. 2 - Elenco campioni e tipo di prova geotecnica eseguita

I blocchi utilizzati per l’esecuzione della prova rispondono al requisito geometrico

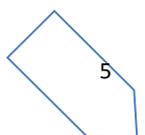
$$0,3W < D < W \quad \text{e} \quad L/D = 0,30 \pm 1$$

essendo:

D = distanza dei punzoni a contatto

W = larghezza del campione perpendicolarmente alla direzione di carico

L = distanza tra i punti di contatto e la più vicina estremità libera



È stata utilizzata la seguente apparecchiatura: Pressa Point Load digitale CONTROLS mod. 45-D0550/D matr.06053686 (**Foto 1**), applicando le Norme di riferimento: ASTM D5731, Raccomandazioni ISRM.



Foto 1 - Esecuzione delle prove Point load

La resistenza al punzonamento (Point Load Strength Index) è data dalla seguente espressione:

$$IS = (P \times 1000)/DE^2$$

IS (MPa) = Point Load Strength Index

P (kN) = Resistenza massima a rottura

DE (mm) = Equivalent Core Diameter

$$DE^2 = 4 * (A/\pi)$$

dove $A = W * D$ rappresenta la minima superficie del fascio di piani passante attraverso i punti di contatto delle punte

Il valore IS deve essere corretto per rapportarlo a provini con \varnothing 50 mm, come segue:

$$IS_{50} = F \times IS \qquad F = (DE/50)^{0,45}$$

Per ottenere una stima della resistenza a compressione monoassiale S_u si dovrà moltiplicare il valore IS_{50} per un coefficiente di correlazione K , variabile in funzione del litotipo testato, come dalla seguente formula:

$$S_u = IS_{50} \times K$$

La tabella alla pagina seguente riporta i valori di K per i vari litotipi.

LITOTIPO	K
Rocce effusive	22
Rocce intrusive	18
Rocce sedimentarie a grana grossa	18
Rocce sedimentarie a grana fine	8
Rocce metamorfiche a basso metamorfismo	18-24
Rocce metamorfiche a medio metamorfismo	16-19
Rocce metamorfiche ad alto metamorfismo	14

Valori del coeff. di correlazione K (Bruschi, 2004)

Esaminate le litologie dei campioni in esame, per ogni campione sono stati utilizzati coefficienti di correlazione K adeguati al litotipo più rappresentativo, come indicato nella **Tab.4**, che riporta i risultati delle prove eseguite.

In accordo a *Brown E.T., Rock characterization, testing and monitoring-ISRM suggest methods*, per ogni campione è stata definita la classe di resistenza, con riferimento alla tabella alla pagina seguente.

CLASSE [*]	DESCRIZIONE	RESISTENZA A COMPRESSIONE MONOASSIALE (MPa)	INDICE DI RESISTENZA (POINT LOAD) (MPa)	VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA IN SITO	ESEMPI
R6	Resistenza estremamente elevata	>250	>10	Un campione può essere solamente scheggiato con un martello geologico	Basalto intatto, selce, diabase, gneiss, granito, quarzite
R5	Resistenza molto elevata	100-250	4-10	Un campione richiede molti colpi di un martello geologico per essere fratturato	Anfibolite, arenaria, basalto, gabbro, gneiss, granodiorite, calcare, marna, riolite, tufi
R4	Resistenza elevata	50-100	2-4	Un campione richiede più di un colpo di un martello geologico per essere fratturato	Calcare, marna, fallite, arenaria, scisto, argillite
R3	Resistenza media	25-50	1-2	Non può essere raschiato o spellato con un coltellino, un campione può essere fratturato con un solo colpo di un martello geologico	Argillite, carbone, calcestruzzo, scisto, siltite
R2	Resistenza bassa	5-25	[**]	Con difficoltà può essere spellato con un coltellino, una intaccatura superficiale può essere procurata con un colpo inferto mediante la punta di un martello geologico	Calcare bianco, salgemma
R1	Resistenza molto bassa	1-5	[**]	Si frantuma per effetto di alcuni colpi con la punta di un martello geologico, può essere spellato mediante un coltellino	Rocce estremamente alterate
R0	Resistenza estremamente bassa	0.25-1	[**]	Intagliato con l'unghia di un pollice	Miloniti, cataclasi

[*] In accordo a Brown E.T. (1981), Rock characterization, testing and monitoring. ISRM suggested methods, pp. 171-183, Oxford Pergamon.
 [] La prova meccanica point load su rocce con resistenza a compressione monoassiale inferiore a 25 Mpa fornisce risultati poco attendibili

La tabella seguente (**Tab.3**) riporta i risultati delle prove eseguite.

ID sondaggio	Profondità	Tipo di rottura	P	Is	Is(50)	K	Su	Litologia	Classe
	<i>m</i>		<i>kN</i>	<i>MPa</i>	<i>MPa</i>		<i>MPa</i>		
S 10	3.75-4.00	D	5.55	0.77	0.98	18.00	17.56	Granito	R2
S 10	5.50-5.65	D	6.81	0.94	1.20	18.00	21.55	Granito	R2
S 10	7.60-7.75	D	18.24	2.52	3.21	18.00	57.71	Granito	R4

Tab. 2 - Prove Point Load

(Tipo di rottura: D = Diametrica; S = Scistosità; GL = Giunto latente)

Il campione intatto, in accordo a *Brown E.T., Rock characterization, testing and monitoring-ISM suggest methods*, ha dunque resistenza da bassa a elevata. I valori di resistenza bassi sono riconducibili alla porzione di roccia più alterata, mentre i valori di resistenza più elevati sono riferiti alla roccia sana.

5.0 INDAGINE GEOFISICA

È stato richiesto di impiegare le tecniche d'indagine sismiche a rifrazione e MASW con la realizzazione di n. 1 stendimento le cui caratteristiche principali sono riassunte nella tabella seguente (**Tab.4**).

Area	Sigla stendimento	Intervallo geofoni (m)	Lunghezza (m)
WGT07	R1/M1	2.00	46.00

Tab. 4 Caratteristiche principali degli stendimenti sismici

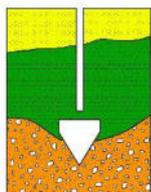
Il metodo sismico a rifrazione è un metodo non invasivo che si basa sulla misura dei tempi di primo arrivo delle onde sismiche (P o S), generate in superficie da una sorgente sismica e captate da ricevitori disposti lungo uno stendimento a diverse distanze dalla sorgente. I tempi di primo arrivo, correlati alle distanze sorgente-ricevitore, permettono la ricostruzione del modello stratigrafico del terreno.

L'indagine sismica attiva con tecnica MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva, che attraverso la definizione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali Vs, è in grado di ricostruire una sismostratigrafia atta a permettere la definizione della categoria di suolo ai sensi del Decreto 17/01/2018.

Le risultanze dell'indagine sono descritte nell'**Allegato 4 – Indagine geofisica**.

Cagliari, 25.01.2022

L'Impresa
Dr. Marcello Piras
Direttore Tecnico
Impresa Dr. Antonello Angius
Via Italia, 143 - 09134 CAGLIARI



DR. ANTONELLO ANGIUS

Web site: www.angiusgeo.com

**INDAGINI GEOGNOSTICHE, PROVE GEOTECNICHE, MONITORAGGIO AMBIENTALE,
PROSPEZIONI MINERARIE, CONSOLIDAMENTI, POZZI PER ACQUA, PROSPEZIONI
GEOFISICHE**

Tel/Fax: +39 070 40 32 74

Pec: angiusgeo@pec.it

e-mail: angiusgeo@tiscali.it

Progetto:

Indagini geognostiche per la realizzazione di un impianto eolico in agro di Nuoro

Committente:

Dr. Geol. Francesca Demurtas

Planimetria ubicazione indagini

ALLEGATO 1

TAVOLA 1

PLANIMETRIA GENERALE UBICAZIONE INDAGINI

Comune di Nuoro

Progetto: "Indagini geognostiche per la realizzazione di un impianto eolico in agro di Nuoro"

LEGENDA

- Sondaggio geognostico
- Stendimento sismico a rifrazione e MASW
- Sito di indagine

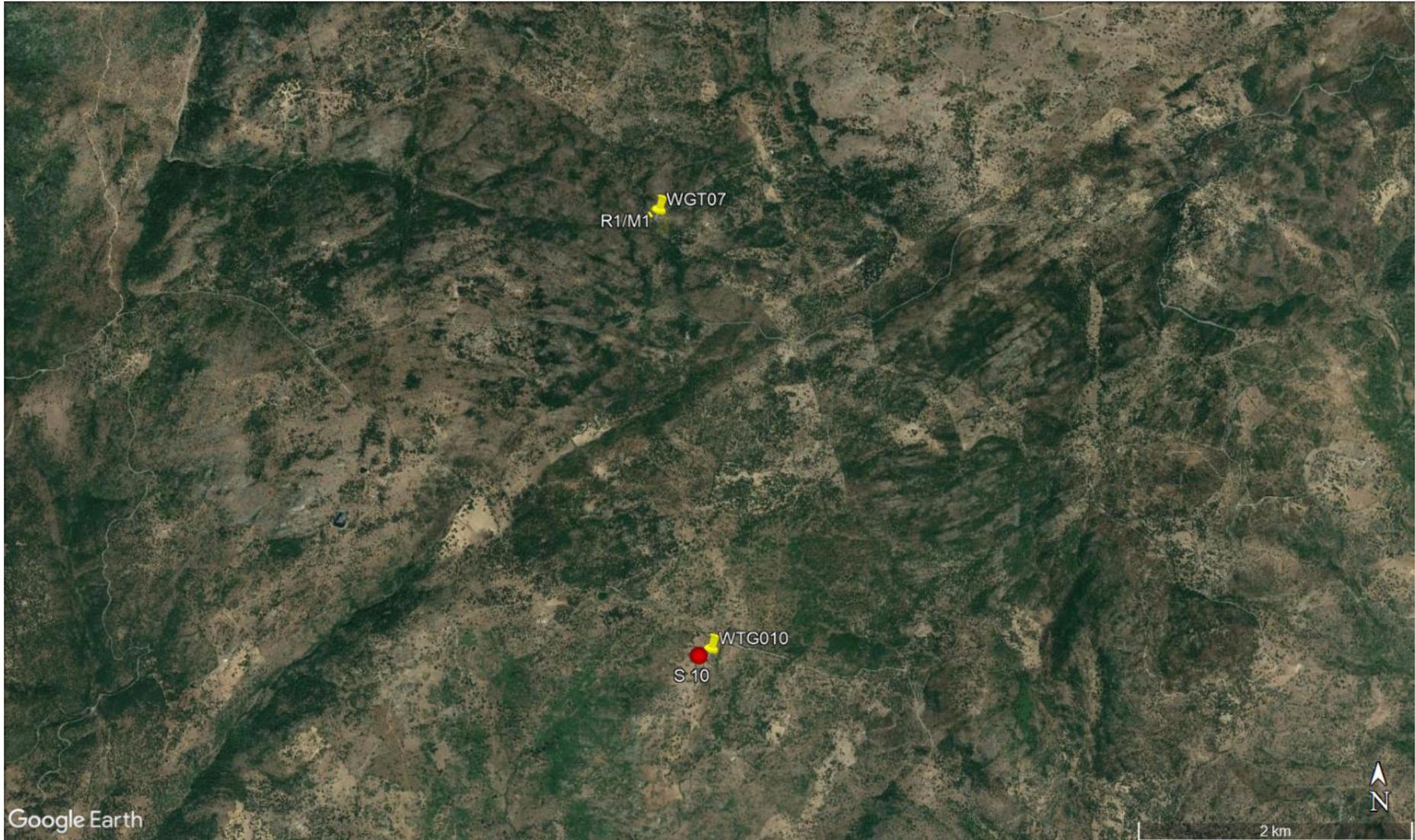


TAVOLA 2

PLANIMETRIA DI DETTAGLIO UBICAZIONE INDAGINI GEOFISICHE

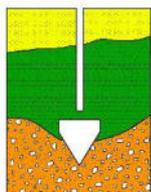
Comune di Nuoro

Progetto: "Indagini geognostiche per la realizzazione di un impianto eolico in agro di Nuoro"

LEGENDA

- Sondaggio geognostico
- Stendimento sismico a rifrazione e MASW
- ➔ Direzione dello stendimento (Lunghezza G1-G24 = 46,00 m)





DR. ANTONELLO ANGIUS

Web site: www.angiusgeo.com

**INDAGINI GEOGNOSTICHE, PROVE GEOTECNICHE, MONITORAGGIO AMBIENTALE,
PROSPEZIONI MINERARIE, CONSOLIDAMENTI, POZZI PER ACQUA, PROSPEZIONI
GEOFISICHE**

Tel/Fax: +39 070 40 32 74

Pec: angiusgeo@pec.it

e-mail: angiusgeo@tiscali.it

Progetto:

Indagini geognostiche per la realizzazione di un impianto eolico in agro di Nuoro

Committente:

Dr. Geol. Francesca Demurtas

Report fotografico

ALLEGATO 2



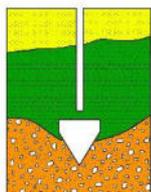
Posizionamento sondaggio S 10



Sondaggio S 10, 0.00 – 5.00 m



Sondaggio S 10, 5.00 – 10.00 m



DR. ANTONELLO ANGIUS

Web site: www.angiusgeo.com

**INDAGINI GEOGNOSTICHE, PROVE GEOTECNICHE, MONITORAGGIO AMBIENTALE,
PROSPEZIONI MINERARIE, CONSOLIDAMENTI, POZZI PER ACQUA, PROSPEZIONI
GEOFISICHE**

Tel/Fax: +39 070 40 32 74

Pec: angiusgeo@pec.it

e-mail: angiusgeo@tiscali.it

Progetto:

Indagini geognostiche per la realizzazione di un impianto eolico in agro di Nuoro

Committente:

Dr. Geol. Francesca Demurtas

Stratigrafie dei sondaggi

ALLEGATO 3

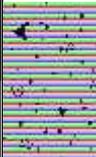
Ditta DR. ANTONELLO ANGIUS

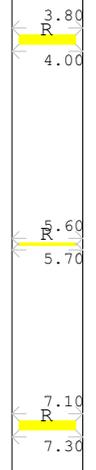
Via Italia, 143 Cagliari 09134

angiusgeo@tiscali.it www.angiusgeo.com

SONDAGGI GEOGNOSTICI - MONITORAGGIO AMBIENTALE

Committente Abbanoa S.p.a.	Profondità raggiunta -10.00	Quota Ass. P.C.	Certificato n° 1	Pagina 1						
Operatore Michele Anedda	Indagine Geognostica	Cantiere EOLICO NUORO		Inizio/Fine Esecuzione 10.01.2022						
Responsabile Dott. Geol. Antonello Angius	Sondaggio S 10	Tipo Carotaggio Rot. car. cont. 101mm	Tipo Sonda EGT VD710	Coordinate X Y						
Scala (mt)	Litologia	Descrizione	Quota	%Carotaggio R.Q.D.	S.P.T.	Pocket Test Kg/cmq	Vane Test Kg/cmq	Campioni	Metodo Perforazione	Falda

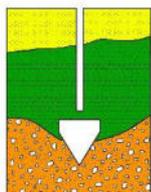
1		Suolo sabbioso, da bruno a marrone.	0.60							
2		Granito totalmente arenizzato, da nocciola a beige chiaro, parzialmente ossidato, da addensato a semilapideo.	2.30							
3		Granito arenizzato, semilapideo con intervalli lapidei, beige-marroncino, ossidato.	3.70							
4		Granito lapideo, grigio, poco fratturato (solo tra -5.00 e 5.40 metri è presente un livello molto fratturato ossidato e debolmente alterato). Giunti obliqui o molto inclinati, scabri, serrati.	10.00							
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										



Campioni: S-Pareti Sottili, O-Osterberg, M-Mazier, R-Rimaneggiato, Rs-Rimaneggiato da SPT
 Perforazione: CS-Carotere Semplice, CD-Carotere Doppio, EC-Elica Continua
 Prove SPT: PA-Punta Aperta, PC-Punta Chiusa
 Carotaggio/Rot. car. cont. 101mm

Sonda EGT VD710

Responsabile



DR. ANTONELLO ANGIUS

Web site: www.angiusgeo.com

**INDAGINI GEOGNOSTICHE, PROVE GEOTECNICHE, MONITORAGGIO AMBIENTALE,
PROSPEZIONI MINERARIE, CONSOLIDAMENTI, POZZI PER ACQUA, PROSPEZIONI
GEOFISICHE**

Tel/Fax: +39 070 40 32 74

Pec: angiusgeo@pec.it

e-mail: angiusgeo@tiscali.it

Progetto:

Indagini geognostiche per la realizzazione di un impianto eolico in agro di Nuoro

Committente:

Dr. Geol. Francesca Demurtas

Indagine geofisica

ALLEGATO 4

Sommario

1	PREMESSA.....	2
2	PROGRAMMA DELLE INDAGINI SVOLTE	2
3	SISMICA A RIFRAZIONE	3
3.1	Strumentazione utilizzata	4
3.2	Elaborazione dei dati.....	4
3.3	Valutazione della escavabilità delle rocce	5
4	INDAGINI SISMICHE MASW.....	7
4.1	Tecnica e parametri utilizzati	7
4.2	Strumentazione utilizzata	8
4.3	Elaborazione dei dati.....	8
4.4	CATEGORIE DI SOTTOSUOLO - D.M. 19.01.2018 (NTC 2018)	10
4.5	VALORI DI VELOCITÀ DELLE ONDE P ED S PER I PRINCIPALI LITOTIPI	12
4.6	DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI DI DEFORMAZIONE E DI RESISTENZA AL TAGLIO DALLE INDAGINI SISMICHE.....	13
5	INTERPRETAZIONE DEI DATI: RIFRAZIONE	15
5.1	Rifrazione R1	15
6	INTERPRETAZIONE DEI DATI: MASW.....	17
6.1	MASW M1	17
7	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE.....	19

Allegati:

- Tavola 1. Planimetria generale ubicazione indagini;
- Tavola 2. Planimetria di dettaglio ubicazione indagini geofisiche;
- Allegato A. Sismica a rifrazione in onde P: Copertura dei raggi sismici – Sezione tomografica in onde P;
- Allegato B. MASW: Sismogramma acquisiti- spettri velocità di fase/frequenza - Curve di dispersione sperimentali e calcolate con profilo Vs;
- Allegato C. Documentazione fotografica.

1 PREMESSA

La presente Relazione descrive le attività di indagine geofisica realizzate nell’ambito del progetto per la realizzazione di un impianto eolico in agro di Nuoro.

La prospezione geofisica è stata realizzata impiegando la metodologia sismica con le tecniche MASW e rifrazione in onde P.

L’indagine sismica con metodologia MASW si pone come obiettivo la ricostruzione dell’assetto sismo-stratigrafico dei terreni sede di posa delle opere di fondazione nonché la classificazione del suolo di fondazione per le categorie semplificate indicate nel Decreto 17 gennaio 2018 - NTC 2018 aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni".

L’indagine sismica a rifrazione con acquisizione ed elaborazione tomografica in onde longitudinali (P) permette di ricostruire l’andamento stratigrafico, nel senso di spessori elastomogenei, del terreno investigato.

A supporto della progettazione geotecnica e strutturale, tramite l’indagine MASW, sono stati determinati sulla base di correlazioni bibliografiche i parametri elasto-dinamici derivati dalle indagini sismiche e il modulo statico di deformazione.

Come richiesto dalla committenza è stato realizzato n° 1 stendimento MASW e di sismica a rifrazione in onde, realizzato in data 17 Gennaio 2022.

Fanno parte integrante della presente relazione i seguenti allegati:

- Tavola 1. Planimetria generale ubicazione indagini;
- Tavola 2. Planimetria di dettaglio ubicazione indagini geofisiche;
- Allegato A. Sismica a rifrazione in onde P: Copertura dei raggi sismici – Sezione tomografica in onde P;
- Allegato B. MASW: Sismogramma acquisiti- spettri velocità di fase/frequenza - Curve di dispersione sperimentali e calcolate con profilo Vs;
- Allegato C. Documentazione fotografica.

2 PROGRAMMA DELLE INDAGINI SVOLTE

Le prospezioni geofisiche sono state articolate secondo il seguente programma:

1. Verifica preliminare dei luoghi oggetto d'indagine;
2. Esecuzione, di n°1 stendimento di sismica con tecnica MASW e sismica a rifrazione (R1/M1);
3. Rilievo topografico di tutti i punti di misura (geofoni, punti di shot) e restituzione dei profili altimetrici da impiegare nelle sezioni sismiche;
4. Elaborazione dei dati tramite analisi delle prospezioni acquisite in campagna, applicazione filtri, e restituzione grafica delle sezioni sismiche con l’impiego di software specialistici.

L’ubicazione dello stendimento è indicata nella **Tavola 1**.

Nella tabella seguente si riporta il quadro riassuntivo delle indagini svolte, con le sigle identificative, per gli stendimenti la direzione di esecuzione (da geofono iniziale a quello finale) e la loro lunghezza complessiva.

Tabella 1. Quadro riassuntivo delle indagini MASW e a rifrazione

Stendimento	Orientamento	Lunghezza [m]
R1/M1	NNW-SSE	46.00

3 SISMICA A RIFRAZIONE

In ambito d'indagini indirette l'esplorazione geofisica di sismica a rifrazione in onde P risulta tra le metodologie più affermate e meglio sperimentate. Il metodo si basa sugli effetti di rifrazione del segnale sismico in corrispondenza dell'interfaccia tra un mezzo soprastante a velocità sismica minore rispetto ad uno strato sottostante al primo con velocità sismica superiore.

La tecnica di prospezione sismica a rifrazione consiste nella misura dei tempi di primo arrivo delle onde sismiche generate in un punto in superficie (punto di energizzazione/sparo), in corrispondenza di una molteplicità di ricevitori (geofoni) disposti allineati sulla superficie topografica.

Varie metodologie di interpretazione si sono susseguite nel tempo, passando dalle valutazioni di spessori e velocità in funzione del tempo all'intercetta fino a giungere alle più classiche interpretazioni mediante il General Reciprocal Method di Palmer '72.

Lo studio della propagazione delle onde sismiche consente di valutare le proprietà fisico - meccaniche dei terreni e il grado di addensamento e/o la compattezza dei materiali da queste attraversati.

Le profondità raggiunte sono al massimo la metà della distanza compresa tra lo shot esterno e l'ultimo geofono della stesa sismica sviluppata. È comunque generalmente assunto che la profondità esplorata non superi 1/3 dello sviluppo geometrico sopradescritto. La capacità risolutiva in termini di spessore degli strati sismici viene ad essere valutata in circa il 25÷30% della distanza geofonica.

Nel caso in esame, in funzione della lunghezza dello stendimento sono state eseguite 9 energizzazioni-shot al fine di meglio descrivere la geometria degli orizzonti rifrattori lungo l'intera base sismica, come meglio specificato nello schema di seguito rappresentato.

Schema delle acquisizioni di sismica a rifrazione R1



Schema 1: Stendimento di sismica a rifrazione R1 in onde P con 24 geofoni e interdistanza di 2 m

3.1 Strumentazione utilizzata

Per l'esecuzione del cantiere d'interesse, è stata impiegata una strumentazione di acquisizione modello GEA24, prodotto dalla PASI Geophysics, con frequenza di campionamento 1500 Hz per ognuno dei canali registrati, ciascuno attrezzato con geofoni verticali e orizzontali della PASI Geophysic con frequenza propria di 4,5 e 8 Hz. Il numero di canali è risultato pari a n° 24 per tutte le basi sismiche.

Per l'energizzazione ci siamo avvalsi di una mazza battente da 10 kg impattante verticalmente su piastra di battuta in duralluminio, diametro 18 cm, spessore 4 cm, peso 2 kg.

La quota relativa di ciascun geofono-shot è stata rilevata tramite una livella digitale in modo da poter ricostruire la morfologia del terreno e utilizzarla in fase di elaborazione dei dati acquisiti, mentre la quota assoluta è stata rilevata con GPS differenziale in corrispondenza dei geofoni G1 e G24, di riflesso tutte le quote assolute dei geofoni sono state calcolate in riferimento alle quote assolute note.

3.2 Elaborazione dei dati

I dati delle prospezioni sono costituiti dalla geometria d'acquisizione (posizioni e quote relative dei punti scoppio e dei geofoni) e dai tempi di primo arrivo delle onde elastiche di compressione (onde P), determinati manualmente sulle registrazioni riprodotte a schermo (picking dei primi arrivi).

La qualità dei dati è risultata in genere medio-buona e il picking è stato realizzato facilmente quanto meno per i geofoni non troppo lontani dalla sorgente di energizzazione.

L'elaborazione e la seguente modellizzazione dei dati è stata eseguita mediante i programmi INTERSISM 2.1 della Geo&Soft International e può essere riassunta nelle seguenti fasi fondamentali:

Aggiornamento delle headers e creazione dei database. In questa fase vengono caricati i sismogrammi e impostate le caratteristiche dello stendimento: quote, offset ecc. . Questo stadio è uguale sia per lo studio delle onde P che per le onde S essendo identico lo stendimento.

Picking dei primi arrivi per le tracce delle onde P e S. Prima di questa fase, se presente, vengono adottati dei filtri per eliminare o ridurre eventuali rumori o segnali non ritenuti utili.

Ricostruzione e traslazione delle dromocrone.

Modellizzazione e calcolo di un profilo del sottosuolo mediante il Metodo Reciproco Generalizzato GRM o/e Plus Minus.

Simulazione e inversione mediante il software SMARTOMO che utilizzando la tecnica WET, crea un modello del sottosuolo derivante da progressivi aggiustamenti, con iterazioni successive, del modello iniziale.

Modellizzazione e calcolo di un profilo del sottosuolo mediante piccoli aggiustamenti fino a un modello compatibile con la geologia del sito. Gli elaborati ottenuti dall'indagine, considerando le caratteristiche geologiche della zona, sono stati rappresentati mediante un scala cromatica che per le onde P è stata suddivisa in fasce di velocità comprese tra 400 m/s e 5000 m/s

Fra una fase e l'altra vengono eseguiti dei controlli tali da garantire la qualità e la congruenza fra il modello di sottosuolo ottenuto e la geologia nota (stratigrafia e caratteristiche geotecniche).

Le sezioni sismiche ottenute dalla modellizzazione e interpretazione dei segnali acquisiti (riportati mediante sezioni litosismografiche) permettono di individuare le principali unità geologiche.

Si ricorda che le tecniche di geofisica applicata hanno un margine intrinseco di errore dovuto a:

- Limiti della modellizzazione dell'ambiente naturale non sempre coerente (esempio stratipiano-paralleli).
- Rumori di vario genere: cavi elettrici, mezzi vari, vento. Rumore dovuto alla strumentazione esempio: contatti dovuti all'umidità, rumore termico ecc., basso rapporto segnale/rumore dovuto alle caratteristiche della sorgente.
- Limite della tecnica adottata. Nel caso in esame (sismica a rifrazione) la risoluzione del metodo non permette la determinazione di spessori inferiori al metro e le velocità Vs e Vp sono da considerare come la media dell'unità individuata.

3.3 Valutazione della escavabilità delle rocce

Per escavabilità o rippabilità s'intende la facilità con cui un terreno o una roccia possono essere scavati meccanicamente e dipende, secondo la letteratura tecnica, da diversi fattori della roccia quali la resistenza a compressione monoassiale, il grado di fratturazione, la spaziatura delle discontinuità, la velocità di propagazione delle onde sismiche, le caratteristiche delle discontinuità (apertura, continuità, grado di alterazione, etc) nonché dalle caratteristiche proprie dei mezzi di scavo.

Il ripping è di solito eseguito da un mezzo meccanico (dozer) opportunamente attrezzato e le cui dimensioni sono determinate dalla durezza e compattezza dei materiali da abbattere. La roccia che risultasse troppo difficile per essere strappata a causa della mancanza di superfici interne di debolezza, viene generalmente frammentata con altri metodi (tra cui l'uso del martello demolitore e l'uso dell'esplosivo) e per questo definita "roccia da mina".

In genere, la rippabilità può essere desunta direttamente dal valore della velocità delle onde sismiche superficiali misurate in sito attraverso la prospezione sismica a rifrazione (onde P, longitudinali). Tale metodo risulta forse il più speditivo ed esaustivo poiché indirettamente tiene conto anche di altri fattori e caratteristiche della roccia.

In letteratura sono disponibili numerosi studi volti a correlare la velocità delle onde sismiche con le caratteristiche di scavabilità e rippabilità degli ammassi rocciosi. Il più conosciuto è quello sintetizzato nella tabella riportata nel "Handbook of Ripping"¹ della Caterpillar che però generalmente risulta eccessivamente "ottimista", nel senso che, ad esempio, ammassi rocciosi con velocità sino a 2200 m/s sono definiti rippabili, quando in realtà richiedono l'uso di martello demolitore.

Una ricerca approfondita nella letteratura internazionale ha permesso di rintracciare correlazioni alternative che, nella pratica risultano più realistiche, soprattutto considerate le attrezzature normalmente utilizzate nelle nostre zone. Esse sono riportate nelle tabelle seguenti e sono quelle utilizzate per le valutazioni successive, permettendo la divisione degli ammassi rocciosi presenti nelle aree indagate nelle seguenti classi:

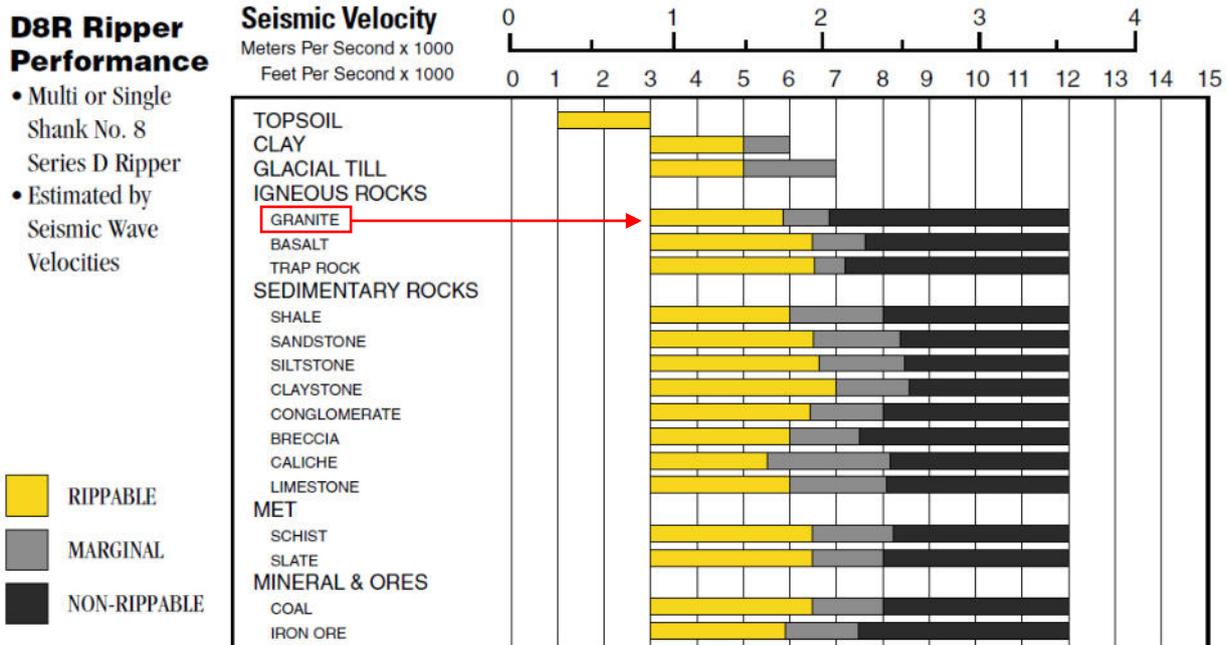
- $V_p < 600$ m/s: ammasso roccioso scavabile;
- $600 < V_p < 1000$ m/s: ammasso facilmente rippabile;
- $1000 < V_p < 1400$ m/s: ammasso rippabile con difficoltà;
- $V_p > 1400$ m/s: ammasso non rippabile (indispensabile l'uso di martello demolitore).

¹twelfth edition - February 2000 - Caterpillar inc - Peoria , Illinois

A titolo esaustivo si riportano anche la correlazione utilizzata dal California Department of Trasportations, che risulta leggermente più ottimista in termini di scavabilità:

<i>Velocity (m/s)</i>	<i>Rippability</i>
<i>< 1050</i>	<i>Easily Ripped</i>
<i>1050 – 1500</i>	<i>Moderately Difficult</i>
<i>1500 – 2000</i>	<i>Difficult Ripping / Light Blasting</i>
<i>> 2000</i>	<i>Blasting Required</i>

nonché la correlazione edita dalla Caterpillar valida per la macchina operatrice D8 Ripper e relativa a varie tipologie di roccia. L'esame del grafico mostra che nel caso in esame (v. "granite") per velocità oltre i 1700 m/s il mezzo meccanico D8 non è più sufficiente e sarà necessario, un mezzo meccanico più grande (D9 o D10) o l'utilizzo di altri metodi di abbattimento quali la demolizione meccanica (nel caso in esame vista l'ubicazione nei pressi di centri abitati si esclude l'uso dell'esplosivo).

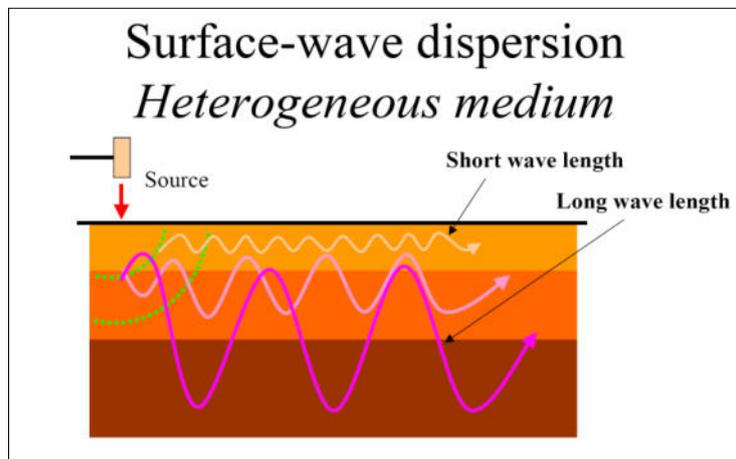


4 INDAGINI SISMICHE MASW

4.1 *Tecnica e parametri utilizzati*

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

Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidezza della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde. In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive, cioè onde con diverse lunghezze d’onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980) o detto in maniera equivalente la velocità di fase (o di gruppo) apparente delle onde di Rayleigh dipende dalla frequenza di propagazione. La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d’onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazioni sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi del suolo.” (da *Caratterizzazione sismica dei suoli con il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves – V. Roma 2006)*). L’indagine svolta ha visto l’applicazione di tecnica M.A.S.W. di tipo attivo, ossia misura del comportamento dei terreni a seguito di un’energizzazione.



da SAGEEP2003

L’indagine si sviluppa mediante la materializzazione sul terreno di una linea retta mediante la posa di una fettuccia metrica. A seguire vengono posizionati i geofoni intervallati ad una distanza pari a 2,0 m in funzione anche della disponibilità di spazio. Esternamente alla stesa geofonica, da ora base sismica, a distanza di interesse che può essere pari ad un multiplo della distanza intergeofonica ma anche variabile (in funzione delle disponibilità di cantiere), sia in andata (ovvero in prossimità del geofono 1) che al ritorno (ovvero all’ultimo geofono posizionato sulla base sismica), vengono svolte delle energizzazioni mediante massa battente pari a Kg 10,0. Nel caso in esame, sono state

svolte le energizzazioni in “andata” e in “ritorno” con distanza dal geofono 1 e dal geofono 24 crescente e pari a multipli della distanza intergeofonica (v. schema).

Il metodo risulta efficace se la base sismica è ubicata su piano a pendenza costante e per una stratificazione piano parallela al piano topografico. Al fine di svolgere al meglio la campagna geofisica M.A.S.W., è utile che lo sviluppo lineare della base sismica sia limitata in lunghezza secondo i siti.

La maggior profondità di caratterizzazione raggiunta è legata alla minor frequenza registrata. Come già indicato nella figura, una frequenza alta caratterizza gli strati superficiali. La registrazione delle frequenze minori è destinata ai geofoni più lontani dalla sorgente.

Il numero di geofoni utile all’esecuzione ottimale di un’indagine M.A.S.W. è risultato, per il cantiere svolto, di 24 geofoni dei quali sono state utilizzate tutte le tracce. Il tempo dell’acquisizione è stato definito tra 1.00 e 2.00 secondi.

Schema 2. Schema geometrico di acquisizione dei dati per lo stendimento M1 di lunghezza L=46.00 m



4.2 Strumentazione utilizzata

Per l’esecuzione del cantiere d’interesse, è stata impiegata una strumentazione di acquisizione modello GEA24, prodotto dalla PASI Geophysics, con frequenza di campionamento 1500 Hz per ognuno dei canali registrati, ciascuno attrezzato con geofoni verticali e orizzontali della PASI Geophysical con frequenza propria di 4,5 Hz. Il numero di canali è risultato pari a n° 24 canali.

Per l’energizzazione ci siamo avvalsi di una mazza battente da 10 kg impattante verticalmente su piastra di battuta in duralluminio, diametro 18 cm, spessore 4 cm, peso 2 kg.

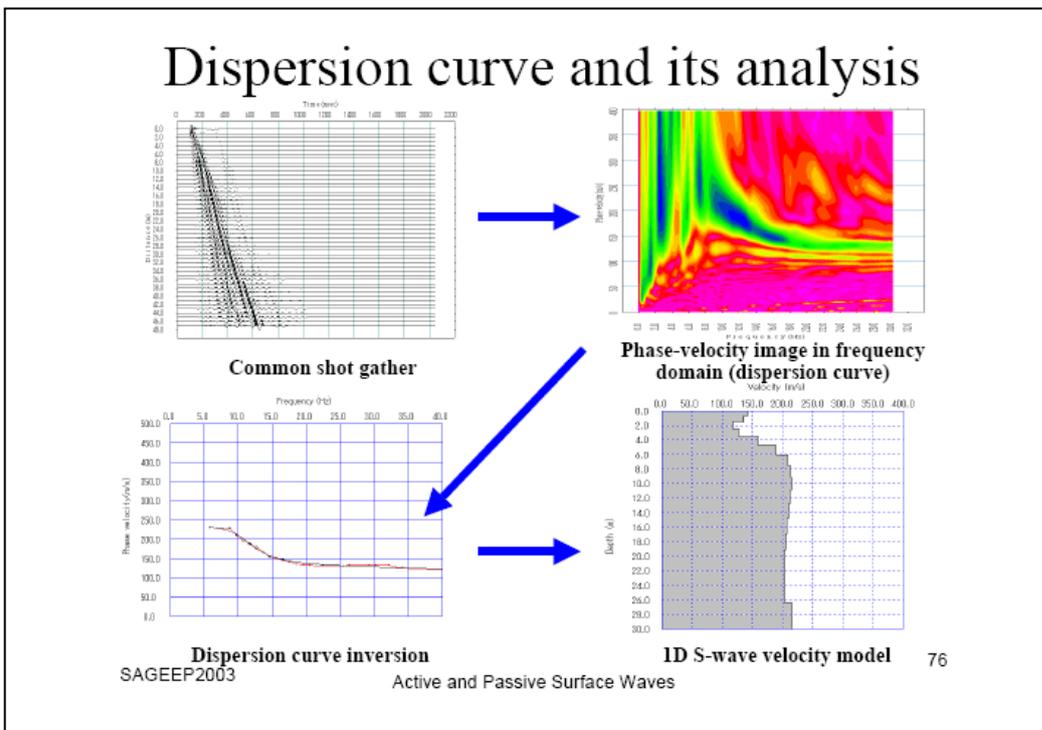
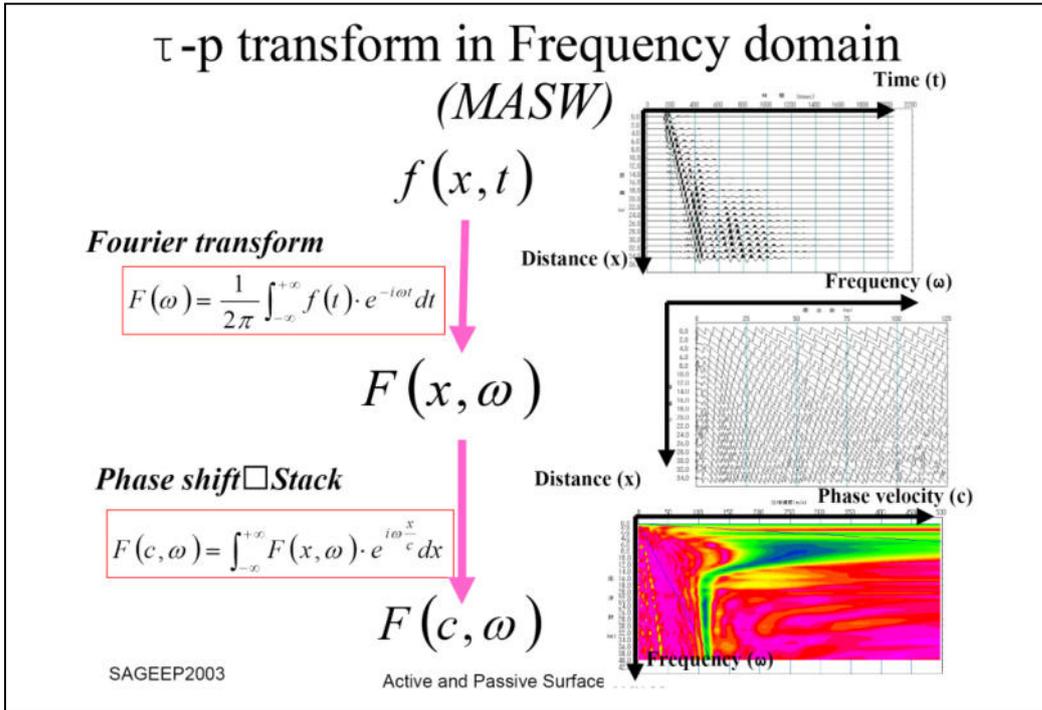
4.3 Elaborazione dei dati

Il metodo interpretativo della M.A.S.W. si compone dei seguenti passaggi di analisi dei segnali acquisiti:

- individuazione della variazione del segnale acquisito nel tempo
- analisi di Fourier con definizione dei contenuti spettrali acquisiti nei segnali
- stacking dello spostamento di fase con definizione delle velocità di rotazione retrograda compatibile con il campo di frequenza definita.

A posteriori dell’analisi matematica del segnale acquisito, definito un modello stratigrafico compatibile con la geologia locale, si provvede all’inversione della curva di dispersione ottenendo la sismo-stratigrafia.

A seguire è indicato il procedimento di elaborazione che ha prodotto il profilo di velocità grazie all’impiego dei software ZondST2D.



4.4 CATEGORIE DI SOTTOSUOLO - D.M. 19.01.2018 (NTC 2018)

Le “Norme Tecniche per le Costruzioni” – Decreto del 19/01/2018 definiscono le regole per progettare l’opera sia in zona sismica che in zona non sismica.

Per la valutazione delle azioni sismiche di progetto deve essere valutata l’influenza delle condizioni litologiche e morfologiche locali sulle caratteristiche del moto nel suolo superficiale.

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 citato Decreto. In alternativa, qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie definite nella Tab. 3.2.II del suddetto decreto, si può fare riferimento a un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio, V_s . I valori dei parametri meccanici necessari per le analisi di risposta sismica locale o delle velocità V_s per l’approccio semplificato costituiscono parte integrante della caratterizzazione geotecnica dei terreni compresi nel volume significativo, di cui al § 6.2.2 del Decreto.

I valori di V_s sono ottenuti mediante specifiche prove, tra le quali le MASW costituiscono la metodologia maggiormente adoperata.

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

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

con:

h_i spessore dell’ i -esimo strato;

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

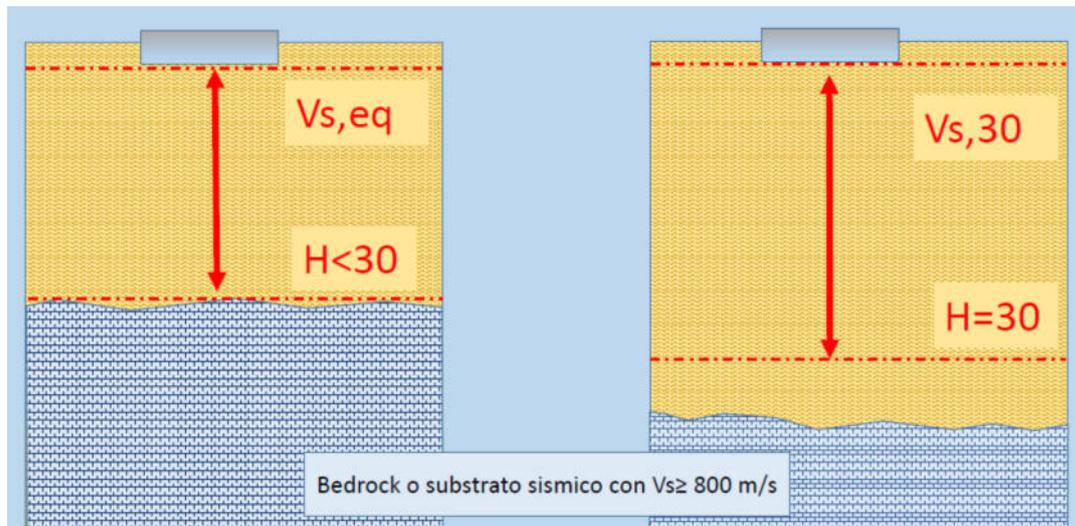
N numero di strati;

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

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

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

Schema di Calcolo delle $V_{s,eq}$ e delle $V_{s,30}$



Le categorie di sottosuolo che permettono l'uso dell'approccio semplificato sono definite in Tab. 3.2.II.

Per queste cinque categorie di sottosuolo, le azioni sismiche sono definibili come descritto al § 3.2.3 delle NTC 2018. Per qualsiasi condizione di sottosuolo non classificabile nelle categorie precedenti, è necessario predisporre specifiche analisi di risposta locale per la definizione delle azioni sismiche.

Tabella 3.2.II. Categorie di sottosuolo (Fonte NTC 2018)

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

4.5 VALORI DI VELOCITÀ DELLE ONDE P ED S PER I PRINCIPALI LITOTIPI

Nella seguente tabella si riportano i valori di velocità delle onde P ed S dei principali litotipi riferibili anche al contesto geologico in esame (Fonte: Hearey e Brooks 1991, Bala et al 2005, Corrao e Coco 2006, bibliografia specialistica reperibile in rete).

Litotipi	Vp [m/s] min-max	Vs [m/s] min-max
TERRENI E ACQUA		
Alluvioni	400 - 2000	200 - 800
Sabbia asciutta	200 - 1000	80 - 400
Sabbia satura (in funzione anche del grado di saturazione)	600 - 2300	250 - 450
Sabbia siltosa	600 - 1900	200 - 600
Sabbia e ghiaia	300 - 1800	300 - 600
Limo	650 - 1250	240 - 480
Argilla	1000 - 2500	300 - 600
Argilla sabbiosa	600 - 2500	200 - 450
Acqua	1450 - 1500	0
ROCCE SEDIMENTARIE		
Argillite	2100 - 4400	550 - 2100
Arenaria	1500 - 6000	950 - 3100
Arenaria fratturate	800 - 2100	360 - 950
Calcarea	2000 - 7000	1000 - 3300
Calcarea fratturato	750 - 1500	330 - 1000
Calcarenite	1400 - 4400	800 - 2500
Calcarenite fratturata	600 - 1300	330 - 800
Marna	1500 - 4500	600 - 1.500
ROCCE IGNEE		
Basalto	1800 - 5000	1000 - 3000
Basalto fratturato	950 - 1350	480 - 700
Granitoidi	1600 - 5000	900 - 3000
Granitoidi fratturati	1000 - 1750	500 - 900
Piroclastite coerente	750 - 2500	350 - 1100
Piroclastite incoerente	350 - 1000	160 - 450

In particolare, si ricorda che le velocità delle onde P misurate per terreni perfettamente saturi ($S_r = 100\%$) dipendono talora in maniera decisiva dalle vibrazioni trasmesse dal fluido interstiziale e non dallo scheletro solido del materiale e perciò tale valore può non essere rappresentativo delle proprietà meccaniche del materiale in questione. Invece le velocità delle onde S sono caratteristiche delle vibrazioni trasmesse prevalentemente dal solo scheletro solido e perciò rappresentative delle proprietà meccaniche del terreno. Ne consegue che per alcuni terreni al di sotto della falda le uniche onde in grado di fornire informazioni precise sulla rigidità del terreno sono quelle di taglio (S).

4.6 DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI DI DEFORMAZIONE E DI RESISTENZA AL TAGLIO DALLE INDAGINI SISMICHE

Di seguito si indicano le correlazioni bibliografiche che possono essere utilizzate per il calcolo dei parametri di deformazione dinamici calcolati tramite correlazione bibliografica dei parametri di input V_p , V_s e densità per ciascun sismostrato definito dalle indagini geofisiche.

$$\text{Coefficiente di Poisson } \nu = \frac{V_p^2 - 2 V_s^2}{2 (V_p^2 - V_s^2)}$$

$$\text{Modulo di Young dinamico } E_d = \gamma V_s^2 [(3V_p^2 - 4 V_s^2)/(V_p^2 - V_s^2)]$$

$$\text{Modulo di taglio (rigidità) } G_0 = \gamma V_s^2$$

$$\text{Modulo di comprimibilità o di Bulk } K = \gamma (V_p^2 - 4/3 V_s^2)$$

Determinazione del modulo di Young statico E_s

Per la determinazione del modulo di Young statico E_s dal modulo dinamico E_d si può applicare la nota relazione proposta da Rzhevsky e Novik (1971) valida per i moduli misurati in MPa o Kg/cm²:

$$E_{\text{stat}} = \frac{E_{\text{din}} - 0.97}{8.3}$$

Per gli ammassi rocciosi la bibliografia specialistica suggerisce di applicare un coefficiente pari a 0,8-1,0 per la roccia integra e un coefficiente via via più basso per quelle fratturate in relazione al grado di fratturazione.

$$E_{\text{stat}} = E_{\text{din}} \times (0.3/1.0)$$

Si sottolinea tuttavia come i valori ottenuti con la suddetta formulazione sia un modulo di elasticità e quindi non può essere utilizzato per determinare ad esempio cedimenti di fondazione quando il carico delle fondazioni dia luogo a elevate deformazioni (superiori al limite di elasticità) poiché in quei casi la componente plastica è predominante su quella elastica.

Correlazioni con N_{spt} e parametri geotecnici

Nella letteratura specializzata sono ormai reperibili moltissime correlazioni tra il numero di colpi (N_{spt}) del Penetrometro Standard e la velocità delle onde di taglio (V_s). Le principali correlazioni sono di tipo esponenziale, con $N_{\text{spt}} = (V_s / \alpha)^\beta$ con i coefficienti α e β variabili in funzione del tipo di terreno. Si ricorda che il numero di colpi di cui si parla è quello necessario per far avanzare di 30 cm nel terreno la punta del campionatore Raymond standard.

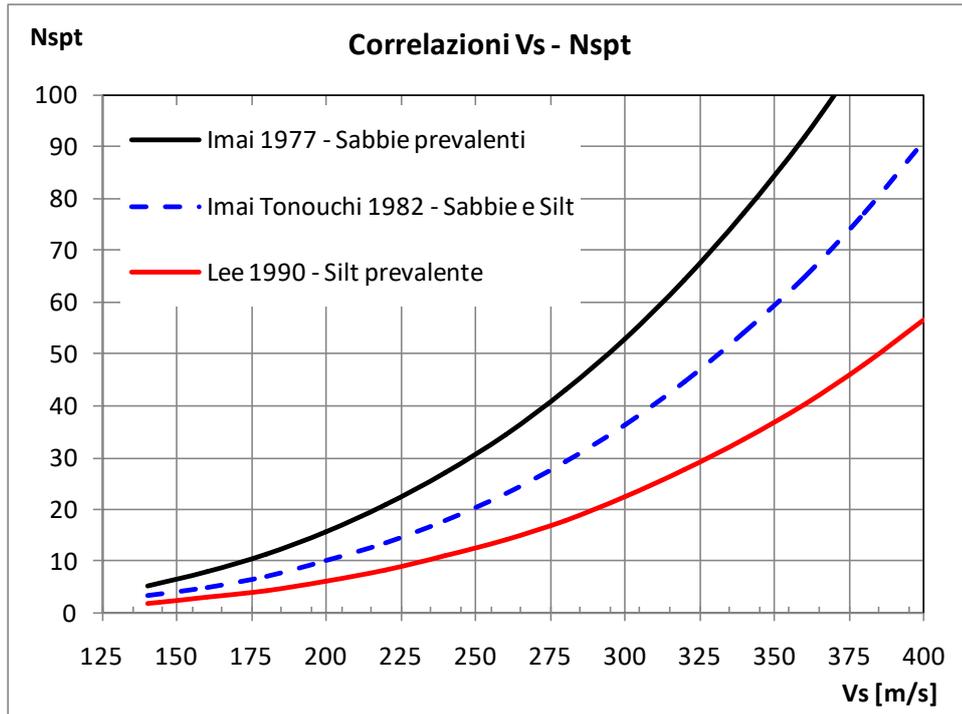
A tale scopo si illustrano le correlazioni proposte da Imai 1977, Imai e Tonuchi (1982) e Lee (1990) valide per tre differenti tipologie di terreni che caratterizzano in genere tutti i terreni:

$$N_{\text{SPT}} = \left(\frac{V_s}{80,6} \right)^{3,021} \text{ valida per i terreni prevalentemente sabbiosi - Imai (1977)}$$

$$N_{\text{SPT}} = \left(\frac{V_s}{97,0} \right)^{3,184} \text{ valida per i terreni misti sabbioso-siltosi - Imai e Tonuchi (1982)}$$

$$N_{\text{SPT}} = \left(\frac{V_s}{114,43} \right)^{3,226} \text{ valida per terreni prevalentemente fini/siltosi - Lee (1990)}$$

Dove: N_{spt} = numero di colpi del Penetrometro Standard e V_s = Velocità delle onde di taglio



Noto il valore di Nspt si calcolano i seguenti parametri geotecnici dei terreni:

Parametri geotecnici	Metodologie – Relazioni
Resistenza al taglio ϕ	<p><u>Terreni sabbiosi</u> Entro i 6 m di profondità- Peck-Hanson&Thornburn, $\phi = 0,28 Nspt + 27,2$ Oltre i 6 m di profondità- Japanese National Railway, $\phi = 0,30 Nspt + 27$</p> <p><u>Terreni: sabbie fini o limose</u> $\phi = \sqrt{15Nspt} + 15$</p>
Modulo di deformazione E (o di Young)	<p>Schmertmann (valido per sabbie e terreni prevalentemente sabbiosi) $E(Kg/cm^2) = 2B Nspt$ dove B=4 (sabbia fine), B=6 (sabbia media), B=10 (sabbia grossolana)</p> <p>D'Appolonia et Alii. (valido per sabbia+ghiaia e sabbie sovraconsolidate) $E (Kg/cm2) = 7,71 Nspt + 191$ (ghiaia + sabbia)</p> <p>Tornaghi(valido per sabbia + ghiaia) $E (MPa) = B SNspt$ (B=7 MPa)</p>

5 INTERPRETAZIONE DEI DATI: RIFRAZIONE

Sulla base delle velocità misurate e dei dati bibliografici, nella sezione tomografica riferita allo stendimento R1, sono stati definiti i seguenti sismostrati:

- **A - Sismostrato A:** Unità delle terre e/o dei graniti arenizzati e/o molto fratturati
- **B - Sismostrato B:** Unità dei graniti lapidei poco fratturati e/o integri

La delimitazione dei sismostrati ha lo scopo principale di distinguere le terre in rocce scavabili e queste da quelle non rippabili. I valori di velocità sono indicativi, e possono presentare delle oscillazioni locali a causa delle variazioni delle caratteristiche dei litotipi. Nei paragrafi precedenti sono state indicate le differenti classificazioni del grado di rippabilità delle rocce. Nel contesto in esame per definire le rocce “rippabili” si ritiene ragionevole impiegare quale valore indicativo di velocità $V_p < 1.250$ m/s.

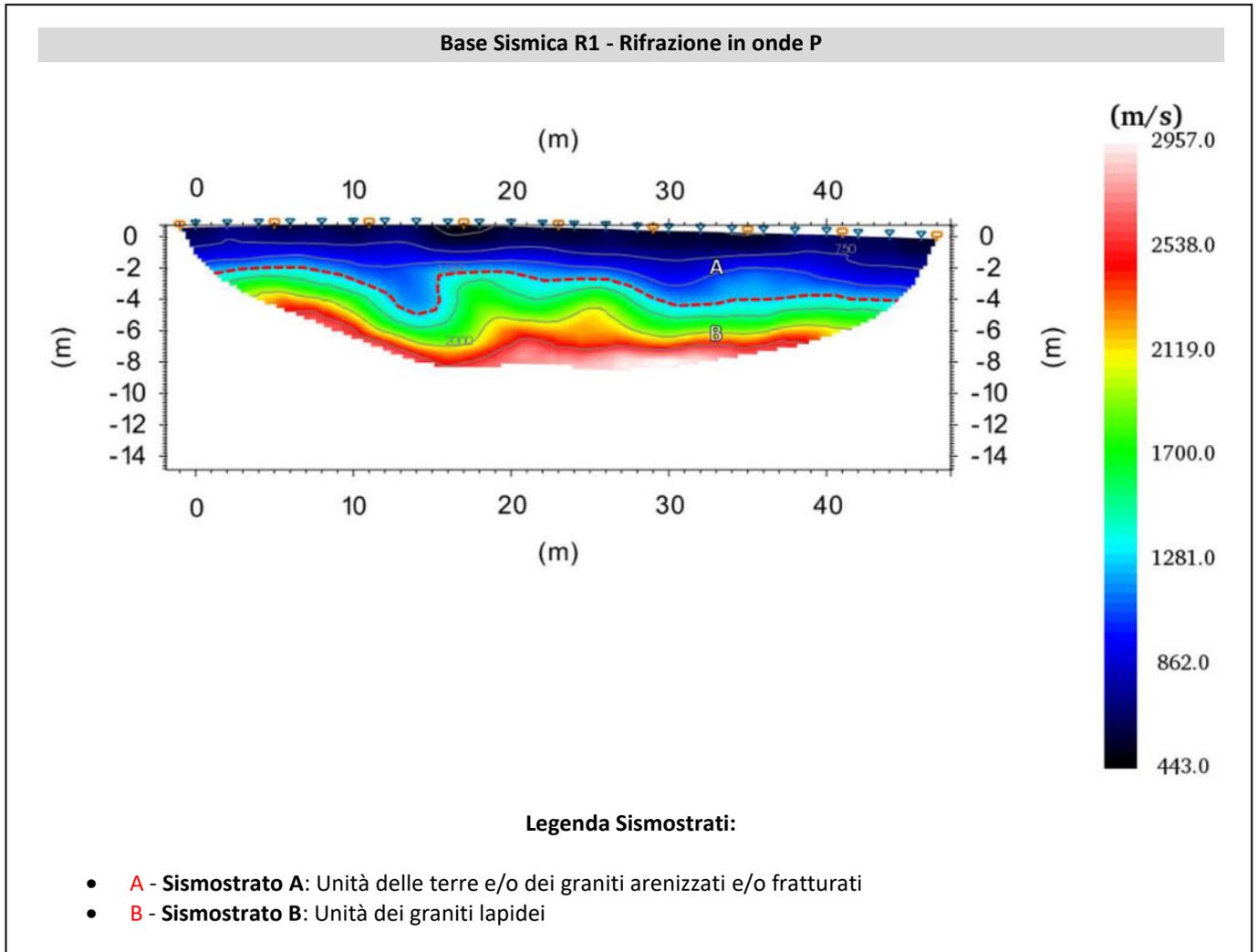
Nelle descrizioni che seguono le profondità sono riferite al piano di campagna e per direzione dello stendimento si intende l’orientamento geografico formato dalla linea che unisce il geofono iniziale con quello finale, che nella planimetria della **Tavola 2** è stato indicato con una freccia.

5.1 Rifrazione R1

Nella **sezione R1** è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

Stendimento R1	ONDE P	
	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
A: Unità delle terre e/o dei graniti arenizzati e/o fratturati	0.00 - 3.00/5.00	450 - 1250
B: Unità dei graniti lapidei poco fratturati e/o integri	3.00/5.00 - 9.00	1250 - 3000

Dall'esame della sezione tomografica R1 si riconoscono 2 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 450 m/s ai 3000 m/s. L'aumentare delle velocità delle onde P è riconducibile al graduale miglioramento delle caratteristiche fisico-meccaniche dei litotipi presenti nel sottosuolo all'aumentare della profondità.



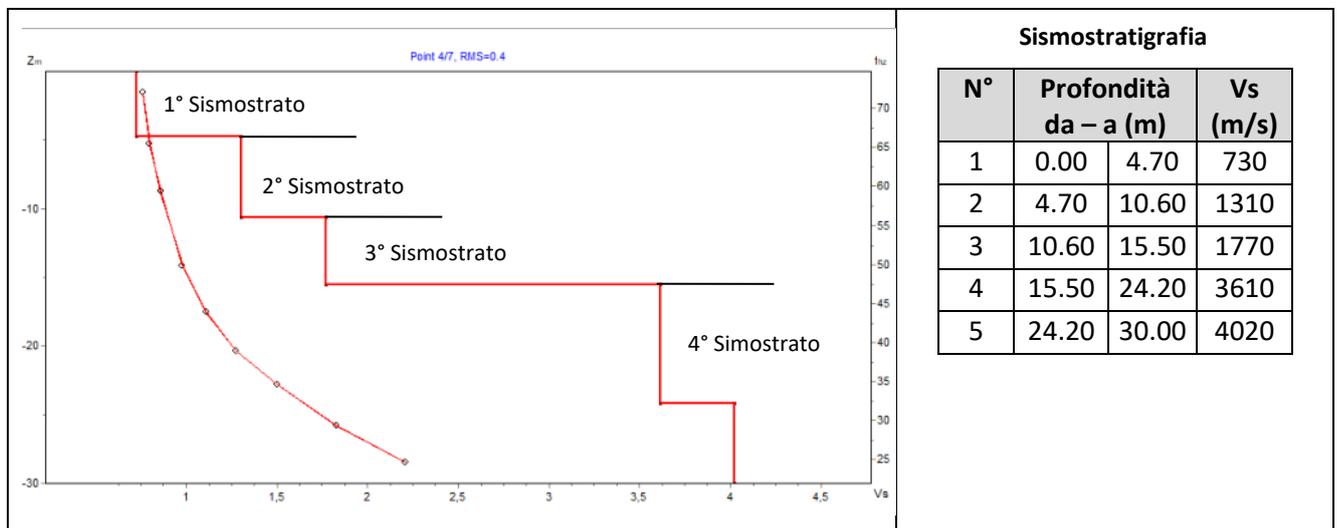
6 INTERPRETAZIONE DEI DATI: MASW

6.1 MASW M1

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs dello stendimento M1, dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati. Si ricorda che si tratta di un profilo medio della velocità di taglio Vs.

Profondità [m sotto il pc]	Descrizione
0.00-4.70	1° sismostrato con Vs di 730 m/s , terre di riporto e/o granito arenizzato e/o molto fratturato
4.70-10.60	2° sismostrato con Vs di 1310 m/s , granito molto fratturato
10.60-15.50	3° sismostrato con Vs di 1770 m/s , granito debolmente fratturato
15.50-30.00	4° sismostrato con Vs tra 3610 e 4020 m/s , granito integro

MASW M1 - PROFILO Vs (V_{seq} da p.c.= 730.0 m/s)



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

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

con:

h_i spessore dell'*i*-esimo strato;

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

N numero di strati;

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

Esaminato il profilo delle Vs la profondità del substrato è posta a **4.70 m dal p.c.** (Vs>800 m/s);

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **4.70 m** di profondità dal p.c. è pari a:

$$V_{S,eq} = \frac{4.70 \text{ m}}{0.00644 \text{ s}} = 730 \text{ m/s}$$

Ciò consente di classificare il terreno come **Categoria B: Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti**, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s

Nell'ipotesi in cui le fondazioni siano realizzate a -3,00 m dal p.c., la Vs equivalente diventa:

H= 4.70-3.00= 1.70 m dal piano della fondazioni

Il rinvenimento del substrato sismico a quote inferiori ai 3.00 metri dal p.c. consente di classificare il terreno come **Categoria A: Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi** caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.

Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

Nella **Tabella 1** si illustrano i parametri di deformazione dinamici medi calcolati tramite correlazione bibliografica dei parametri di input Vs, e Vp e densità (da bibliografia/correlazione) per ciascun sismostrato definito dalle indagini eseguite.

Tabella 1. Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

Sismostrato	Vs	Vp	Densità y	Modulo di Young dinamico Ed _{dyn}	Modulo di taglio iniziale Go	Modulo di compressibilità o di Bulk K
	<i>m/s</i>	<i>m/s</i>	<i>kg/m³</i>	<i>MPa</i>	<i>MPa</i>	<i>MPa</i>
1	730	1460	1900	2700.03	1012.51	2700.03
2	1310	2620	2200	10067.79	3775.42	10067.79
3	1770	3540	2300	19215.12	7205.67	19215.12
4	3610	7220	2700	93831.12	35186.67	93831.12
5	4020	8040	2800	120664.32	45249.12	120664.32

Indicazioni per la determinazione di N_{spt} e parametri geotecnici

Sulla base delle correlazioni fornite nei precedenti paragrafi è possibile stimare una correlazione tra Vs e N_{spt}, i parametri di resistenza al taglio e di deformazione. Nel caso in esame trattandosi di materiali a granulometria grossolana si consiglia di impiegare la correlazione di Imai (1977) di seguito indicata.

$$N_{SPT} = \left(\frac{V_s}{80,6} \right)^{3,021} \text{ valida per i terreni prevalentemente sabbiosi - Imai (1977)}$$

7 **CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE**

La prospezione geofisica attraverso l'impiego della tecnica della sismica MASW e rifrazione in onde P ha permesso di ricostruire con un buon grado di precisione l'assetto lito-stratigrafico dell'area in esame e dedurre le caratteristiche sismiche. Lungo la verticale indagata si evince la presenza di sismostrati con velocità V_p e V_s crescente con la profondità con andamento e spessori indicati nei precedenti paragrafi. Il bedrock sismico individuato grazie alla MASW è stato incontrato a 4.70 m.

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata dalla MASW, anche in funzione del piano di posa delle fondazioni, è riportata nel seguente schema riassuntivo:

Sigla	Profondità Piano di posa [m da p.c.]	Profondità substrato [m]	V_{Seq} [m/s]	Categoria sottosuolo (NTC2018)
M1	0.00	4.70	730	B
	3.00	1.70	>800	A

I dati derivati dalla MASW, rapportati alle correlazione bibliografiche indicate nei precedenti paragrafi, hanno permesso di determinare i parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni e per correlazione ottenere una preliminare definizione dei parametri di resistenza al taglio.

Cagliari 19.01.2021

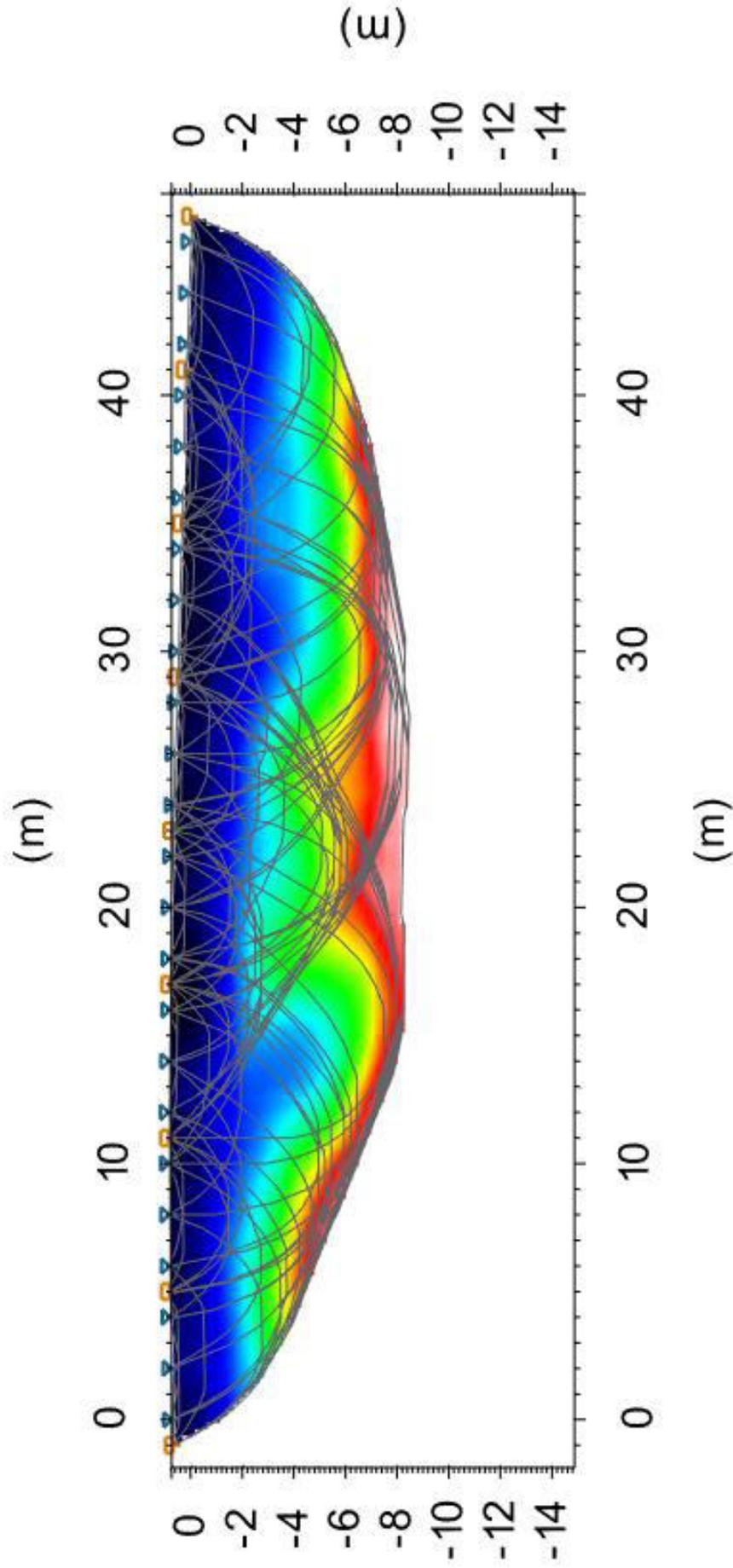
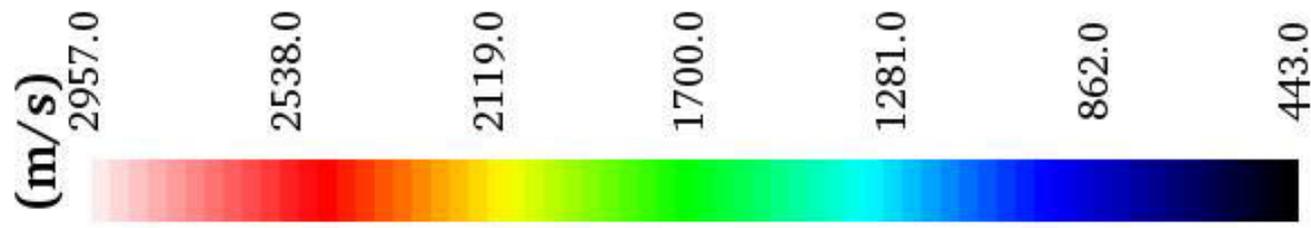
Acquisizione ed elaborazione:

Dott. Geol. Marcello Piras

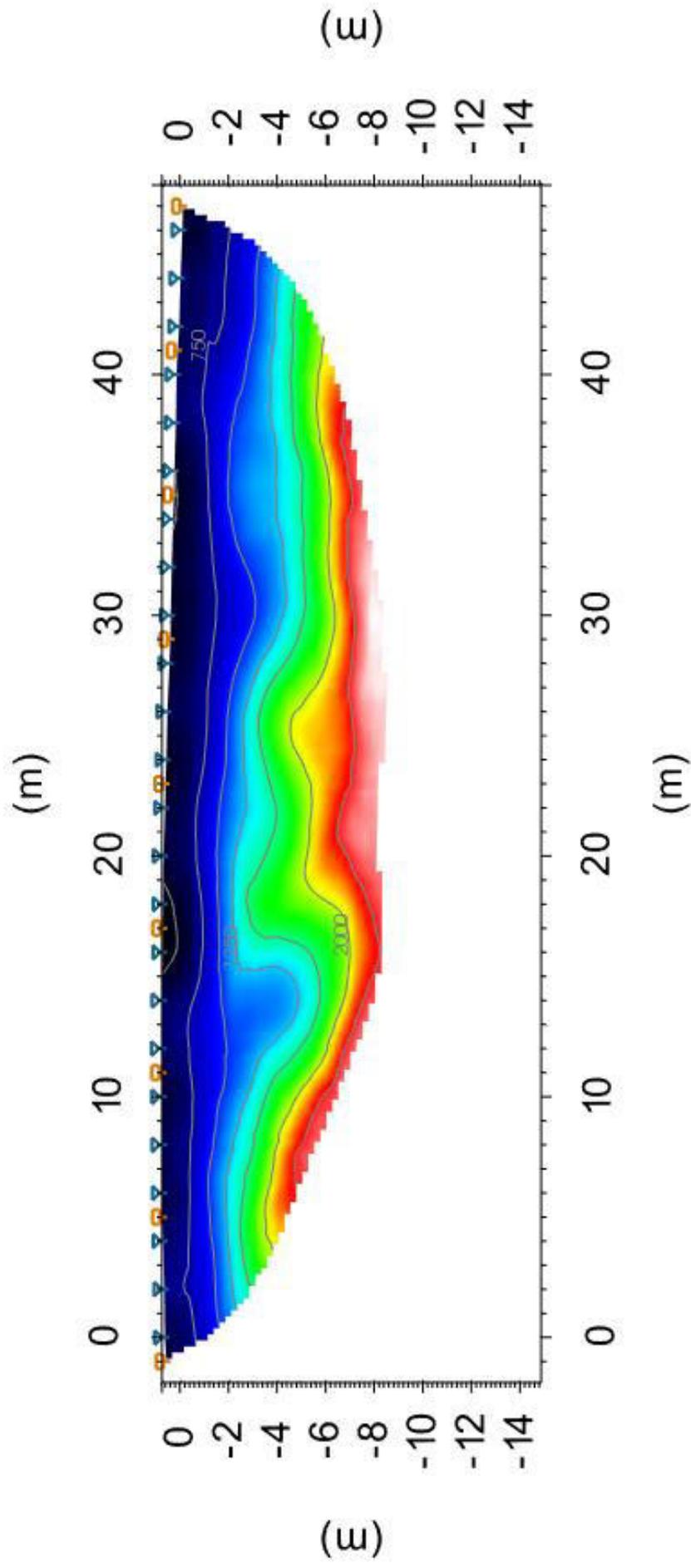
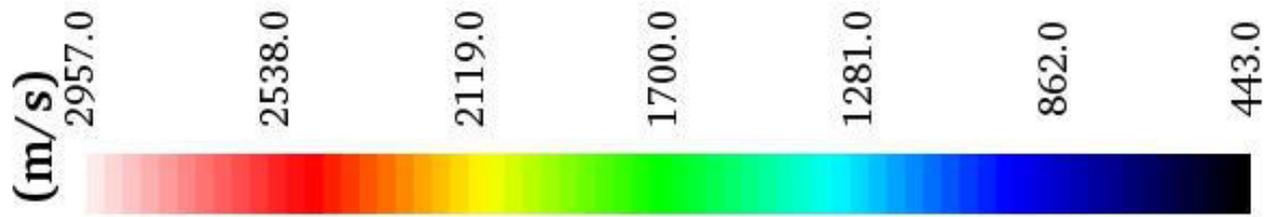
Dott. Geol. Martina Gaias



ALLEGATO A – Rifrazione R1
Copertura raggi sismici



ALLEGATO A – Rifrazione R1
Sezione tomografica in onde P



ALLEGATO B – MASW 1

Sismogramma acquisito – spettro velocità di fase/frequenza
Curva di dispersione sperimentale e calcolata con profilo VS
(Acquisizione con shot a 23,00 m)

