



REGIONE SICILIANA

COMUNE TRAPANI (TP)

PIATTAFORMA TECNOLOGICA PER IL TRATTAMENTO E LA VALORIZZAZIONE
DEI R.S.U. SITA IN C\DA BORRANEA NEL COMUNE DI TRAPANI

LOTTO 1: IMPIANTO DI DISCARICA PER RIFIUTI NON PERICOLOSI

CUP: G95I18000160001

PERIZIA DI VARIANTE *in corso d'opera*

L'ufficio della Direzione dei Lavori:

Direttore dei lavori: Arch. Vincenza Di Marco

CSE e Direttore Operativo: Arch. Giacomo Lombardo

Direttore Operativo: Ing. Alessandro Amico

Direttore Operativo: Geol. Gian Vito Graziano

Il Responsabile Unico del Procedimento:

Arch. Pasquale Musso

L'Impresa:

CONPAT SCARL:

Il Procuratore Speciale: Sig. Mario Spina



N. ELABORATO:

04

TITOLO ELABORATO:

RELAZIONE GEOLOGICA ADDENDUM

CODICE ELABORATO:

05 PVT1 PV 01 RD 000004 A

n. progressivo

lavoro

fase

lotto

tipo documento

numero elaborato

REV

SCALA:

A

prima emissione

Dicembre 2023

B

C

D

REV.

DESCRIZIONE

DATA

REDATTO

VERIFICATO

APPROVATO

INDICE

1. PREMESSA.....	2
2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E CARTOGRAFICO.....	6
3. LINEAMENTI GEOMORFOLOGICI.....	8
4. PIANIFICAZIONE DELLE ATTIVITA'.....	11
5. GEOLOGIA	
5.1 Quadro geologico locale.....	15
5.2 Sintesi dello studio geologico di progetto.....	16
5.3 Nuova campagna di indagini.....	19
6. CARATTERI IDROGEOLOGICI	
6.1 Caratteri di permeabilità.....	31
6.2 Misure ai piezometri.....	32
7. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA	
7.1 Parametrizzazione utilizzata in progetto.....	34
7.2 Prelievo di campioni con infissione delle fustelle.....	35
7.3 Prelievo di campioni nel corso dei sondaggi geognostici.....	36
7.4 Analisi granulometriche.....	37
7.5 Caratteristiche indici.....	38
7.6 Limiti di consistenza.....	39
7.7 Permeabilità misurata in cella edometrica.....	42
7.8 Caratteristiche di resistenza alla compressione.....	43
7.9 Caratteristiche di resistenza al taglio.....	44
7.10 Parametrizzazione, valori nominali e valori caratteristici.....	45
8. STABILITA' DELLE SPONDE	
8.1 Riconfigurazione.....	47
8.2 Verifiche di stabilità.....	51
9. MISURE AGLI INCLINOMETRI.....	54
10. INDICAZIONI E PRESCRIZIONI.....	57

1. PREMESSA

Con il D.D.G. n. 539 del 22.06.2022 del Dirigente Generale del Dipartimento dell'Acqua e dei Rifiuti è stata disposta l'aggiudicazione all'impresa Borraanea Società Consortile a.r.l., composta dal Consorzio stabile CONPAT SCARL di Roma e dalle consorziate CELI ENERGIA S.r.l. di Santa Ninfa (TP) e DI.BI.GA. Costruzioni S.a.s. di Alcamo (TP), dei lavori di cui al lotto 1 (nuova vasca di discarica per rifiuti non pericolosi) della piattaforma tecnologica per il trattamento e la valorizzazione dei r.s.u. in contrada Borraanea, nel territorio di Trapani.

Il progetto esecutivo per la realizzazione della piattaforma tecnologica è stato redatto da un gruppo di progettazione costituito da tecnici delle SRR Trapani Nord e Trapani Sud, revisionato in data 29.01.2021 a seguito delle modifiche richieste da vari enti e delle osservazioni del gruppo di verifica del progetto ex art.26 D.Lgs. 50/2016.

Esso prevede la realizzazione di una nuova vasca di abbancamento per lo smaltimento finale di rifiuti non pericolosi, su una superficie catastale complessiva di 183.587,00 mq (comprensiva del lotto 2 relativo all'impianto di trattamento meccanico-biologico), di volumetria lorda pari a 636.000 mc, composta da tre distinti settori contigui, separati da due argini di separazione, e confinata a valle da un ulteriore argine che separa la vasca dall'adiacente piazzale.

La realizzazione degli argini è prevista mediante rilevati costituiti da terreno proveniente dagli scavi, migliorato con l'apporto di cemento, utilizzando la tecnica delle terre armate.

Per la realizzazione della vasca vera e propria è invece previsto lo scavo del terreno in situ secondo le sagome e le quote riportate nel progetto; le quote finali di scavo sono collegate da scarpate di altezza non superiore a 12,00 m e inclinazione pari a 43° per il terreno in posto ed a 40° per l'argine laterale.

Sono state proprio queste elevate pendenze, in terreni prevalentemente argillosi, a suscitare non poche perplessità circa la stabilità delle stesse scarpate, rafforzate dalla circostanza che, nel corso delle attività di scavo eseguite dopo il concreto inizio dei lavori del 13.09.2022, si è appurata la presenza di lesioni in corrispondenza del ciglio delle scarpate lato Sud-Est della vasca.

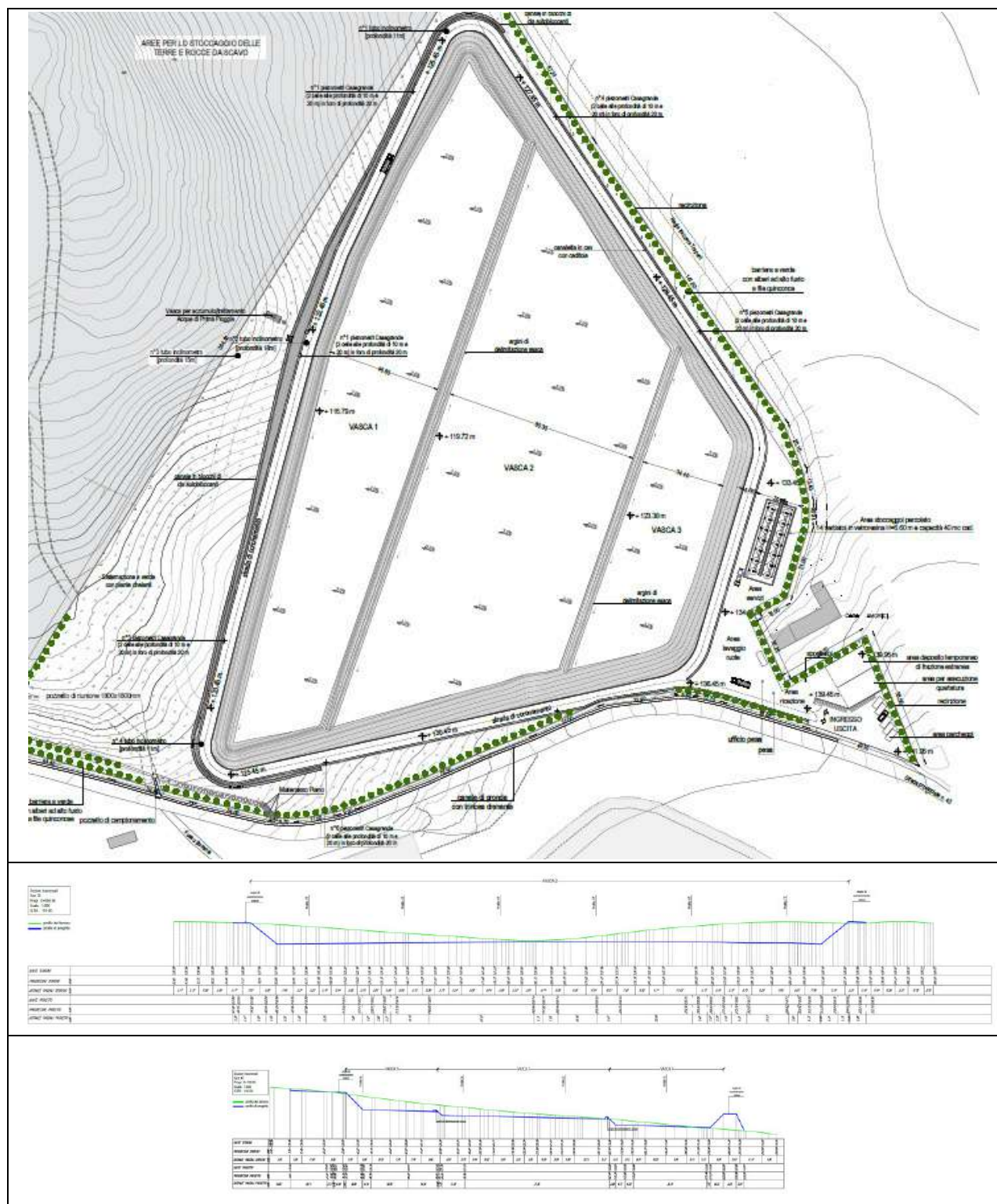


Fig. 1: pianta della vasca e sezioni tipo longitudinale e trasversale (di progetto)

Nel corso del sopralluogo del 02.01.2023 la DL ebbe modo di constatare la presenza di questi cedimenti e chiese al RUP di procedere alla nomina di un geologo per accertare e valutare l'entità del cedimento, supportare la stessa DL sulle iniziative da intraprendere, nonché per

redigere la documentazione di competenza nell'ambito della procedura di deposito dei calcoli strutturali per il rilascio del Nulla Osta da parte dell'Ufficio del Genio Civile di Trapani.

Nel corso del tavolo tecnico riunitosi il 17.01.2023 vennero analizzate le problematiche relative ai cedimenti della scarpata e si concordò di eseguire un ulteriore sopralluogo, effettuato poi il successivo 25.01.2023, al fine di analizzare tutte le scarpate, valutare la presenza di ulteriori smottamenti, effettuare campionamenti e prove e valutare la necessità di eseguire ulteriori sondaggi, eventualmente da attrezzare a piezometri, prelevando campioni di terreno da sottoporre alle prove geotecniche necessarie ad eseguire le verifiche della stabilità delle scarpate.

A questo punto, previa consultazione sul portale MEPA (Mercato Elettronico della Pubblica Amministrazione) di più operatori economici al fine di ricevere la migliore offerta, il Responsabile del Procedimento ha proceduto all'affidamento allo scrivente, legale rappresentante dello Studio Geologico Graziano e Masi, del servizio di *"Ufficio della direzione lavori, addetto con qualifica di direttore operativo GEOLOGO"*, ai sensi dell'art. 36 comma 2 lett. a) del D. Lgs. 50/2016 e s.m.i. Il relativo disciplinare d'incarico individua all'art. 3 le seguenti prestazioni professionali:

- a) la direzione dei lavori geognostici con accertamento della loro regolare esecuzione;
- b) l'elaborazione dei dati derivanti dalle eventuali prospezioni in sito e dalle analisi e prove geotecniche in laboratorio;
- c) l'eventuale relazione geologica integrativa a quella del progetto esecutivo contenente lo studio di dettaglio sulla situazione morfologica dell'area, sulla natura del sottosuolo e sulle caratteristiche tecniche dei terreni, desunte dalla correlazione delle indagini e delle prove effettuate, e sulla situazione idrogeologica del sottosuolo, nonché tutti quegli altri elementi e dati relativi a problemi di natura geologica che, caso per caso, possono presentarsi anche in funzione delle soluzioni che si dovranno adottare;

indicando inoltre che nel corso dei lavori di realizzazione dell'opera sono richieste le seguenti ulteriori prestazioni:

- controllo, in corso d'opera, della rispondenza tra la caratterizzazione geologica e geotecnica assunta in progetto e la situazione effettiva;

- direzione sotto l'aspetto geologico dei lavori di costruzione dell'opera con visite periodiche al cantiere nel numero necessario ad esclusivo giudizio del professionista, emanando, ove necessario, in collaborazione con la direzione lavori dell'opera progettata, le disposizioni e gli ordini per l'attuazione della relativa parte geologica nelle varie fasi esecutive, sorvegliandone la buona riuscita;
- assistenza ai collaudi e liquidazioni dei lavori di carattere geognostico e analisi e prove di laboratorio geotecnico e ambientali.

Lo scrivente ha immediatamente acquisito il progetto esecutivo, completo delle relative autorizzazioni, e il 14 marzo scorso ha svolto la prima visita di sopralluogo alla presenza dell'Ufficio di Direzione dei Lavori, del RUP e dell'impresa esecutrice dei lavori.

2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E CARTOGRAFICO

L'area di cantiere, localizzata in contrada Borranea nel territorio di Trapani, è limitrofa, lungo il perimetro Sud, alla discarica esistente gestita dalla Trapani Servizi, da cui è separata dalla SP43, strada provinciale di collegamento tra Paceco e Castelvetro. In prossimità della stessa area non sono presenti centri abitati minori, villaggi o frazioni abitate.



Fig. 2: ortofoto dell'area di progetto (da Google Earth) con la localizzazione della vasca

Situata sul pendio che raccorda il rilievo della *Montagnola della Borranea* con il sottostante *Fiume Cuddia*, si trova in posizione baricentrica rispetto all'intero territorio della provincia di Trapani, i cui maggiori centri abitati, Trapani, Marsala, Salemi e Castelvetro, sono ubicati entro un raggio di circa 30 km. E' raggiungibile percorrendo la S.P. n. 43 Marcanza – Cuddia, che consente l'accesso diretto all'impianto.

Il cantiere si inserisce in un contesto di paesaggio che presenta un assetto plano-altimetrico tipicamente collinare, caratterizzato da blande colline degradanti verso le estese pianure tipiche del trapanese; si trova a quote altimetriche comprese tra 100 e 130 metri circa s.l.m.

Per la sua localizzazione cartografica ricade nella tavoletta 257 IV SE “*Borgo Fazio*” della Carta d’Italia edita dall’Istituto Geografico Militare Italiano (IGM) in scala 1:25.000 e nella Sezione n. 605120 “*Ponte della Cuddia*” della Carta Regionale Tecnica dalla Regione Siciliana in scala 1:10.000, da cui è stata stralciata la corografia di seguito allegata (*Fig. 3*).

La specifica sezione della CTR costituisce necessario riferimento anche per i successivi approfondimenti circa le condizioni di pericolosità e di rischio geomorfologico e idraulico riportate nel Piano di Assetto Idrogeologico (PAI).

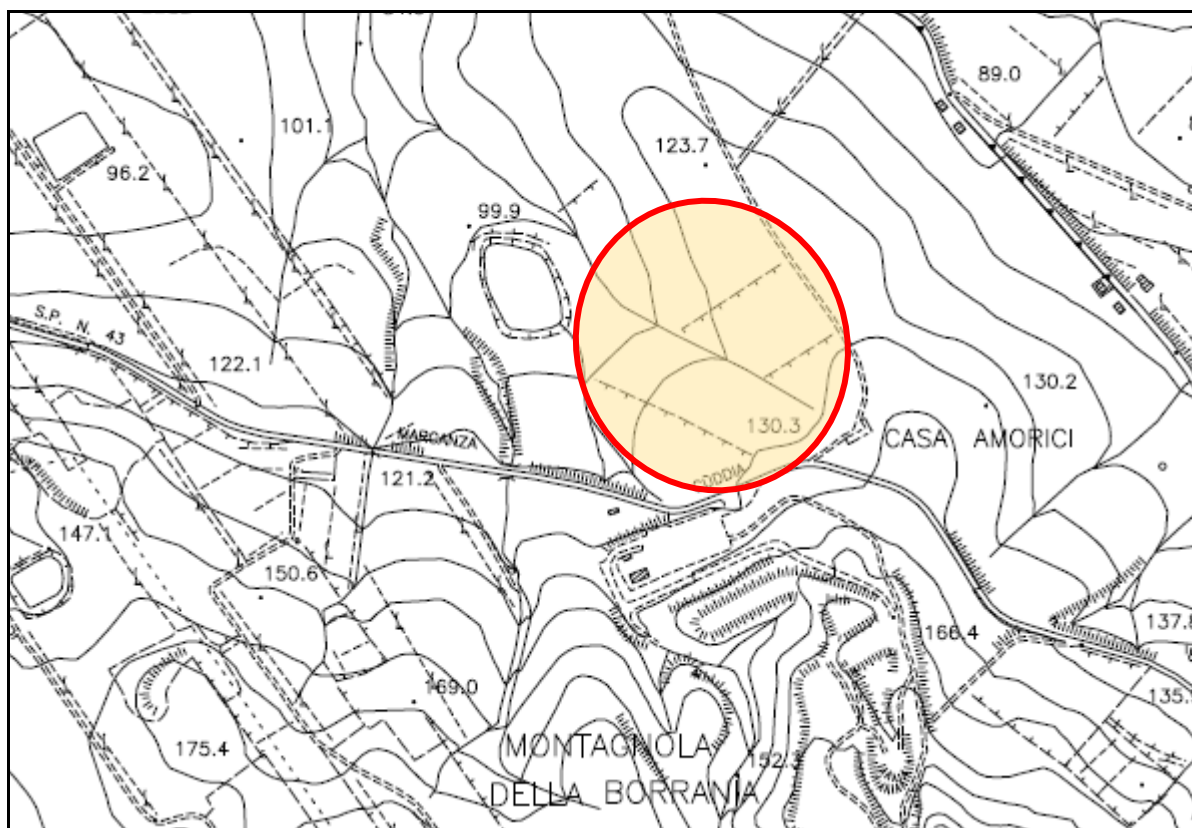


Fig. 3: corografia in scala 1:10.000 (stralcio del Foglio n. 605120 della Carta Regionale Tecnica)

3. LINEAMENTI GEOMORFOLOGICI

Collocata alle pendici settentrionali del rilievo della *Montagnola della Borra*, a Sud della discarica per rifiuti non pericolosi attualmente gestita dalla Trapani Servizi, l'area sulla quale si sta realizzando la nuova vasca appartiene ad un contesto di forme morfologiche dolci e modellate, tipiche dei complessi a comportamento plastico.

Si inserisce su un versante interrotto da deboli e ampie ondulazioni, la cui morfologia si attenua progressivamente fino a dar luogo al paesaggio tabulare della piana alluvionale del *Fiume Cuddia*. Il paesaggio agrario a valle è caratterizzato prevalentemente dalla coltivazione della vite. Le deboli pendenze, unitamente ai caratteri di impermeabilità delle argille, sono all'origine della diffusione del reticolo idrografico poco gerarchizzato, rappresentato da alcuni modesti solchi torrentizi fino al IV grado, tributari del citato *Fiume Cuddia* e del *Fiume Fittasi*, che costituiscono gli elementi idrografici più rilevanti nell'intera piana.



Fig. 4: veduta aerea da Nord dell'area destinata alla nuova vasca (da Google Earth)

I deflussi superficiali delle acque incanalate e di quelle di dilavamento si indirizzano verso le sottostanti più ampie valli fluviali, soggette ad una scarsa energia di rilievo e non di rado ad

interventi di bonifica e canalizzazione, volti a facilitare i deflussi e attenuare sovralluvionamenti e divagazioni a spese delle aree coltivabili.

Una modesta vallecchia degradante verso Nord interessava direttamente l'area della nuova vasca, ma in corrispondenza di quest'ultima essa è ormai completamente obliterata dagli scavi sinora eseguiti. Si tratta di una linea d'impluvio di primo ordine di gerarchizzazione, afferente a un bacino imbrifero di modesta estensione, caratterizzato da tempi di corrivazione molto bassi e portate liquide modeste.

Seppure i versanti argillosi mostrino una certa propensione al dissesto geomorfologico, legato alla possibilità che le coltri alterate sopra il substrato argilloso si saturino soprattutto in occasione di piogge intense e prolungate, provocandone la diminuzione della resistenza al taglio e la conseguente predisposizione alla mobilitazione, nessun segno di dissesto è stato rilevato nel versante sul quale è impostata la nuova vasca.

Questa considerazione trova riscontro nel Piano Straordinario per l'Assetto Idrogeologico (D.A.R.T.A. n. 298/41 del 04.07.2000 e successive integrazioni). Infatti, dalla consultazione delle carte tematiche, di pericolosità e di rischio idrogeologico, nonché di pericolosità e di rischio idraulico, è stato possibile accertare che l'area di cantiere, all'interno del bacino idrografico del *Fiume Birgi* (n. 035), non è gravata da situazioni di pericolosità e/o rischio idraulico.

Più a monte la discarica gestita dalla Trapani Servizi ricade invece parzialmente in un'area caratterizzata da pericolosità geomorfologica *P2* media per fenomeni di erosione accelerata.

Nelle *Figg. 5 e 6* si allegano gli stralci della *Carta dei Dissesti* e della *Carta delle Pericolosità e del Rischio* di cui al PAI della Regione Sicilia, edizione 2006.

Anche per quanto riguarda il rischio idraulico l'area di cantiere è esente da problematiche di alluvionamenti o esondazioni. Un rischio molto elevato si riscontra nel PAI lungo la valle del *Fiume Cuddia*, interessata dalla possibilità di "esondazione per ipotetico collasso della diga Rubino".

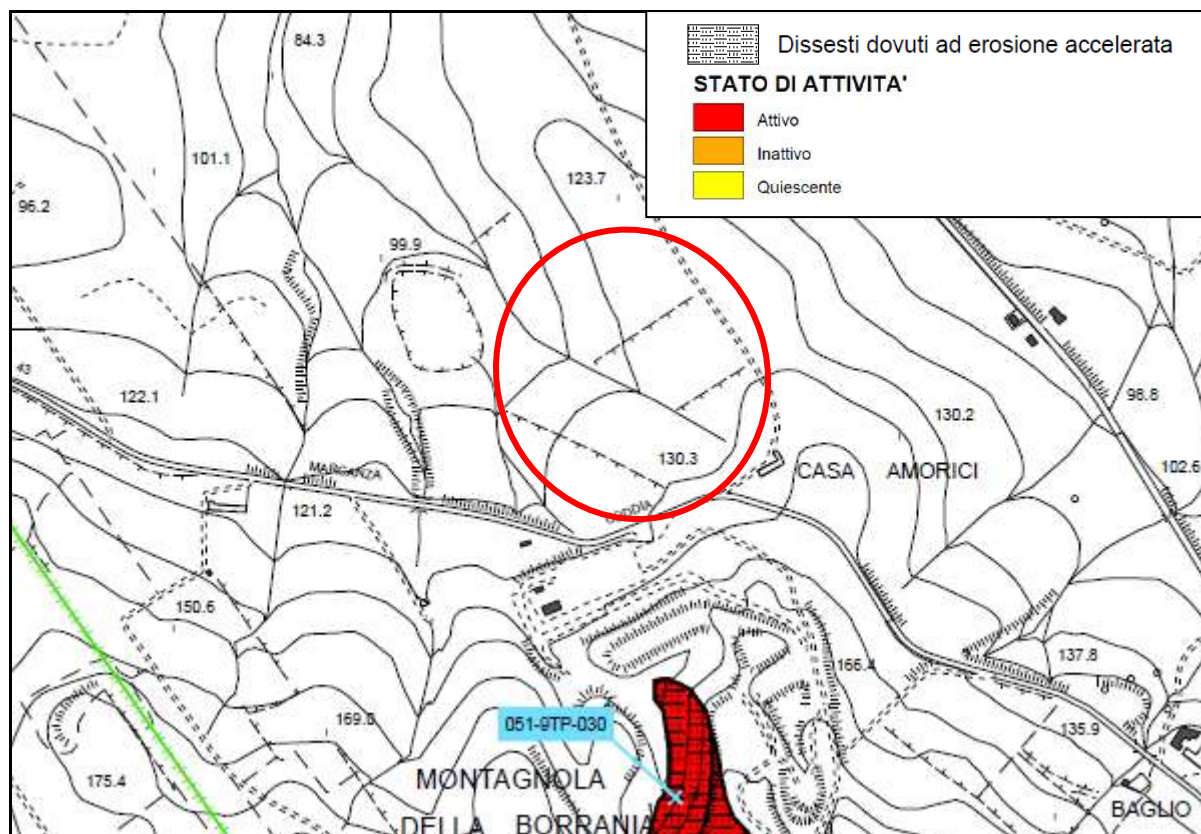


Fig. 5: stralcio della Carta dei Dissesti, di cui al PAI Sicilia, ed. 2006

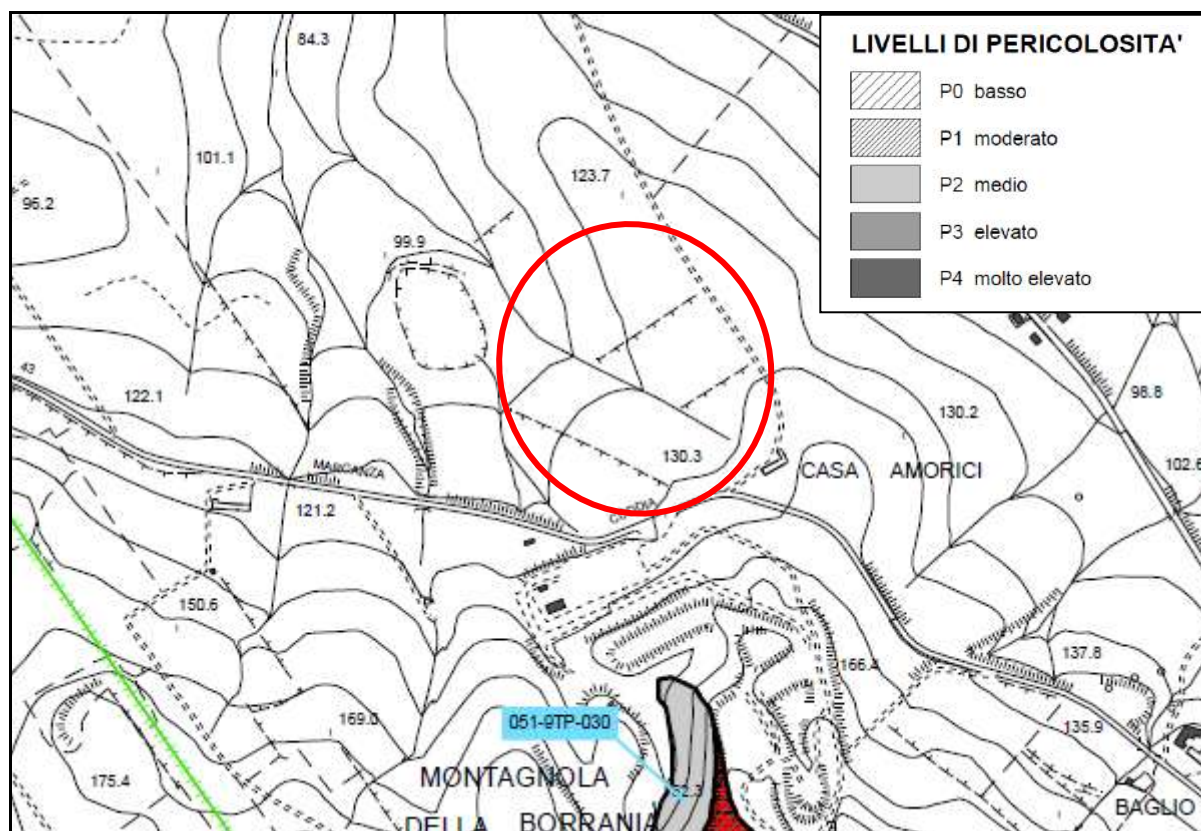


Fig. 6: stralcio della Carta della Pericolosità e del Rischio geomorfologico, di cui al PAI ed. 2006

4. PIANIFICAZIONE DELLE ATTIVITA'

Già alla luce dei primi sopralluoghi eseguiti a gennaio 2023 dall'Ufficio di Direzione dei Lavori, dall'Ufficio del RUP e dall'impresa, era stata attivata una prima speditiva campagna di indagini sui terreni, attraverso l'esecuzione di analisi e prove geotecniche di laboratorio su 4 campioni indisturbati prelevati tramite infissione di fustelle metalliche spinte nel terreno dalla benna di un escavatore.

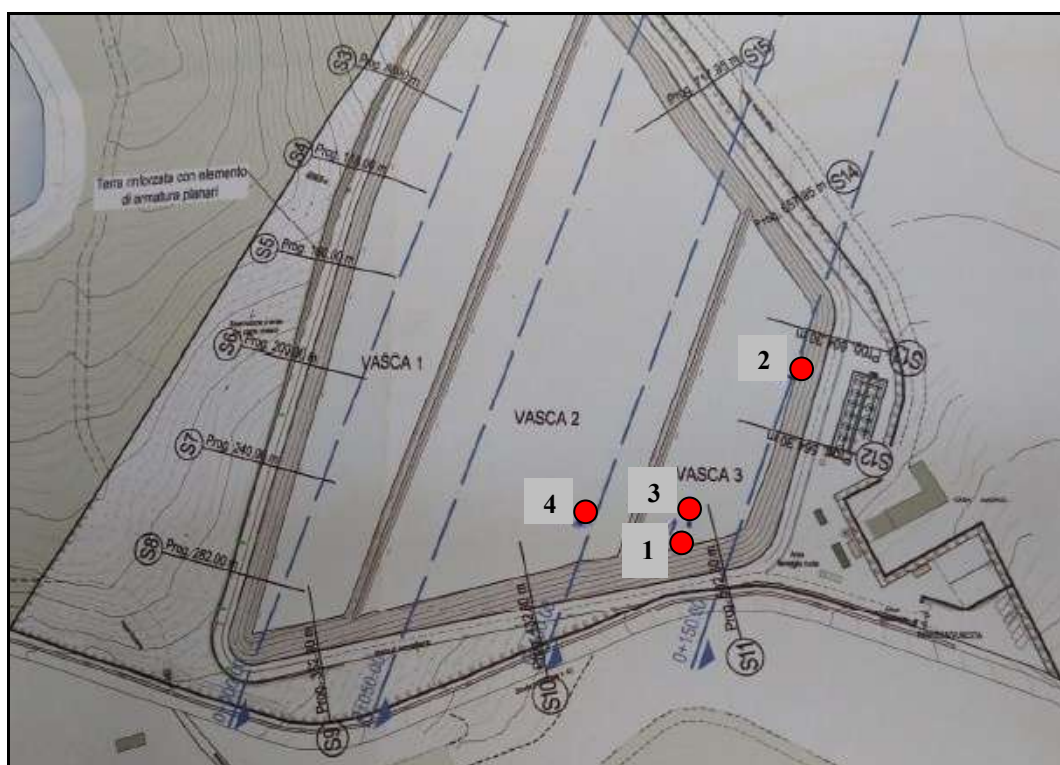


Fig. 7: localizzazione dei campioni prelevati tramite infissione di fustelle metalliche



Fig. 8: operazioni di prelievo dei campioni

Due di essi (C1 e C2) appartengono alle argille alterate, gli altri due (C3 e C4) appartengono invece alle argille di base.

Sulla base dei primi risultati delle prove e delle analisi di laboratorio geotecnico condotte su di essi, sono stati caratterizzati in prima battuta i terreni presenti e sono state eseguite le prime verifiche della stabilità delle scarpate nelle condizioni in cui esse si trovavano.

Alla luce dei contenuti di questa relazione, il 14 marzo 2023 si è svolto un sopralluogo in cantiere, al quale per la prima volta ha preso parte anche lo scrivente appena incaricato, e il successivo 15 marzo 2023 è stato convocato dal RUP un tavolo tecnico presso il Dipartimento Regionale dell'Acqua e dei Rifiuti per discutere delle problematiche venutesi a creare e soprattutto per mettere in atto le azioni conseguenziali.

In quella sede si è evidenziata la necessità di eseguire precauzionalmente un intervento immediato per contrastare l'eventuale sviluppo di dissesti lungo la scarpata di Sud-Est, in prossimità delle aree di deposito del cantiere e adiacente alla strada provinciale (che interessa peraltro anche un palo della linea di bassa tensione), per il quale, considerata l'urgenza di procedere ad eseguire l'intervento, si è unanimemente concordato di eseguire un banchinamento della scarpata mediante la posa, a ridosso della stessa, dei terreni disponibili provenienti dagli scavi (argille e argille alterate), da costipare opportunamente con i mezzi meccanici in strati di 30 cm.

Si è deciso anche di procedere con ulteriori attività di indagine sui terreni, secondo un piano di indagini che era stato preliminarmente programmato dall'impresa, su invito della DL, che avrebbe consentito di acquisire maggiori informazioni per effettuare con maggiore accuratezza le verifiche delle condizioni di stabilità delle scarpate.

Il piano prevedeva l'esecuzione di:

- n. 3 sondaggi a carotaggio continuo, sino a profondità comprese tra 15 e 20 metri, installando al loro interno altrettanti tubi inclinometrici;
- n. 1 sondaggio a carotaggio continuo, sino alla profondità di 15 metri, installando al suo interno due piezometri di tipo Casagrande, di cui una cella all'interno dello strato di

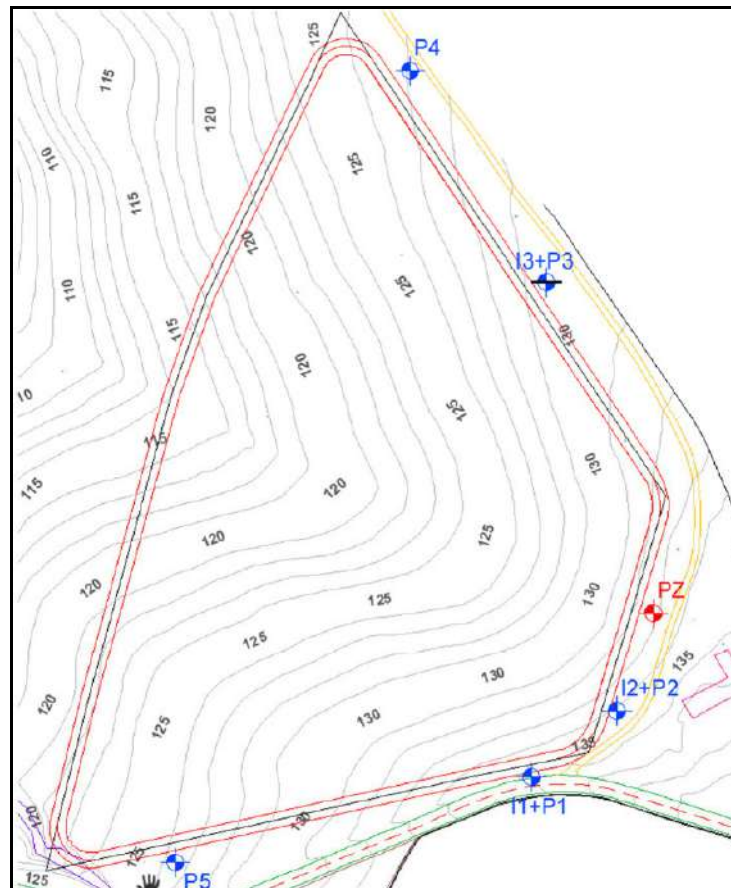
argille alterate superficiali, una seconda cella all'interno delle argille grigie di base, un paio di metri sotto al contatto con le argille alterate;

- n. 1 sondaggio a carotaggio continuo, sino alla profondità di 15 metri, installando al suo interno un piezometro a tubo aperto da 2" - 3" sfinestrato per tutta la sua lunghezza;
- di tipo Casagrande, di cui una cella all'interno dello strato di argille alterate superficiali, una seconda cella all'interno delle argille grigie di base, un paio di metri sotto al contatto con le argille alterate;
- n. 1 sondaggio a distruzione di nucleo, sino alla profondità di 15 metri, installando al suo interno due piezometri di tipo Casagrande, di cui ancora una volta una cella all'interno dello strato di argille alterate superficiali, una seconda cella all'interno delle argille grigie di base, un paio di metri sotto al contatto con le argille alterate;
- prelievo di n. 3 campioni indisturbati per ciascun sondaggio eseguito a carotaggio continuo;
- prove geotecniche di laboratorio sui campioni prelevati.

In *Fig. 9* alla pagina seguente è riportata una planimetria relativa alle indagini programmate, dove con "I" sono indicati i sondaggi a carotaggio continuo, con "PZ" il piezometro a tubo aperto e con "P" i piezometri di tipo Casagrande.

Nella stessa riunione l'impresa si è resa disponibile ad avviare con celerità il campo prove per la sperimentazione del trattamento a calce delle terre di scavo, proponendo di utilizzare lo stesso campo anche per eseguire prove anche sulle argille rimaneggiate, in maniera tale da poterle eventualmente utilizzare per le terre armate previste in progetto (argini di contenimento dei settori della vasca).

Prima di procedere alla descrizione delle attività svolte, dalle verifiche della stabilità delle sponde in condizioni di loro banchinamento con le terre disponibili, ai risultati delle indagini integrative svolte, si descrive il modello geologico dell'area sviluppato sulla base dello studio geologico di progetto, delle pregresse conoscenze dei luoghi e delle ricognizioni effettuate in cantiere.



5. GEOLOGIA

5.1 *Quadro geologico locale*

In un vasto intorno della nuova vasca in fase di realizzazione si rileva la presenza di litotipi di natura prevalentemente argillosa. Si tratta del basamento argilloso attribuibile stratigraficamente al Miocene medio, costituito da sedimenti tipici di ambiente di sinclinale in fase di orogenesi parossistica (sedimentazione sin orogenetica). E' rappresentato da un complesso plastico formato in gran parte da accumuli di risedimentazione, derivanti dalla demolizione di precedenti sedimenti, con faune ora mioceniche, ora più antiche.

A Nord della stessa vasca, in prossimità del *Fiume della Cuddia*, affiorano dei limi sabbiosi fluviali del *Pleistocene superiore* – *Olocene* attribuibili al “*Sintema di Capo Plaia*” (rif. Carta Geologica d'Italia – Progetto CARG, edita dal Servizio Geologico di ISPRA).

In discordanza con questi limi sabbiosi, specificamente nell'area sulla quale è impostata la nuova vasca, si ritrovano dei termini attribuibili al *Tortoniano superiore* – *Messiniano inferiore* in facies di argille grigie molto coesive. Si tratta di depositi terrigeni di ambiente deltizio e transizionali, costituiti da eteropie di argille sabbiose, argille e, più raramente, di livelli sabbie e conglomerati.

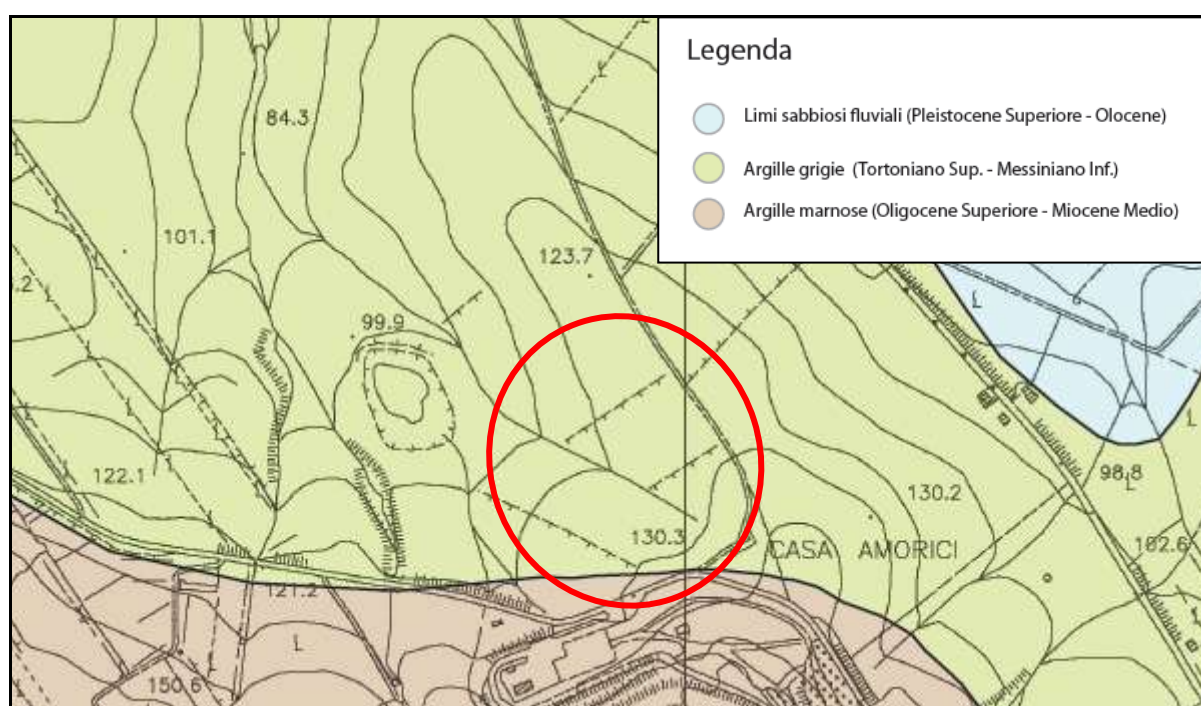


Fig. 10: carta geologica in scala 1:10.000

Nell'area della vasca, come è stato possibile osservare direttamente sui luoghi a seguito degli scavi sinora eseguiti, il substrato è costituito da argille di colore grigio scuro, piuttosto consistenti, mentre gli strati più superficiali, che lungo il versante mascherano uniformemente lo stesso substrato, si presentano palesemente alterati.

5.2 Sintesi dello studio geologico di progetto

Lo studio geologico propedeutico alla progettazione esecutiva della piattaforma tecnologica per il trattamento e la valorizzazione del R.S.U., comprendente la realizzazione della nuova vasca (lotto 1), era stato svolto dal geologo dott. Paolo Nania, che all'epoca si era avvalso due distinte campagne geognostiche (la prima del 2010, la seconda del 2018) comprendenti nel loro complesso n. 9 sondaggi a carotaggio continuo, 13 sondaggi ambientali, indagini sismiche, installazione di piezometri, prove di permeabilità Lefranc e prove geotecniche di laboratorio su campioni.

In *Fig. 11*, alla pagina seguente, è riportata la planimetria di progetto con tutte le indagini eseguite.

Sulla base dei risultati di queste indagini, il geologo incaricato, confermando la presenza in affioramento dei terreni della Formazione Terravecchia, ha distinto essenzialmente tre tipi litologici in successione verticale:

- coltre alterata e plastica (Colluvium) formata da limi e argille di spessore compreso tra 1,10 m e 3,50 m;
- formazione alterata (FA), costituita da argille debolmente sabbiose di spessore compreso da 1,40 m e 5,00 m;
- formazione di base (FB), costituita da argille, localmente da argille gessose, di colore grigiastro, a struttura scagliettata di spessore molto elevato (spessore accertato fino a 30 m di profondità).

In seno alla formazione di base, nel settore mediano della nuova vasca (sondaggi S2, S2A, S7A e S11A), egli ha rilevato un lembo di argille gessose a tratti destrutturate, di qualche metro di spessore, che ha poi rappresentato con il colore rosa nella figura che segue.

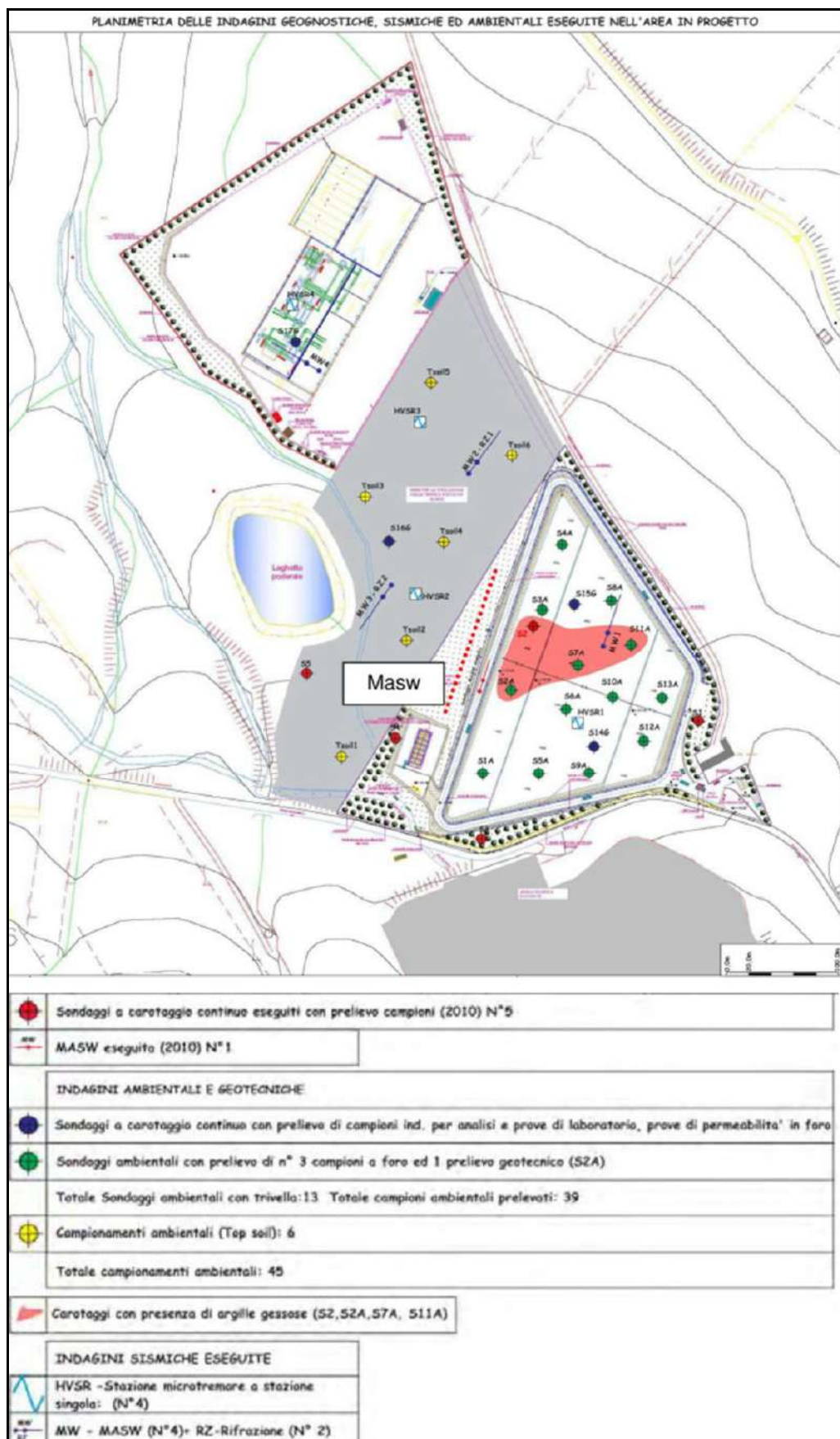


Fig. 11: planimetria dello studio geologico di progetto con indicazione delle indagini eseguite in quel contesto

Non è stata rilevata alcuna circolazione idrica, per cui il geologo ha escluso la presenza di falda idrica, ipotizzando tuttavia che un'effimera circolazione idrica "di cinta" si possa formare al tetto delle argille grigie della formazione di base.

I campioni di terreno prelevati in sede di progetto sono stati raggruppati sulla base della suddivisione operata per tipi litologici, con riferimento soprattutto alle argille alterate (FA) e alle argille grigie di base (FB):

Campione	Prof. Prelievo		γ	c_u	c'	ϕ'	Formazione
	da m.	a m.	kN/m ³	kPa	kPa	°	
S1 C1	6	6,5	18,25	47	24,32	23,5	FB
S1 C2	29,45	29,85	19,83		41,42	23,2	FB
S2 C1	3,6	4,1	17,86		34,59	15,4	FA
S2 C2	9,5	10	20,11	52	27,73	25,6	FB
S3 C1	3	3,5	19,14	83,5			FA
S3 C2	18,5	18,9	20,04	161,5			FB
S4 C2	8,7	9	17,93	85,5			FB
S5 C1	2,5	3	18,27	56,5			FA
S14G C1	4,2		18,15		27	26	FA
S14G C2	10,4		18,62		35	27	FB
S15G C1	2,2		18,64	60,2	19,9	23	FB
S15G C2	4,25		19,82	131,9	25	20	FA
S16G C1	3,6		18,52	31,9			FA
S16G C2	5,7		20,43	230,4			FA
S17G C1	4		19,2	102,1			FA
S2A C1	2		19,9	76,4			FA

Fig. 12: tabella riassuntiva dei valori di peso di volume e di resistenza al taglio dei campioni prelevati in sede di progetto

Per quanto riguarda i parametri caratteristici da attribuire ai due litotipi, il progettista, nelle successive verifiche analitiche della stabilità delle scarpate (di cui si dirà più avanti), ha poi assunto i seguenti valori medi:

	γ	γ_{sat}	c_u	c'	ϕ'
	kN/m ³	kN/m ³	kPa	kPa	°
FA	19	20	70	28	20
FB	19	20	80	29	24

Fig. 13: tabella dei valori di peso di volume e di resistenza al taglio assunti dal progettista

5.3 Nuova campagna di indagini

Si è detto che, nelle more dell'esecuzione di un intervento immediato per contrastare il dissesto lungo la scarpata di Sud-Est della nuova vasca, si era dato avvio ad un'attività di indagine sui terreni, secondo un piano di indagini che era stato preliminarmente programmato dall'impresa, su invito della DL.

Le nuove indagini avrebbero consentito di acquisire maggiori informazioni per effettuare con maggiore accuratezza le verifiche delle condizioni di stabilità delle scarpate.

Il piano prevedeva l'esecuzione di n. 6 sondaggi, di cui 5 a carotaggio continuo ed uno a distruzione di nucleo, all'interno dei quali installare piezometri o tubi inclinometrici.

Spinti alla profondità massima di 20,00 metri, sono stati eseguiti dalla ditta *Nicocia Trivellazioni* di Trapani; nel dettaglio:

- **SI 1:** a rotazione e carotaggio continuo spinto sino alla profondità di m 20 dal piano di campagna. Sino al fondo del foro di sondaggio sono stati posti in opera tubi inclinometrici in alluminio. Durante la perforazione sono stati prelevati alcuni campioni indisturbati di terreno mediante infissione a pressione di fustelle metalliche a pareti sottili;
- **SP1:** a distruzione di nucleo spinto sino alla profondità di m 20 dal piano di campagna. In foro sono state poste in opera, dopo opportuna saturazione, celle piezometriche tipo Casagrande alle profondità di m 3,20 e 6,70;
- **SI 2:** a distruzione di nucleo spinto sino alla profondità di m 20 dal piano di campagna. Nel foro è stata posta in opera, sino a fondo foro, una tubazione inclinometrica in alluminio;
- **SP2:** a carotaggio continuo spinto sino alla profondità di m 15 dal piano di campagna. In foro sono state poste in opera, dopo opportuna saturazione, celle piezometriche tipo Casagrande alle profondità di m 3,00 e 6,70. Durante la perforazione sono stati prelevati alcuni campioni indisturbati di terreno mediante infissione a pressione di fustelle metalliche a parti sottili;

- **SI 3:** a rotazione e carotaggio continuo spinto sino alla profondità di m 15 dal piano di campagna. Nel foro di sondaggio sono stati posti in opera, sino alla profondità di m 13,40, tubi inclinometrici in alluminio. Durante la perforazione sono stati prelevati alcuni campioni indisturbati di terreno mediante infissione a pressione di fustelle metalliche a pareti sottili;
- **SP3:** a distruzione di nucleo spinto sino alla profondità di m 15 dal piano di campagna. In foro sono state poste in opera, dopo l'opportuna saturazione, celle piezometriche tipo Casagrande alle profondità di m 2,20 e 6,70;
- **SP4:** a carotaggio continuo spinto sino alla profondità di m 15 dal piano di campagna. In foro sono state poste in opera, dopo la saturazione, celle piezometriche tipo Casagrande alle profondità di m 1,25 e 7,00. Durante la perforazione sono stati prelevati alcuni campioni indisturbati di terreno mediante infissione a pressione di fustelle metalliche a pareti sottili;
- **SP5:** a carotaggio continuo spinto sino alla profondità di m 16,20 dal piano di campagna. In foro è stato posto in opera un piezometro a tubo aperto in pvc opportunamente finestrato fin quasi alla superficie.

I fori di sondaggio che sono stati attrezzati con piezometro o con inclinometro sono stati dotati di pozzetto metallico di protezione.

La nuova campagna di indagini ha permesso di verificare in modo dettagliato la locale serie stratigrafica, definire gli spessori e le caratteristiche strutturali e giaciture dei terreni in posto e delle loro coperture e procedere al prelievo di campioni indisturbati di terreno da sottoporre a prove geotecniche di laboratorio,

L'esame delle relative colonne conferma la presenza nel sottosuolo della formazione argillosa tortoniana già rilevata in sede di rilevamento di superficie: sotto una coltre di terreno vegetale davvero esigua, di spessore variabile da m 0,10 in *SP4* a m 0,70 in *SI 1*, si rinvenivano le argille alterate di colore giallo-bruno (FA), di spessore compreso tra m 2,70 in *SP5* e m 6,10 in *SP4*.

In definitiva i sondaggi eseguiti hanno intercettato le argille grigie di base (FB), omogenee e consistenti, a profondità variabili da m 3,00 in *SP5* a m 6,20 in *SP4*.



Fig. 14: ortofoto con localizzazione dei punti di sondaggio

Questi orizzonti di substrato appaiono macroscopicamente compatti, tanto da aver reso più difficoltose le operazioni di prelievo dei campioni indisturbati mediante infissione a pressione della fustella metallica (Shelby).

Nel corso di questi ulteriori sondaggi sono stati prelevati a diversa profondità 15 campioni indisturbati di terreno (tre per ogni sondaggio), oltre a 3 campioni prelevati sulle berme, sui quali sono state poi condotte alcune prove geotecniche di laboratorio, di cui si dirà al successivo capitolo 8 *Caratterizzazione geotecnica*.

Sino alle profondità investigate è emersa la presenza di modesti livelli piezometrici nei sondaggi SP2 a m 1,90 di profondità e SP3 a m 6,25 di profondità.

Le schede contenenti la colonna litostratigrafica e le fotografie relative a ciascun sondaggio eseguito sono di seguito allegate nelle Figg. 15 ÷ 19.

Committente:		BORRANEA Soc. cons. a r.l.				data sondaggio: 22/02/2023			
Cantiere:		Piattaforma tecnologica per il trattamento e valorizzazione dei RSU sito in Contrada Borranea nel Comune di Trapani - lotto n° 1 - Discarica per rifiuti non pericolosi - CIG 86352376D4				numero sondaggio:			
Località:		Trapani				SI 1			
Trivella:		Solimec - SM-9							
Tipo sondaggio:		a rotazione e carotaggio continuo							
Profondità (m)	Stratigrafia	Descrizione	Campioni	Risultamento	Carotiere	Carotaggio (%)	SPT (n° colpi)	Falda	Note
0,70		Terrano vegetale argilloso-limoso, di colore giallo-bruno, umido e plastico con piccoli inclusi litici eterogenei		1,50					Tubo indurimento alzo a m 20,35 nel vicino pneumatico P1 le celle sono state posizionate alla profondità di m 0,20 e 0,70
		Argilla limosa, sabbiosa, di colore giallo-bruno, alterata, umida e plastica, quasi priva di inclusi litici. Sono presenti livelli centimetrici di sabbie limose.	3,00 3,55						
5,00			5,00 6,40						
10,00									
15,00		Argilla limosa, sabbiosa, di colore grigio azzurro, poco umida e quasi priva di plasticità, a struttura scagliesa. Sono presenti livelli maggiormente sabbiosi o limosi poco addensati o a luoghi disturbati dal carotaggio, tra m. 5,40-5,80, 7,00-7,35, 8,20-8,60, 9,50-9,75, 10,70-11,00, 11,90-12,40, 13,00-13,50, 16,40-16,70 e tra m 18,40-18,65	14,00 14,35						
20,00									
26,00									



Fig. 15: scheda relativa al sondaggio SI 1 (stratigrafia e cassette catalogatrici)

Committente:		BORRANEASoc. cons. a r.l.				data sondaggio: 13/03/2023			
Cantere:		Piattaforma tecnologica per il trattamento e valorizzazione del RSU sita in Contrada Borranea nel Comune di Trapani - lotto n° 1 - Discarica per rifiuti non pericolosi - CIG 89352376D4				numero sondaggio:			
Località:		Trapani				SP 2			
Trivella:		Solimec - SM-9							
Tipo sondaggio:		a rotazione e carotaggio continuo							
Profondità (m)	Stratigrafia	Descrizione	Campioni	Rivestimento	Carotatore	Carotaggio (%)	SPT (n° colpi)	Falda	Note
0,40		Terreno vegetale argilloso-limoso, di colore giallo-bruno, molto umido e molto plastico privo di inclusi litici							nel piezometro P2 le celle sono state posizionate alla profondità di m 3,00 e 6,70 nel vicino foro 12 tutti inclinometri sino a m 10,75
4,50		Argille limose, sabbiose, di colore giallastro, alterate, umide e plastiche con rari livelli centimetrici maggiormente sabbiosi. Quasi prive di inclusi litici	2,90 3,30	6,00				1,90	
10,00		Argille limose con sabbia, di colore grigio-verdastro, poco umide e quasi prive di plasticità, a struttura scagliosa, dure e compatte ma, a luoghi, disturbate dal carotaggio. Sono presenti livelli maggiormente sabbiosi e/o limosi tra m 7,00-7,50, 9,80-10,00 e tra 11,50-11,70	5,50 5,95		SEMPLICE	100			livello della falda rilevato nel vecchio piezometro a tutto aperto sito nella vicinanza
15,00			9,00 9,35						



Fig. 16: scheda relativa al sondaggio SP1 (stratigrafia e cassette catalogatrici)

Committente:		BORRANEA Soc. cons. a r.l.				data sondaggio: 23/02/2023			
Cantiere:		Piattaforma tecnologica per il trattamento e valorizzazione dei RSU sita in Contrada Borranea nel Comune di Trapani - lotto n° 1 - Discarica per rifiuti non pericolosi - CIG 89352376D4				numero sondaggio:			
Località:		Trapani				SI 3			
Trivella:		Solimec - SM-9							
Tipo sondaggio:		a rotazione e carotaggio continuo							
Profondità (m)	Stratigrafia	Descrizione	Campioni	Rivestimento	Carotiere	Carotaggio (%)	SPT (n° colpi)	Falda	Note
0,30		Terreno vegetale argilloso-limoso, di colore giallo-bruno, umido e plastico con piccoli inclusi litici eterogenei		4,50					Auto inclinometro sino a m 13,40
		Argille limose, sabbiose, di colore giallo-bruno, alterate, umide e plastiche, a struttura scagliosa. Sono presenti sottili velli di sabbie e/o limi.	 2,60  3,00						
5,00			 5,00  5,40						
10,00		Argille limose, sabbiose, di colore grigio azzurro, poco umide e quasi prive di plasticità, a struttura scagliosa, dure e compatte ma, a luoghi, disturbate dal carotaggio. Sono presenti livelli maggiormente sabbiosi e/o limosi anche destrutturati dal carotaggio tra m 7,50-7,70, 11,00-11,50 e tra m 12,00-12,30	 9,30  9,50		SEMPLICE	100		 6,70	
15,00									



Fig. 17: scheda relativa al sondaggio SI 3 (stratigrafia e cassette catalogatrici)

Committente:		BORRANEA Soc. cons. a r.l.				data sondaggio: 13-14/03/2023			
Cantiere:		Piattaforma tecnologica per il trattamento e valorizzazione del RSU sito in Contrada Borranea nel Comune di Trapani - lotto n° 1 - Discarica per rifiuti non pericolosi - CIG 89352376D4				numero sondaggio:			
Località:		Trapani				SP 4			
Trivella:		Solimac - SM-9							
Tipo sondaggio:		a rotazione e carotaggio continuo							
Profondità (m)	Stratigrafia	Descrizione	Campioni	Rivestimento	Carotiere	Carotaggio (%)	SPT (n° colpi)	Falda	Note
5,10		Terreno vegetale argilloso-limoso, di colore giallo-bruno, umido plastico con piccoli inclusi litici eterogenei							sulle piezometriche a m 1,25 e 7,00
		Argille limose, sabbiose, di colore giallo-bruno, alterate, umide e plastiche. Quasi prive di inclusi litici. Sono presenti sottili veili di sabbia e/o limo di colore giallastro	2,30 2,80	6,00					
5,40		Sabbie limose a grana fine, di colore grigio, umide e prive di plasticità. Incluso ciottolo di 5 cm di diametro	5,40 5,70						
5,20									
		Argille limose molto sabbiose, di colore grigio azzurro, poco umide e quasi prive di plasticità. La struttura è scagliosa, dure e compatte ma, a luoghi, disturbate dal carotaggio. Sono presenti livelli maggiormente sabbiosi e/o limosi tra m 5,40-6,30 (con elemento lapideo di cm 5 di diametro circa), 7,00-7,50, 9,60-10,00, 11,10-11,70 e tra m 14,00-14,25	8,35 8,75		SEMPLICE	100			
10,00									
15,00									



Fig. 18: scheda relativa al sondaggio SP4 (stratigrafia e cassette catalogatrici)

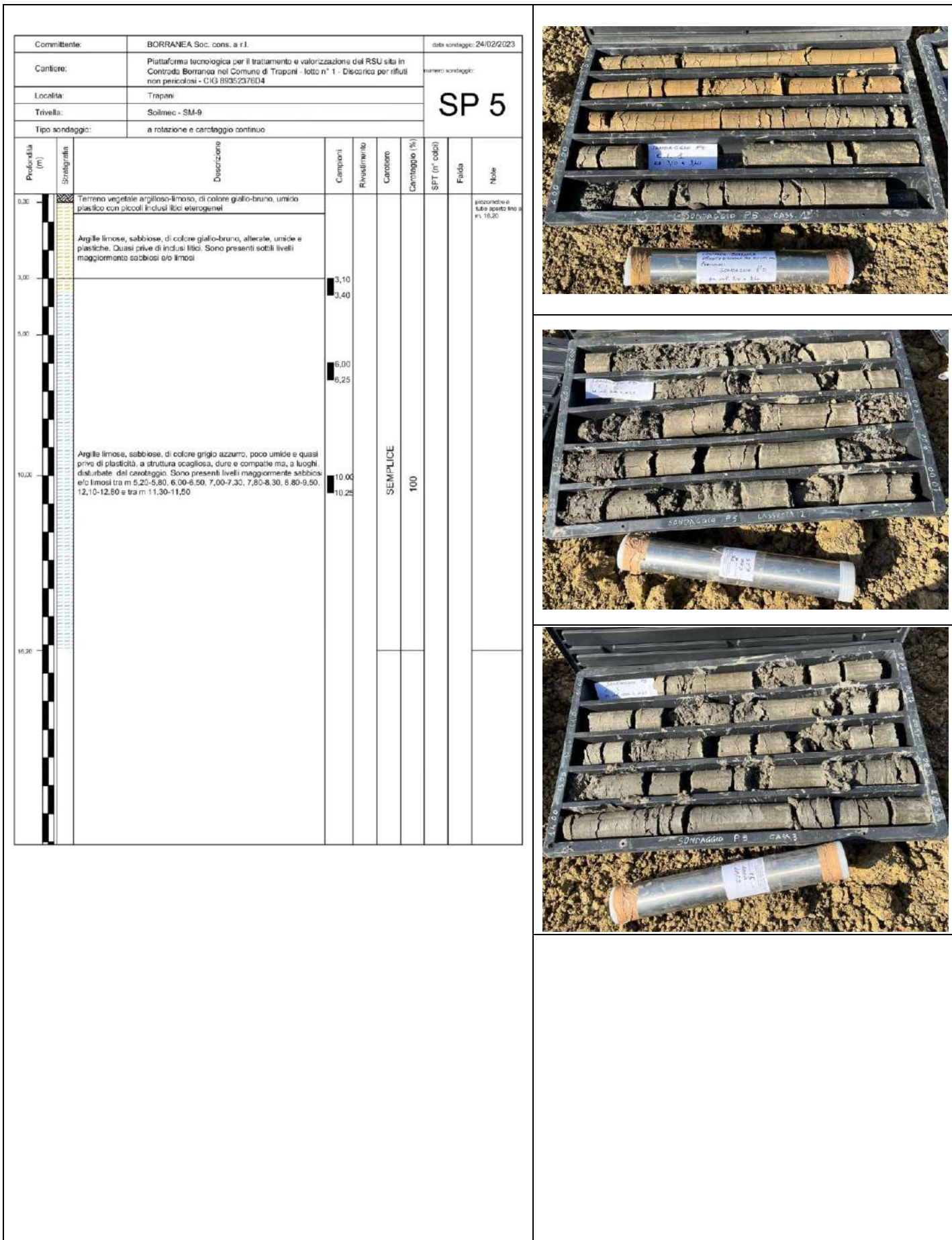


Fig. 19: scheda relativa al sondaggio SP5 (stratigrafia e cassette catalogatrici)

Come si è detto, in alcuni dei fori di sondaggio sono stati posti in opera tubi inclinometrici in alluminio, in altri celle piezometriche tipo Casagrande, in altri ancora piezometri a tubo aperto in pvc.

In Fig. 20 si riporta una breve rassegna fotografica delle attività di posa nei diversi fori di sondaggio.



Fig. 20: rassegna fotografica relativa alla posa in opera di tubi inclinometrici, celle piezometriche tipo Casagrande e piezometri a tubo aperto

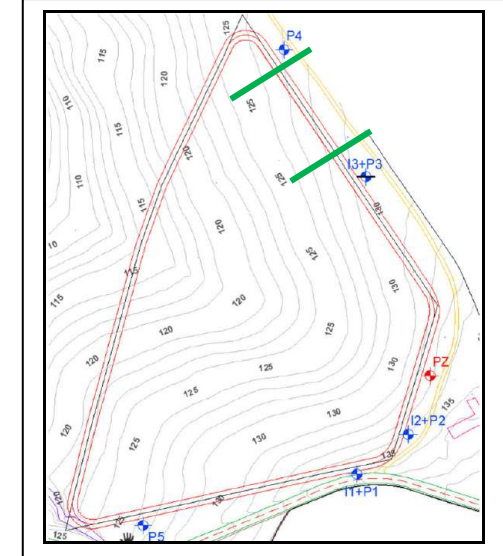
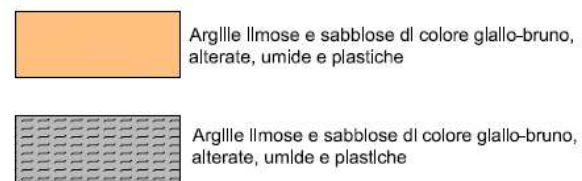
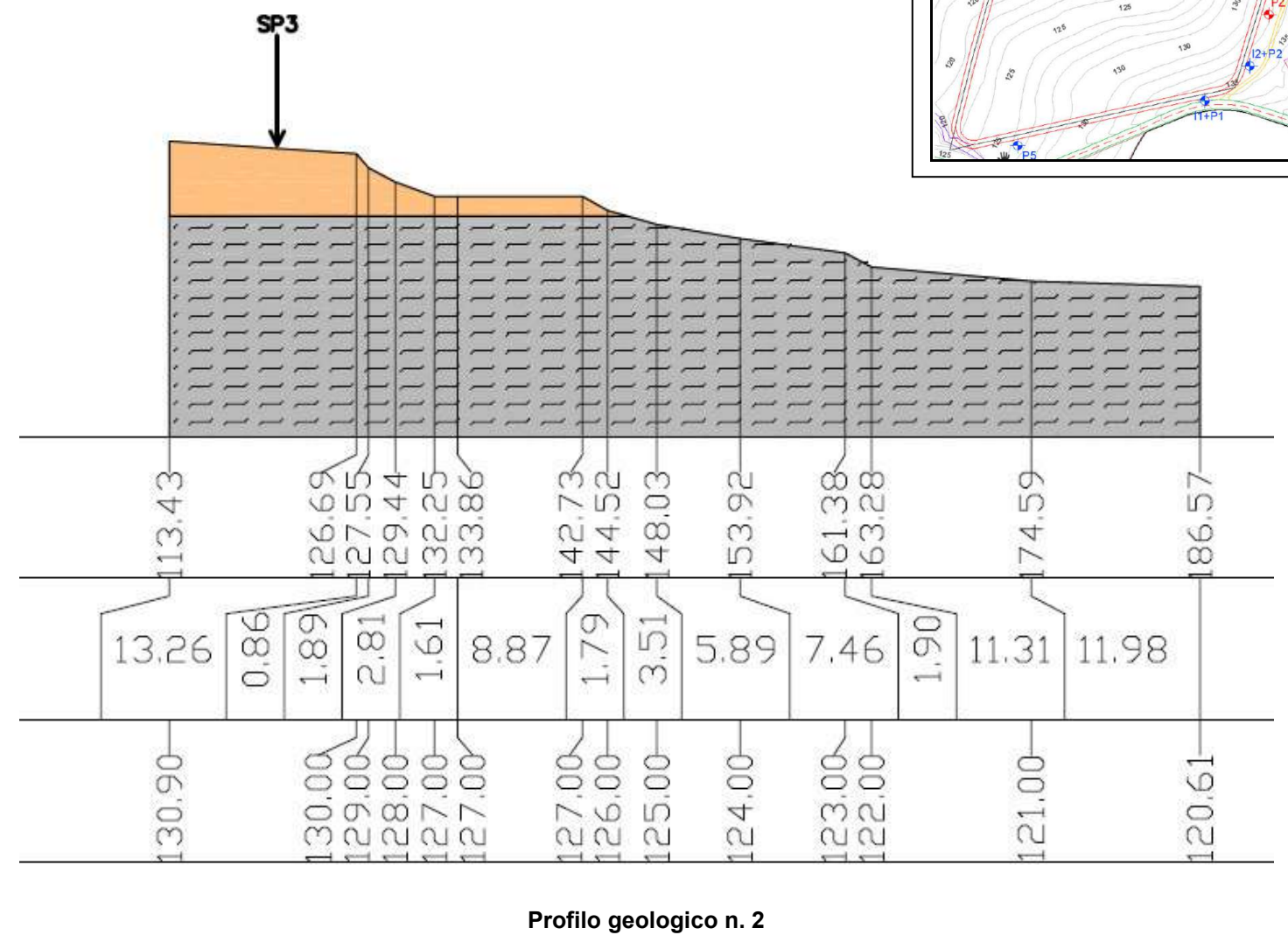
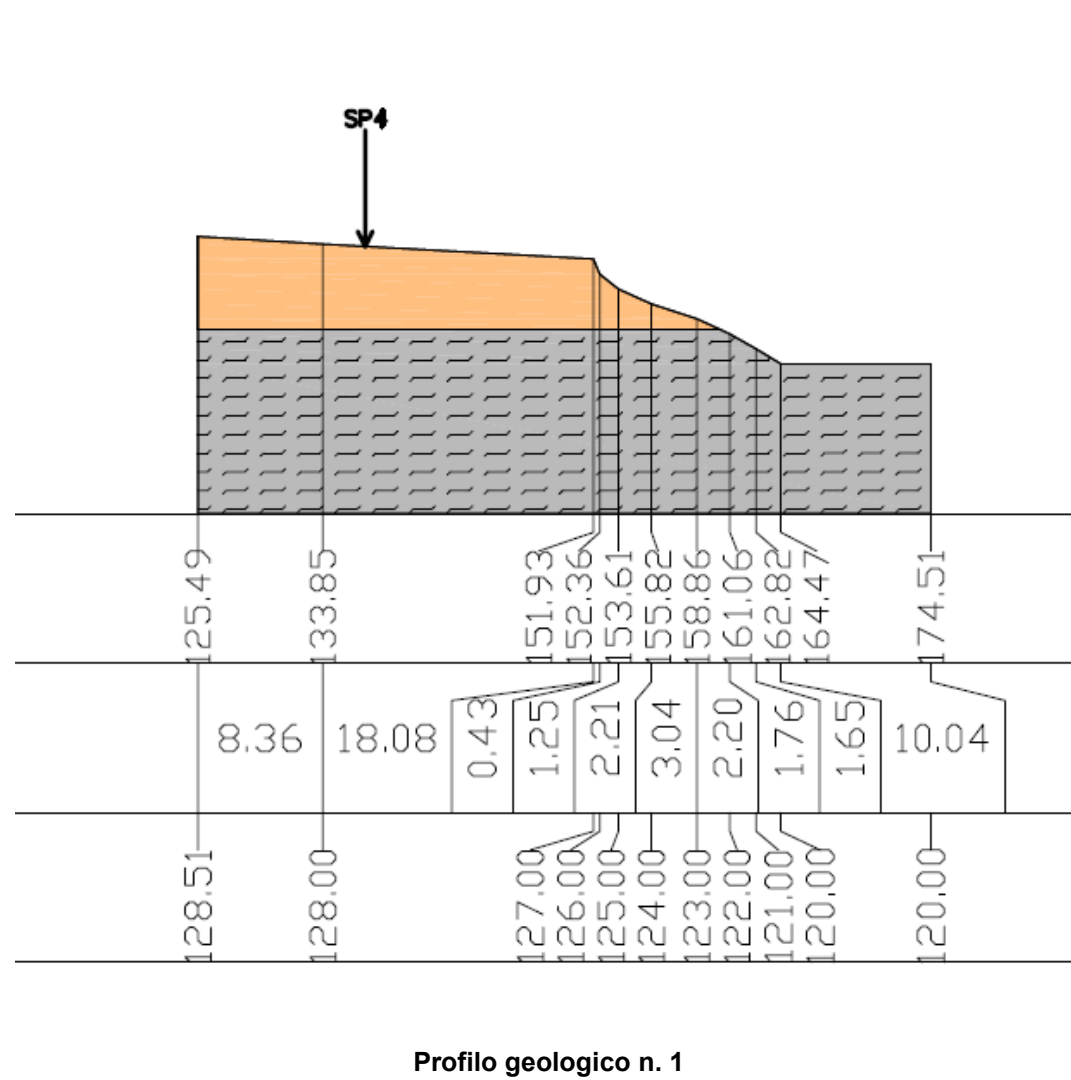


Fig. 21: profili geologici nn. 1 e 2 in scala 1:500

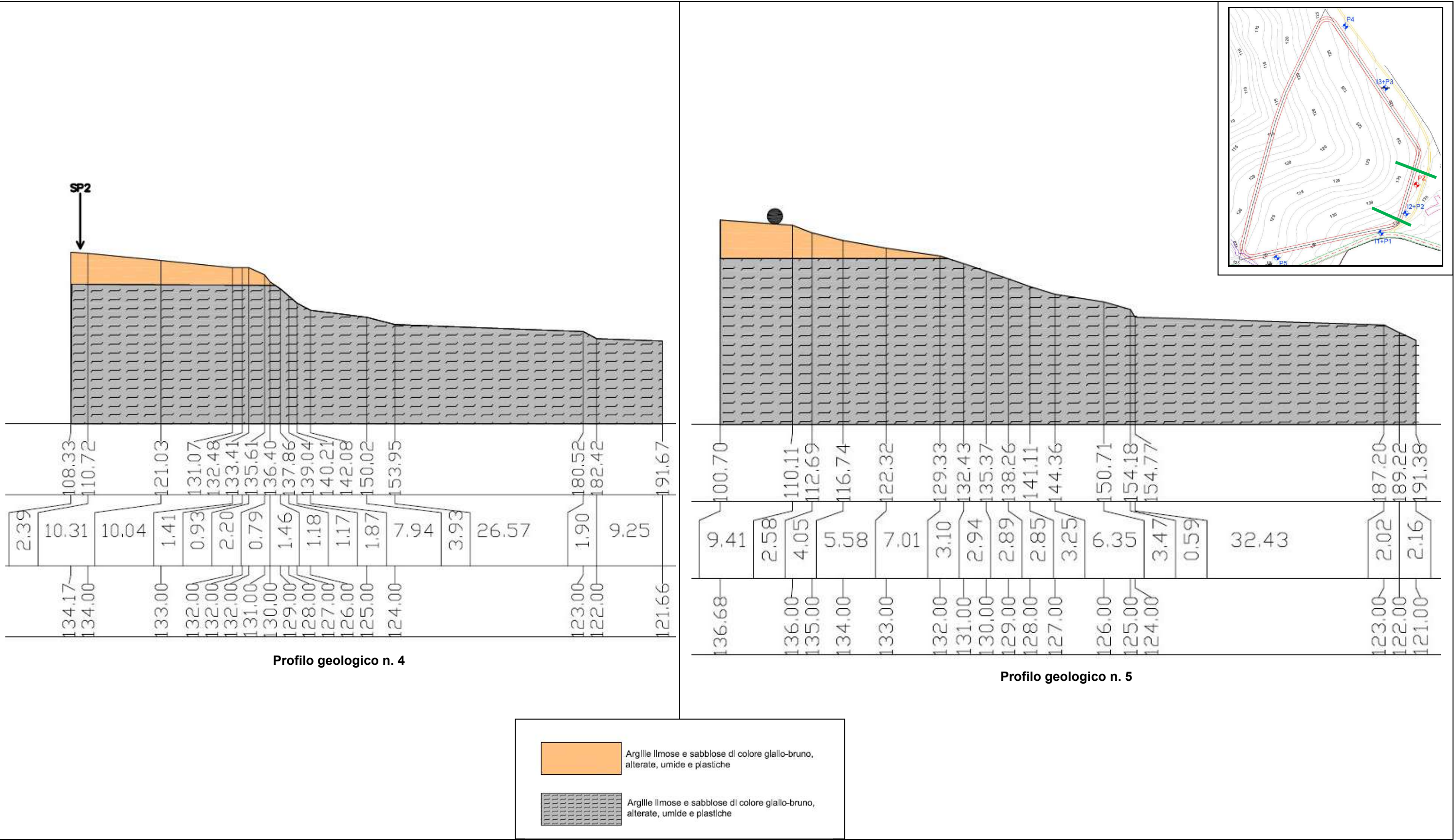


Fig. 22: profili geologici nn. 4 e 5 in scala 1:500



Fig. 23: profili geologici nn. 6 e 7 in scala 1:500

6. CARATTERI IDROGEOLOGICI

6.1 Caratteristiche di permeabilità

Dal punto di vista idrogeologico le argille rilevate nell'area di progetto e in un vasto intorno di essa presentano caratteristiche idrogeologiche proprie dei terreni a permeabilità molto bassa, con un grado di permeabilità addirittura nullo per gli orizzonti prettamente argillosi grigio scuri di base.

La tessitura argillosa è infatti caratterizzata da una porosità elevata, ma allo stesso tempo da una permeabilità sostanzialmente trascurabile.

I sottilissimi livelli sabbiosi, che talvolta si rinvencono in seno alla massa argillosa, costituiscono soltanto degli orizzonti molto limitati a maggior grado di permeabilità in seno alla successione e pertanto non modificano assolutamente il comportamento complessivo della formazione.

Lo stesso può dirsi per i giunti presenti all'interno della successione, anch'essi non in grado di modificarne in maniera sostanziale il comportamento idrogeologico.

D'altronde gli scavi sinora eseguiti per la realizzazione delle diverse sezioni della vasca non hanno intercettato alcuna vera e propria superficie piezometrica.

In termini puramente qualitativi nella tabella di *Casagrande e Fadum*, che si riporta in *Fig. 24* sono indicati i diversi valori del coefficiente di permeabilità K in funzione della granulometria, da cui per le argille deriva un drenaggio praticamente trascurabile.

k cm/sec	10^2	10^1	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
drenaggio	buono						povero			praticamente impermeabile		
	ghiaia pulita		sabbia pulita e miscele di sabbia e ghiaia pulita			sabbia fina, limi organici e inorganici, miscele di sabbia, limo e argilla, depositi di argilla stratificati			terreni impermeabili, argille omogenee sotto la zona alterata dagli agenti atmosferici			
						terreni impermeabili modificati dagli effetti della vegetazione e del tempo						

Fig. 24: tabella di Casagrande e Fadum

I bassi valori di permeabilità trovano riscontro nelle misure acquisite in cella edometrica su alcuni campioni di terreno prelevati in sito (*cfr.* par. 8.7) e giustificano d'altronde lo sviluppo che

il reticolato idrografico assume nelle vaste aree di affioramento della formazione argillosa e specificamente nell'area oggetto dell'insediamento della nuova vasca. L'elevata frequenza di drenaggio conferma un assetto territoriale caratterizzato in larga prevalenza da formazioni impermeabili.

L'esiguo potere assorbente è dunque limitato alle coltri superficiali (Fa), laddove un certo grado di alterazione, una certa eterogeneità granulometrica e la conseguente maggiore porosità consentono una modesta infiltrazione, creando tuttavia le condizioni per la locale saturazione degli orizzonti prossimi al tetto delle sottostanti argille di colore grigio.

6.2 Misure ai piezometri

Durante l'esecuzione dei sondaggi geognostici è emersa la presenza di modesti livelli piezometrici in SP2 a m 1,90 di profondità e in SP3 a m 6,25 di profondità.

Una volta installati i piezometri, in SP1, SP2, SP3, SP4 e SP5, il 14 marzo 2023 è stata eseguita una prima tornata di letture (lettura di zero), il 14 aprile 2023 una seconda tornata, il 15 giugno una terza.

Nella tabella di Fig. 25 sono riportate le misurazioni delle profondità dei livelli piezometrici rilevate.

PIEZOMETRO	TIPO STRUMENTO	PROFONDITA' DI POSA (m)	DATA INSTALLAZIONE	DATA / MISURE (m)					
				14/03/23	14/04/23	15/06/23			
SP 1	Casagrande	3.20	22/02/2023	asciutto	-1.85	-1.39			
	Casagrande	6.70		asciutto	-2.12	-1.44			
SP 2	tubo aperto (vecchio)	30.00	sconosciuta	-1.90	----				
			spurgo del 14/3/23	-3.35	-4.04	-3.98			
	Casagrande	3.00	13/03/2023	asciutto	asciutto	-2.98			
	Casagrande	6.75		asciutto	asciutto	-3.66			
SP 3	Casagrande	2.20	23/02/2023	asciutto	asciutto	asciutto			
	Casagrande	6.70		-6.25	-4.23	-4.60			
SP 4	Casagrande	1.25	14/03/2023	asciutto	asciutto	asciutto			
	Casagrande	7.00		asciutto	asciutto	-2.85			
SP 5	tubo aperto	16.20	24/02/2023	asciutto	-15.37	-1.30			

Fig. 25: rilievo dei livelli piezometrici

Si sono riscontrati quindi modesti adunamenti idrici in alcuni piezometri, che però non rappresentano di fatto una reale risorsa idrica, tanto è vero nell'area non è presente alcun pozzo, neanche della tipologia ad anelli prefabbricati di modesta profondità, nonostante la zona abbia una spiccata vocazione agricola. Si evidenzia invece la presenza di qualche laghetto collinare, direttamente scavato nelle argille, uno dei quali a brevissima distanza dalla nuova vasca.

Queste considerazioni circa la complessiva assenza di una vera e propria circolazione idrica sotterranea trovano conferma anche nel comportamento idrologico dei piezometri della rete di monitoraggio della superiore discarica, che nel periodo estivo, dopo l'esecuzione dello spurgo che deve precedere il campionamento delle acque, non sono più in grado di ricaricare e quindi non permettono di compiere il campionamento stesso secondo procedura.

Il regime di queste acque non solo dunque è stagionale, legato quindi alle piogge, ma spesso è persino di tipo impulsivo, connesso cioè al singolo evento piovoso in grado di ricaricare quasi istantaneamente il modestissimo bacino imbrifero e di creare un temporaneo gradiente idraulico.

La condizione per la quale la porzione alterata della formazione argillosa possa temporaneamente saturarsi deve tuttavia essere presa in considerazione nelle verifiche di stabilità.

7. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

7.1 Parametrizzazione utilizzata in progetto

Come si è detto al precedente paragrafo 5.2, lo studio geologico propedeutico alla progettazione esecutiva della piattaforma tecnologica per il trattamento e la valorizzazione del R.S.U., comprendente la realizzazione della nuova vasca (lotto 1), era stato svolto dal geologo dott. Nania, che si era avvalso due distinte campagne geognostiche (la prima del 2010, la seconda del 2018) comprendenti nel loro complesso n. 9 sondaggi a carotaggio continuo, 13 sondaggi ambientali, indagini sismiche, installazione di piezometri, prove di permeabilità Lefranc e prove geotecniche di laboratorio su campioni.

Sulla base dei risultati di queste indagini, il geologo incaricato distingueva essenzialmente tre tipi litologici in successione verticale:

- coltre alterata e plastica (Colluvium) formata da limi e argille di spessore compreso tra 1,10 m e 3,50 m;
- formazione alterata **FA**, costituita da argille debolmente sabbiose di spessore compreso da 1,40 m e 5,00 m;
- formazione di base **FB**, costituita da argille, localmente da argille gessose, di colore grigiastro, a struttura scagliettata di spessore molto elevato (spessore accertato fino a 30 m di profondità).

Con riferimento soprattutto alle argille alterate (FA) e alle argille grigie di base (FB), le prove geotecniche di laboratorio condotte in quel contesto portarono ad assumere i seguenti valori medi:

	γ	γ_{sat}	c_u	c'	ϕ'
	kN/m ³	kN/m ³	kPa	kPa	°
FA	19	20	70	28	20
FB	19	20	80	29	24

Fig. 26: tabella dei valori di peso di volume e di resistenza al taglio assunti dal progettista

7.2 Prelievo di campioni con infissione delle fustelle

In data 12 gennaio 2023, su richiesta avanzata dall'impresa esecutrice dei lavori, sono stati prelevati in sito 4 campioni indisturbati di terreno, mediante infissione, utilizzando la benna di un escavatore meccanico, di altrettante fustelle metalliche a pareti sottili (per la loro localizzazione, già riportata in *Fig. 13*, si veda anche la successiva *Fig. 38*):

- il campione C1 è stato prelevato sulla scarpata in prossimità del *Dissesto 1* (cfr. par. 3.2), ad una profondità di m 7,80 dall'originario piano di campagna (riferito al rilievo di progetto);
- il campione C2 è stato prelevato sulla scarpata lato Est, distante dal *Dissesto 1*, ad una profondità di m 6,40 dall'originario piano di campagna;
- il campione C3 è stato prelevato sul fondo scavo in prossimità del *Dissesto 1*, ad una profondità di m 7,00 dall'originario piano di campagna;
- il campione C4 è stato prelevato sul fondo scavo, verso Ovest, distante dal *Dissesto 1*, ad una profondità di m 10,30 dall'originario piano di campagna.

Due di essi (C1 e C2) appartengono dunque alle argille alterate **FA**, gli altri due (C3 e C4) appartengono invece alle argille di base **FB**.

Su di essi sono state eseguite le prove di identificazione (contenuto d'acqua, peso unità di volume, peso specifico, analisi granulometrica), prove di permeabilità in cella edometrica e prove di taglio diretto con determinazione della resistenza residua.

Il successivo 12 aprile 2023 altri 3 campioni indisturbati di terreno sono stati prelevati mediante infissione di fustelle metalliche a pareti sottili, utilizzando anche questa volta la benna di un escavatore meccanico:

- il campione C5 è stato prelevato dalla berma di quota topografica intermedia;
- Il campione C6 è stato prelevato dalla berma realizzata alla quota topografica più bassa.
- Il campione C7 è stato prelevato dalla berma posizionata a quota topografica più alta.

I tre campioni appartengono alle argille alterate **FA**. Per la loro localizzazione si veda la successiva *Fig. 27*.

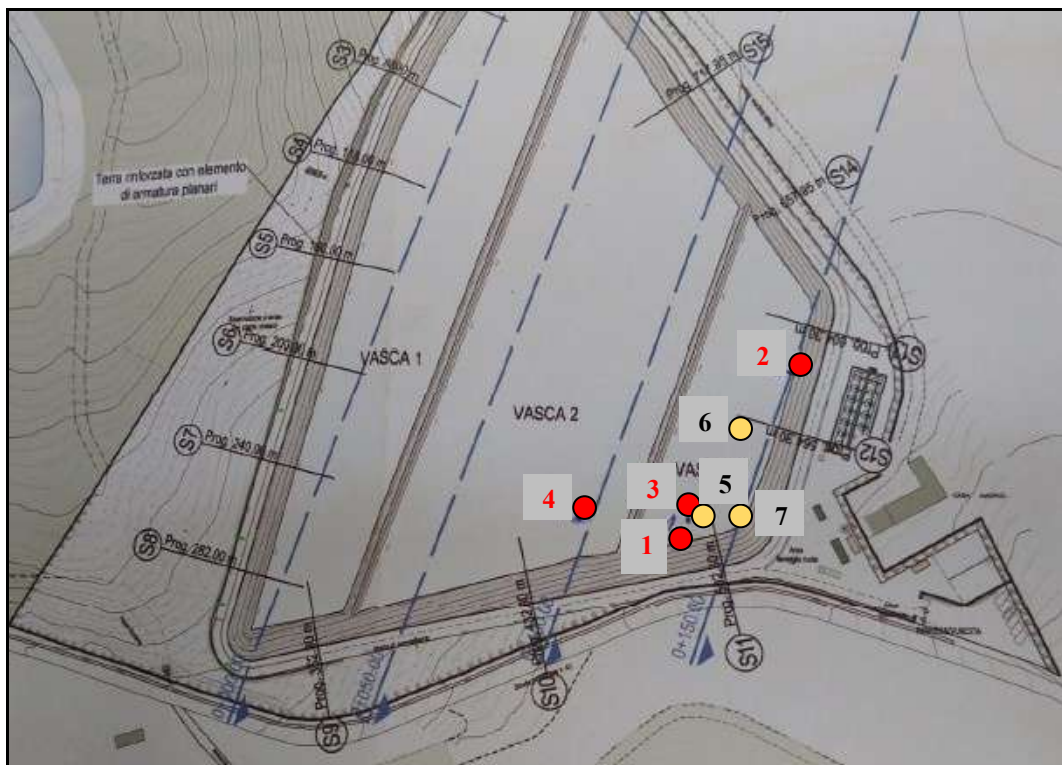


Fig. 27: localizzazione dei campioni prelevati tramite infissione di fustelle metalliche

7.3 Prelievo di campioni nel corso dei sondaggi geognostici

Nell'ambito della campagna geognostica eseguita secondo il piano di indagini programmato dall'impresa, su invito della DL (di cui si è detto al par. 5.3), sono stati prelevati 10 campioni indisturbati di terreno: tre all'interno del foro di sondaggio denominato *SI 1*, alle profondità di m 3,00 (*SI 1_C1*), m 5,00 (*SI 1_C2*) e m 14,00 (*SI 1_C3*) dal piano di campagna (p.c.), tre all'interno del foro di sondaggio *SI 3*, alle profondità di m 2,60 (*SI 3_C1*), m 5,00 (*SI 3_C2*) e m 9,20 (*SI 3_C3*), due all'interno del foro di sondaggio *SP4*, alle profondità di m 2,30 (*SP4_C1*) e di m 8,35 (*SP4_C2*), e due all'interno del foro di sondaggio *SP5*, alle profondità di m 3,10 (*SP5_C1*) e di m 10,00 (*SP5_C2*), utilizzando sempre fustelle metalliche spinte a pressione (Shelby).

I campioni prelevati, etichettati e sigillati, sono stati tempestivamente inviati al laboratorio geotecnico.

Dei dieci campioni, quattro afferiscono alle argille alterate **FA** e sei alle argille grigie di base **FB**.

Le prove condotte sui dieci campioni indisturbati hanno riguardato la definizione delle caratteristiche indici dei terreni (peso di volume, contenuto naturale d'acqua, ecc.), la definizione dei loro limiti di consistenza, ovvero i cosiddetti limiti di Atterberg, e la determinazione delle loro proprietà geomeccaniche attraverso prove di taglio diretto e prove di compressione semplice non confinata ELL.

7.4 Analisi granulometriche

Su tutti i campioni prelevati, i quattro di gennaio 2023 e i dieci della campagna di indagini successiva, sono state eseguite analisi granulometriche (colore, granulometria, ecc.).

Le relative descrizioni con le rispettive percentuali granulometriche, riassunte nella scheda di Fig. 28, sono tratte dalle certificazioni fornite dal laboratorio geotecnico *Geo.Tec.* di Palermo, dotato di autorizzazione ministeriale ai sensi dell'art. 59 del D.P.R. 380/2001.

Si precisa che in tutte le schede riassuntive dei risultati delle analisi e delle prove, i campioni afferenti alle argille alterate superficiali **FA** sono indicati con il colore beige, mentre quelli afferenti alle argille di base **FA** sono indicati con il colore grigio.

campione (sigla)	profondità (m)	descrizione del campione e percentuali granulometriche		
C1	7,80	Argilla con limo		
		Argilla = 51,5%	Limo = 43,9%	Sabbia = 4,2%
C2	6,40	Argilla con limo debolmente sabbiosa		
		Argilla = 58,0%	Limo = 36,7%	Sabbia = 5,2%
C3	7,00	Sabbia argilloso limosa		
		Argilla = 23,3%	Limo = 16,9%	Sabbia = 59,8%
C4	10,30	Sabbia limoso argillosa		
		Argilla = 18,1%	Limo = 22,9%	Sabbia = 59,0%
SI 1_C1	3,00 - 3,50	Argilla con limo		
		Argilla = 66,8%	Limo = 29,4%	Sabbia = 3,8%
SI 1_C2	5,00 - 5,40	Argilla con limo		
		Argilla = 60,0%	Limo = 36,1%	Sabbia = 3,9%
SI 1_C3	14,00 - 14,30	Argilla con limo debolmente sabbiosa		
		Argilla = 52,7%	Limo = 41,9%	Sabbia = 5,4%
SI 3_C1	2,60 - 3,00	Argilla limosa		
		Argilla = 75,9%	Limo = 19,4%	Sabbia = 2,4%
SI 3_C2	5,00 - 5,40	Argilla con limo		
		Argilla = 50,8%	Limo = 45,1%	Sabbia = 4,1%
SI 3_C3	9,20 - 9,50	Argilla con limo debolmente sabbiosa		

		Argilla = 40,4%	Limo = 50,1%	Sabbia = 6,9%
SP4_C1	2,30 - 2,80	Argilla con limo		
		Argilla = 66,1%	Limo = 32,7%	Sabbia = 1,2%
SP4_C3	8,35 - 8,75	Argilla con limo		
		Argilla = 68,0%	Limo = 29,5%	Sabbia = 2,5%
SP5_C1	3,10 - 3,40	Argilla limoso sabbiosa		
		Argilla = 58,6%	Limo = 21,5%	Sabbia = 1,4%
SP5_C3	10,00 - 10,25	Argilla limoso sabbiosa		
		Argilla = 67,4%	Limo = 18,1%	Sabbia = 14,3%

Fig. 28: granulometrie dei campioni prelevati nella due campagne di indagini

Confermando le descrizioni assunte nella prima campagna di indagini, le analisi granulometriche evidenziano che le argille alterate **FA** sono costituite quasi esclusivamente da argille limose mentre il substrato argilloso di colore grigio-scuro è composto in prevalenza da argille e limi, con percentuali di sabbie generalmente trascurabili.

Fanno eccezione i campioni **C3** e **C4**, a carattere prevalentemente sabbioso, ma le condizioni del contesto (scavi eseguiti) in cui sono stati prelevati potrebbero aver condizionato la reale composizione granulometrica.

7.5 Caratteristiche indici

Su tutti i 14 campioni disponibili è stata fornita la descrizione in termini macroscopici, è stato determinato il contenuto naturale d'acqua W_n , il peso di volume γ , il peso secco dell'unità di volume γ_d e il peso del secco γ_s . I valori misurati sono riassunti nella tabella di Fig. 29.

Si rilevano valori maggiori del contenuto naturale d'acqua nelle argille alterate **FA**, mediamente pari al 25%, mentre risultano inferiori nelle argille del substrato **FB**, mediamente pari al 20%, senza che vi sia però alcuna relazione proporzionale tra la profondità dei campioni prelevati e il diverso contenuto d'acqua.

Poco differenziati sono i valori del peso di volume γ , mediamente pari a 18,95 kN/mc nelle argille alterate **FA** ed a 19,63 kN/mc nelle argille di base **FB**.

Valori pressoché identici si rilevano nei valori medi del peso del secco γ_s , mentre il valore medio del peso secco dell'unità di volume γ_d risulta persino inferiore nelle argille di base **FB** (13,82 kN/mc) rispetto a quelle alterate **FA** (15,33 kN/mc).

campione	Profondità (m)	Wn (%)	γ (kN/mc)	γ_d (kN/mc)	γ_s (kN/mc)
C1	7,80	28,9	17,85	13,85	26,99
C2	6,40	28,7	18,34	14,26	26,98
C5	berma interm.	18,0	21,18	17,95	26,85
C6	berma inf.	20,8	17,59	14,57	26,87
C7	berma sup.	24,3	19,29	15,51	26,90
SI 1_C1	3,00 - 3,50	26,1	19,01	15,07	26,91
SI 3_C1	2,60 - 3,00	27,5	18,51	14,52	27,04
SP4_C1	2,30 - 2,80	22,7	19,34	15,76	26,75
SP5_C1	3,10 - 3,40	17,1	19,36	16,53	26,89
media	---	23,8	18,95	15,33	26,91
C3	7,00	20,5	19,08	15,83	27,03
C4	10,30	13,6	20,36	17,92	26,93
SI 1_C2	5,00 - 5,40	21,3	19,84	16,35	27,14
SI 1_C3	14,00 - 14,30	17,2	19,80	16,90	27,26
SI 3_C2	5,00 - 5,40	22,7	18,92	15,42	26,97
SI 3_C3	9,20 - 9,50	29,5	---	---	26,01
SP4_C3	8,35 - 8,75	21,9	---	---	26,97
SP5_C3	10,00 - 10,25	17,1	19,77	16,55	26,97
media	---	20,47	19,63	13,82	26,91

Fig. 29: caratteristiche indici delle argille sabbiose di superficie As

7.6 Limiti di consistenza

I contenuti di acqua corrispondenti al passaggio tra i vari stati di consistenza sono conosciuti come limiti di consistenza delle terre o meglio come *limiti di Atterberg*. Essi rivestono una notevole importanza per una definizione di tipo qualitativo delle terre, poiché permettono di definire la loro consistenza fisica in termini di stati fluido, plastico, semisolido e solido. Ciascun passaggio di stato è infatti marcato da un determinato valore di contenuto di acqua del terreno:

il passaggio tra stato fluido e stato plastico è detto limite liquido Wl ; quello tra stato plastico e stato semisolido è detto limite plastico Wp .

L'ampiezza del campo plastico è determinata dalla differenza tra il contenuto d'acqua corrispondente al valore del limite liquido e il contenuto d'acqua corrispondente al valore del limite plastico. Ad essa viene dato il nome di indice plastico Ip ($Ip = Wl - Wp$), che rappresenta proprio l'intervallo di umidità all'interno del quale il terreno si trova allo stato plastico.

L'indice di consistenza Ic infine, in funzione del contenuto naturale d'acqua Wn del terreno, definisce quanto esso sia prossimo ad uno degli stati fisici riconosciuti sulla base dei valori limiti. In pratica ne caratterizza qualitativamente il comportamento fisico-meccanico ($Ic = Wl - Wn/Ip$) e, oltre ad indicare lo stato fisico in cui si trova il terreno, fornisce informazioni qualitative sulle sue caratteristiche meccaniche: all'aumentare di Ic aumenta la resistenza al taglio del terreno e si riduce la sua compressibilità.

campione (sigla)	profondità (m)	Wn (%)	Wl (%)	Wp (%)	Ip	Ic
<i>SI 1_C1</i>	3,00 - 3,50	26,1	69,85	34,10	35,75	1,22
<i>SI 3_C1</i>	2,60 - 3,00	27,5	71,34	34,83	36,51	1,20
<i>SP4_C1</i>	2,30 - 2,80	22,7	64,41	30,74	33,67	1,24
<i>SP5_C1</i>	3,10 - 3,40	17,1	60,81	25,25	35,56	1,23
media	---	25,2	---	---	35,37	1,22
<i>SI 1_C2</i>	5,00 - 5,40	21,3	57,28	30,99	26,29	1,37
<i>SI 1_C3</i>	14,00 - 14,30	17,2	61,61	29,20	32,41	1,37
<i>SI 3_C2</i>	5,00 - 5,40	22,7	59,31	31,15	28,16	1,30
<i>SI 3_C3</i>	9,20 - 9,50	29,5	64,12	29,82	34,30	1,01
<i>SP4_C3</i>	8,35 - 8,75	21,9	56,50	29,84	26,66	1,30
<i>SP5_C3</i>	10,00 - 10,25	17,1	67,16	25,65	41,51	1,21
media	---	20,47	---	---	31,55	1,26

Fig. 30: limiti di consistenza

Nessuno dei campioni, afferenti sia alle argille di superficie **FA**, sia alle argille del substrato **FB**, presentano un contenuto d'acqua W_n tale da porsi in seno al campo plastico, ovvero tra il limite di liquidità W_l e quello di plasticità W_p . Presentano dunque un contenuto d'acqua sempre sotto al limite di plasticità W_p e per questo potrebbero definirsi “*poco deformabili*” sotto i carichi; si deve però rilevare che lo stesso contenuto d'acqua nel campione *SI 3_C3* si attesta su un valore di W_n quasi coincidente al limite di plasticità W_p (di poco inferiore), venendosi a trovare dunque non lontano dal campo plastico.

Ma in genere è decisamente inferiore al suddetto limite W_p , ovvero ben lontano dal campo plastico. Per questi campioni, al diminuire del contenuto d'acqua, diminuisce il volume e il campione possiede una minore deformabilità rispetto a quello ricadente in prossimità del campo plastico.

Queste considerazioni trovano riscontro nel posizionamento dei valori limite ottenuti nel diagramma di plasticità di Casagrande (W_l/I_p) di Fig. 31: si osserva che essi ricadono in prossimità e poco sopra la cosiddetta “Linea A”, dove $I_p = 0,73 (W_l - 20)$, nel campo delle “argille inorganiche”.

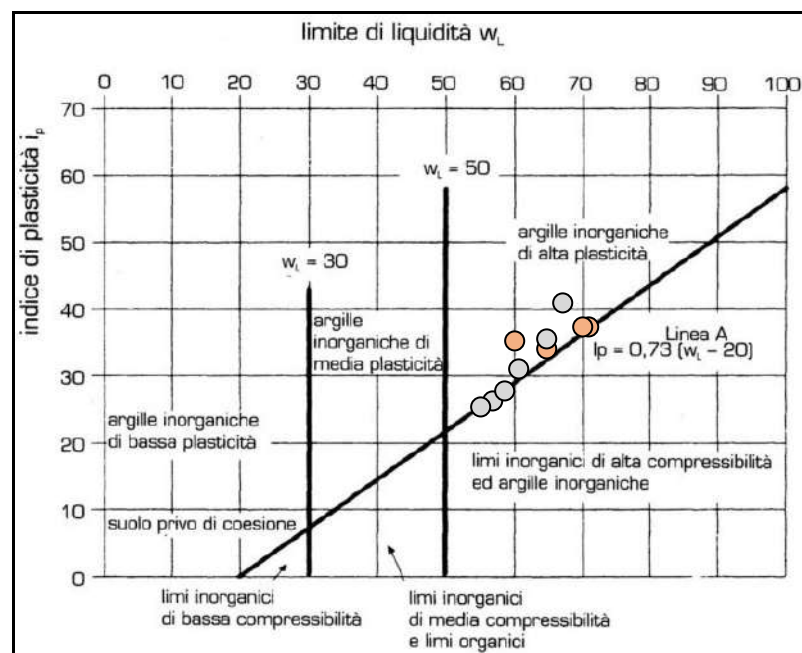


Fig. 31: diagramma di plasticità

Sulla base dell'indice di plasticità I_p medio misurato sia sui campioni afferenti alle argille alterate di superficie **FA** (35,37) sia sui campioni del substrato **FB** (31,55), si può affermare che esse siano da considerare “*plastiche*”.

TERRENO	I_p
NON PLASTICO	0 - 5
POCO PLASTICO	5 - 15
PLASTICO	15 - 40
MOLTO PLASTICO	> 40

Fig. 32: plasticità dei terreni sulla base dell'Indice di Plasticità I_p

Sulla base dell'indice di consistenza medio I_c , pari a 1,22 per le argille alterate di superficie **FA** ed a 1,26 per quelle di base **FB**, entrambe le tipologie litologiche rientrano nel campo delle argille “*semisolide*” o “*solide*”. Tale parametro fornisce utili informazioni qualitative sul comportamento dei terreni, nel caso specifico proprio per la valutazione delle dinamiche osservate sulle sponde della vasca.

CONSISTENZA	I_c
FLUIDA	< 0
FLUIDO-PLASTICA	0 - 0.25
MOLLE-PLASTICA	0.25 - 0.50
PLASTICA	0.50 - 0.75
SOLIDO-PLASTICA	0.75 - 1
SEMISOLIDA ($w > w_s$) O SOLIDA ($w < w_s$)	> 1

Fig. 33: plasticità dei terreni sulla base dell'Indice di Consistenza I_c

7.7 Permeabilità misurata in cella edometrica

Sui quattro campioni indisturbati prelevati il 12 gennaio 2023 mediante l'infissione delle fustelle utilizzando la benna di un escavatore meccanico, furono misurati in laboratorio i valori di permeabilità diretta in cella edometrica, dopo averli sottoposti a consolidazione con pressioni comprese tra 98 e 158 kPa.

Nella tabella di Fig. 34 si riportano i valori di permeabilità calcolati sull'ultimo incremento di carico.

campione	Profondità (m)	Pressione di consolidazione	Permeabilità K finale
C1	7,80	98 kPa	$1,31 \cdot 10^{-10}$ m/sec
C2	6,40	158 kPa	$5,42 \cdot 10^{-11}$ m/sec
C3	7,00	98 kPa	$2,06 \cdot 10^{-9}$ m/sec
C4	10,30	158 kPa	$5,70 \cdot 10^{-10}$ m/sec

Fig. 34: coefficienti di permeabilità misurati in cella edometrica

7.8 Caratteristiche di resistenza alla compressione

Su quattro campioni afferenti alle argille alterate di superficie **FA** e due campioni afferenti alle argille di base **FB** sono state condotte prove di compressione a dilatazione laterale libera, attraverso cui è stato possibile ricavare la resistenza alla compressione σ .

Dalla resistenza alla compressione è anche possibile stimare la coesione non drenata C_u ($C_u = \frac{1}{2} \sigma$).

I valori misurati sono riassunti nella tabella di Fig. 35.

campione	Profondità (m)	resist a rottura σ (kPa)	Coesione non drenata C_u (kN/mq)
SI 1_C1	3,00 - 3,50	163	81
SI 3_C1	2,60 - 3,00	79	39
SP4_C1	2,30 - 2,80	119	59
SP5_C1	3,10 - 3,40	147	73
SI 1_C2	5,00 - 5,40	282	141
SI 3_C2	5,00 - 5,40	115	57

Fig. 35: caratteristiche di resistenza alla compressione semplice delle argille di base AG

E' evidente che si tratti in genere di argille abbastanza compatte, caratterizzati da valori di resistenza alla compressione piuttosto elevati, quasi sempre maggiori di 100 kPa.

7.9 Caratteristiche di resistenza al taglio

Su quindici dei 17 campioni disponibili, sia quelli prelevati con infissione delle fustelle, sia quelli prelevati nel corso della successiva campagna di sondaggi, è stata eseguita mediante scatola di Casagrande una prova di taglio diretto in condizioni consolidate-drenate (prova tipo CD), attraverso cui si sono ricavati i parametri di resistenza al taglio dei terreni (c' e φ').

I valori di resistenza al taglio relativi ai 12 campioni sottoposti al taglio sono riassunti nella tabella di Fig. 36.

campione	Profondità (m)	coesione C' (kPa)	angolo d'attrito φ' (°)	coesione residua $C'r$ (kPa)	angolo d'attrito residuo $\varphi'r$ (°)
C1	7,80	36	16	0,00	13
C2	6,40	44	19		
C5	berma interm.	68,9	16	---	---
C6	berma inf.	17,9	25	---	---
C7	berma sup.	59,4	17	---	---
SI 1_C1	3,00 - 3,50	53,6	26	---	---
SI 3_C1	2,60 - 3,00	32,5	26	0,00	24
SP4_C1	2,30 - 2,80	80,2	21	0,00	13
SP5_C1	3,10 - 3,40	57,2	27	0,00	12
media	---	49,96	21,44	0,00	15,50
C3	7,00	12	24	0,00	20
C4	10,30	32	34		
SI 1_C2	5,00 - 5,40	29,2	23	---	---
SI 3_C2	5,00 - 5,40	25,2	28	0,00	13
SI 3_C3	9,20 - 9,50	0,08	33	---	---
SP5_C3	10,00 - 10,25	25,2	19	---	---
media	---	20,47	19,63	0,00	16,50

Fig. 36: caratteristiche di resistenza al taglio in condizioni drenate

Le prove hanno fornito valori dell'angolo di attrito interno φ' compresi tra 16° e 27° per le argille di superficie **FA** e tra 19° e 34° per quelle di base **FB**. I valori della coesione sono risultati piuttosto dispersi, compresi tra 18 e 80 kPa per le argille di superficie **FA** e tra 0 e 32 kPa per quelle di base **FB**.

La dispersione dei valori non sembra essere influenzata dal progressivo aumentare del carico litostatico, in quanto non si riscontra alcun trend correlabile con le diverse profondità di prelievo.

7.10 Parametrizzazione, valori nominali e valori caratteristici

La campagna di indagini geotecniche di laboratorio sui complessivi 17 campioni prelevati ha permesso di caratterizzare i diversi terreni presenti, sia sotto il profilo fisico, sia sotto quello geomeccanico.

I parametri geotecnici cosiddetti nominali devono essere interpretati in termini di valori caratteristici in relazione agli stati limite considerati per il progetto.

Si tratta di stimare in termini cautelativi i valori che influenzano l'insorgere dello stato limite.

La norma illustra chiaramente come tali valori debbano essere scelti: *“Nelle valutazioni che il progettista deve svolgere per pervenire ad una scelta corretta dei valori caratteristici, appare giustificato il riferimento a valori prossimi ai valori medi quando nello stato limite considerato è coinvolto un elevato volume di terreno, con possibile compensazione delle eterogeneità o quando la struttura a contatto con il terreno è dotata di rigidità sufficiente a trasferire le azioni dalle zone meno resistenti a quelle più resistenti. Al contrario, valori caratteristici prossimi ai valori minimi dei parametri geotecnici appaiono più giustificati nel caso in cui siano coinvolti modesti volumi di terreno, con concentrazione delle deformazioni fino alla formazione di superfici di rottura nelle porzioni di terreno meno resistenti del volume significativo, o nel caso in cui la struttura a contatto con il terreno non sia in grado di trasferire forze dalle zone meno resistenti a quelle più resistenti a causa della sua insufficiente rigidità”.*

Spetta dunque al progettista la scelta dei valori caratteristici, tuttavia nel caso in esame, considerata una certa uniformità dei valori di resistenza ricavati per ciascuna litologia interessata, l'elevato volume di terreno coinvolto e la presenza di superfici di taglio già formatesi sui fronti di scavo, si consiglia di non utilizzare i valori di picco, ma di assumere quelli di resistenza al taglio residua.

Per quanto di competenza dello scrivente, con riferimento ai valori di resistenza al taglio da utilizzare nelle verifiche strutturali, si consiglia la seguente parametrizzazione:

FA	$\varphi' = 16^\circ$	$C' = 0 \text{ kN/mq}$	$\gamma = 19 \text{ kN/mq}$
FA	$\varphi' = 16^\circ$	$C' = 17 \text{ kN/mq}$	$\gamma = 19 \text{ kN/mq}$

Fig. 37: parametrizzazione consigliata per la resistenza al taglio (valori di resistenza residua)

8. STABILITA' DELLE SPONDE

8.1 Riconfigurazione

Come si è detto in premessa, le condizioni di stabilità delle scarpate di scavo, benché realizzate seguendo precisamente le indicazioni di progetto, non fornivano sufficienti garanzie, tanto che numerosi segni di dissesto hanno caratterizzato i fronti di scavo. Si aggiunga che le caratteristiche meccaniche dei terreni misurate con la nuova campagna di indagini sono risultate discordi da quelle di progetto, così come le stratigrafie ipotizzate in sede di progetto risultano differenti da quelle determinate in questa sede. Tali circostanze sono da attribuire alla consueta variabilità dei terreni non prevedibile in fase di progettazione esecutiva.

In considerazione di quanto appena rappresentato, sulla base del complesso di indagini effettuato e con il supporto del consulente geotecnico dell'impresa Ing. David Licata, si è scelto di intervenire mediante la realizzazione di rilevati in terreno compattato sui fronti di scavo già realizzati, e riprofilando, dove necessario, le scarpate già realizzate in maniera da realizzare delle scarpate inclinate di 30° rispetto all'orizzontale, fino a giungere alla prevista quota di fondo della discarica. Più in dettaglio, pur rimandando agli elaborati grafici di perizia, nel seguito saranno illustrate le sezioni tipologiche di progetto, oggetto tra l'altro di calcoli e di verifiche di stabilità che saranno illustrate nel seguito.

In aggiunta agli interventi di banchinamento e riprofilatura, al fine di limitare al minimo gli effetti di un eventuale innalzamento delle pressioni neutre in corrispondenza della testa delle scarpate, viene mantenuta la trincea drenante immediatamente a valle della strada provinciale, non distante dal ciglio della vasca di discarica, prevista nel progetto originario. Lo scopo non è quello di intercettare il deflusso sotterraneo, come si è detto trascurabile, ma di scongiurare la saturazione ancorché temporanea degli orizzonti più superficiali di terreno.

Si ritiene però che in luogo del previsto sistema di drenaggio di tipo tradizionale, realizzato con materiale granulare racchiuso da un geotessile non tessuto di filtro separazione, si possa realizzare uno scavo a sezione più stretta, inserendovi il geocomposito drenante già previsto per il rivestimento delle pareti di scavo, costituito da due filtri esterni in non tessuto termosaldato

a filo continuo in poliestere/poliammide, con interposta una struttura drenante tridimensionale ad elevato indice di vuoto. Questo sistema presenta notevoli vantaggi, in quanto, sebbene il geocomposito abbia spessore limitato, esso è in grado di evacuare elevate quantità d'acqua in considerazione della struttura del nucleo, che garantisce la resistenza alle pressioni di confinamento, e della presenza di filtri ad elevata permeabilità e a basso intasamento.

Con questo sistemi di drenaggio, non soltanto si possono realizzare le trincee drenanti in sezioni di scavo ridotte, ma si può riutilizzare per il rinterro lo stesso terreno dello scavo, senza quindi dover impiegare materiale inerte granulare.

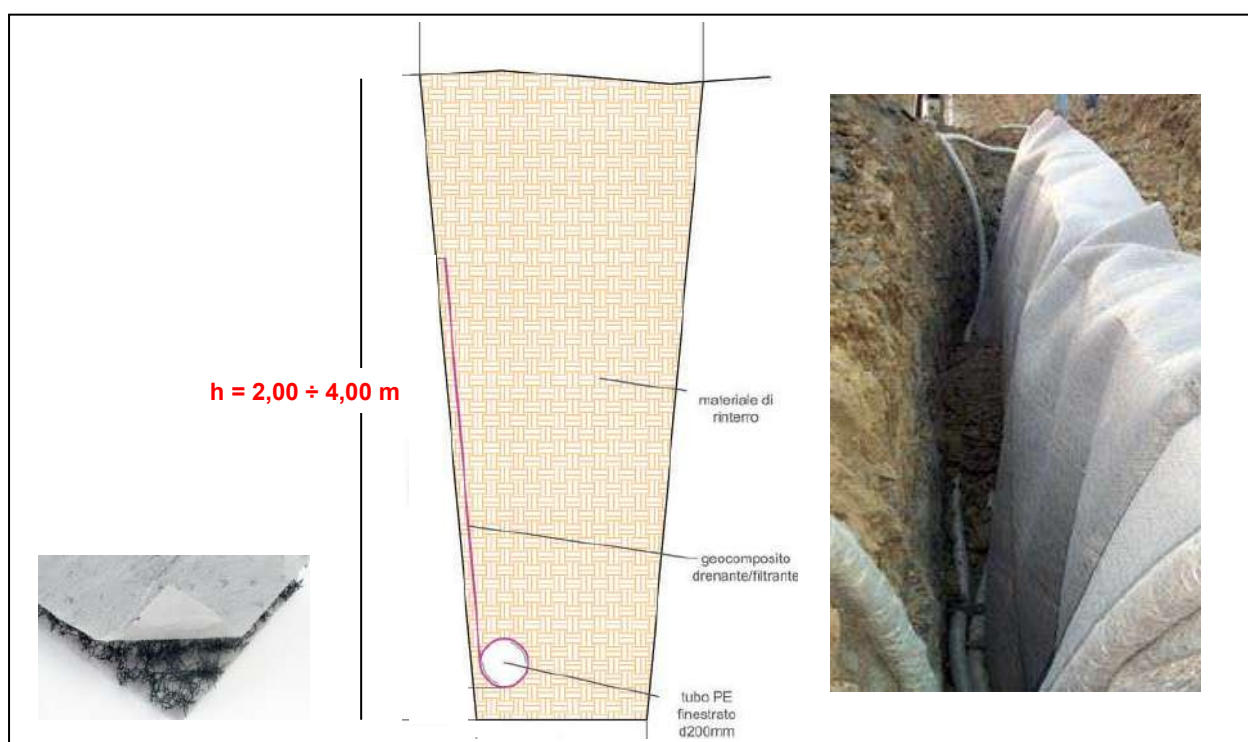


Fig. 38: sezione tipologica della trincea drenante e immagini di altre applicazioni

I segni di dissesto più significativi si sono verificati all'incirca tra le sezioni S11AA e S10AB (la numerazione fa riferimento alle sezioni trasversali lungo la viabilità di coronamento) e con specifico Ordine di Servizio (OdS), la DL, su indicazione dello scrivente, ha ordinato la realizzazione di un rilevato a valle di fronti di scavo già realizzati, al fine di scongiurare il progredirsi dei fenomeni di cedimento che in arretramento stavano per coinvolgere la sede stradale provinciale sovrastante. A partire dalla sezione tipologica definita nell'OdS, è stato realizzato un rilevato caratterizzato dalla presenza di tre piani sub-orizzontali a quote differenti

al fine di costituire un rilevato di contenimento al fenomeno franoso in atto. Il rilevato è stato realizzato mediante la compattazione in strati del materiale di scavo prelevato durante la formazione delle scarpate e durante lo scavo del fondo della discarica. Come si vedrà, il monitoraggio eseguito con gli inclinometri ha accertato l'efficacia dell'intervento realizzato, che sarà completato dalla realizzazione della trincea drenante di monte.

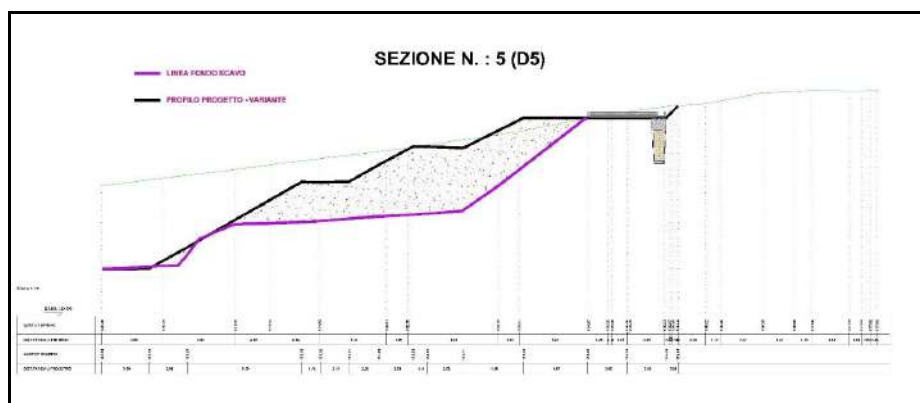


Fig. 39: sezione tipologica nell'area del dissesto tra le sezioni S11AA e S10AB

Altro intervento di riprofilatura riguarda il tratto compreso all'incirca tra le sezioni S14AD ed S15, dove il fronte di scavo sarà portato ad assumere una pendenza di 30°. E' previsto altresì il riempimento in prossimità della porzione di fronte ormai svuotata dai cedimenti determinati dal fenomeno franoso, attraverso l'utilizzo di materiale di scavo idoneo opportunamente compattato. Anche in questo caso è prevista la realizzazione di una trincea drenante in prossimità della viabilità di coronamento delle medesime caratteristiche descritte in precedenza. È evidente che preliminarmente le operazioni di riprofilatura e riempimento devono essere necessariamente precedute dalla rimozione dei terreni della coltre in frana.

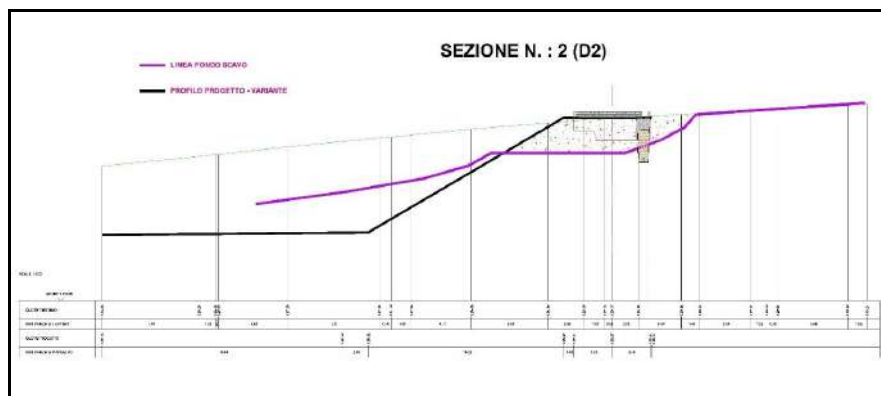


Fig. 1: sezione tipologica nell'area tra le sezioni S14AD ed S15

SEZIONE N. : D14

— LINEA FONDO SGAVO
— PROFILO PROGETTO - VARIANTE

STAZIONE	0+00	0+10	0+20	0+30	0+40	0+50	0+60	0+70	0+80	0+90	1+00	1+10	1+20	1+30	1+40	1+50	1+60	1+70	1+80	1+90	2+00
ALTEZZA (M)	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00	2.10	2.20	2.30	2.40	2.50	2.60	2.70	2.80	2.90	3.00
PROFONDITÀ (M)	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00
PROFONDITÀ (M)	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00

Anche nel tratto tra le sezz. S13 e S11AA non si sono manifestati evidenti segni di dissesto, ma in funzione dei risultati delle verifiche di stabilità e in considerazione del fatto che subito a monte delle scarpate è prevista la realizzazione dell'area di stoccaggio del percolato, che con la presenza di 14 serbatoi costituiscono un carico rilevante, si è deciso anche in questo caso di effettuare la riprofilatura e i riempimenti con la realizzazione di scarpate inclinate di 30° rispetto all'orizzontale.



In definitiva, sulla base delle sezioni tipologiche appena descritte, si è riprogettata la configurazione della discarica, come meglio illustrata negli elaborati grafici e nella Fig. 53, conformando tutte le sezioni di scavo ad una inclinazione di 30° rispetto all'orizzontale

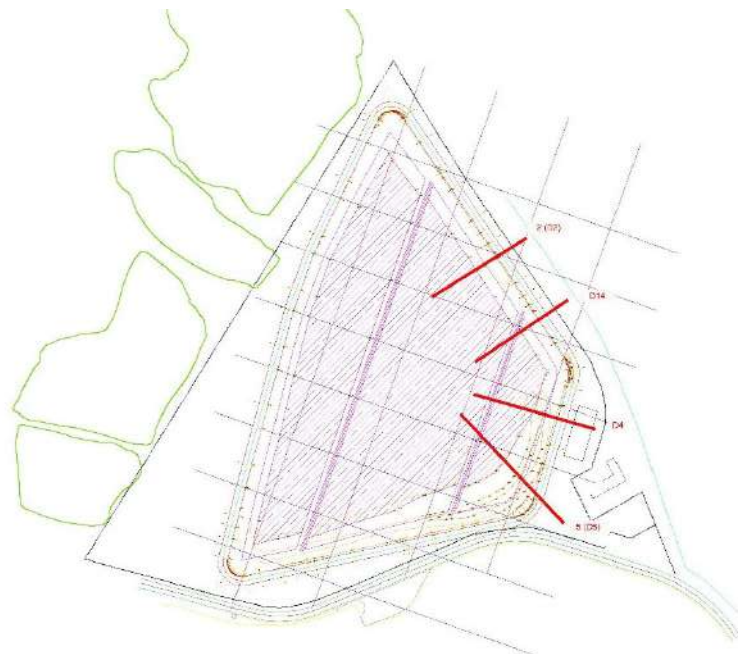


Fig. 43: planimetria della discarica a seguito degli interventi di riprofilatura e riempimento delle scarpate (in rosso le sezioni tipologiche appena descritte)

8.2 Verifiche di stabilità

Con riferimento alle condizioni sismiche, si è proceduto in analogia a quanto previsto in sede di progetto esecutivo e le valutazioni sono riassunte nello schema di cui alla figura seguente.

Opzioni sisma		Dettagli	
D.M. 1996		Tipo di Opera: Opera provvisoria	
Coefficiente di intensità sismica %:	0,00	Classe d'Uso: IV - Opere strategiche ed industrie molto pericolose	
Intensità sismica verticale/orizzontale	0,50	Vita Nominale: 10 anni	
N.T.C. 2008/2018		Vita di Riferimento: 20 anni	
Accelerazione al suolo ag [m/s^2]:	$ag/g = 0,045$ 0,439	Comune: Trapani	
Massimo fattore amplificazione spettro orizz. $F0$	2,499	Provincia: Trapani	
Periodo inizio tratto spettro a velocità costante T_{c0}	0,272	Regione: Sicilia	
Tipo di sottosuolo - Coefficiente stratigrafico S_s :	Tipo C 1,500	Latitudine: 37,872949	
Coef. amplificazione topografica S_T :	T2 1,20	Longitudine: 12,633004	
Coefficiente di riduzione (β_s)	C 0,20		
Coefficiente di riduzione (β_{s2})	0,38		
Coef. di intensità sismica orizzontale (PC) - K_h [%] = 1,61			
Coef. di intensità sismica orizzontale (A2-M2) - K_h [%] = 3,06			
Intensità sismica Verticale/Orizzontale	0,50		
« Importa parametri sismici » Dettagli ->			
Accetta Annulla Help			

Fig. 44: parametri sismici di progetto

Per quanto riguarda le condizioni al contorno:

- con riferimento ai carichi gravanti sui pendii, in analogia a quanto previsto in fase di progetto si è considerato sulla strada di coronamento un carico agente pari a 20 kN/mq uniformemente distribuito;
- per quanto riguarda le vasche di raccolta del percolato, dalle relazioni di calcolo di progetto si sono identificati:
 - carico variabile uniformemente distribuito pari a 9 kN/mq;
 - carico permanente uniformemente distribuito pari a 91 kN/mq;
- il livello piezometrico si è stabilito sulla base dei monitoraggi effettuati e considerando l'effetto della trincea drenante di progetto. Si evidenzia inoltre che a seguito del completamento delle lavorazioni le scarpate saranno protette dagli strati di impermeabilizzazione che impediranno la saturazione dei terreni argillosi e l'instaurarsi di pressioni interstiziali positive.

Le seguenti figure illustrano i risultati delle verifiche di stabilità con riferimento alla superficie di scivolamento critica, ovvero quella caratterizzata dal coefficiente di sicurezza minimo.

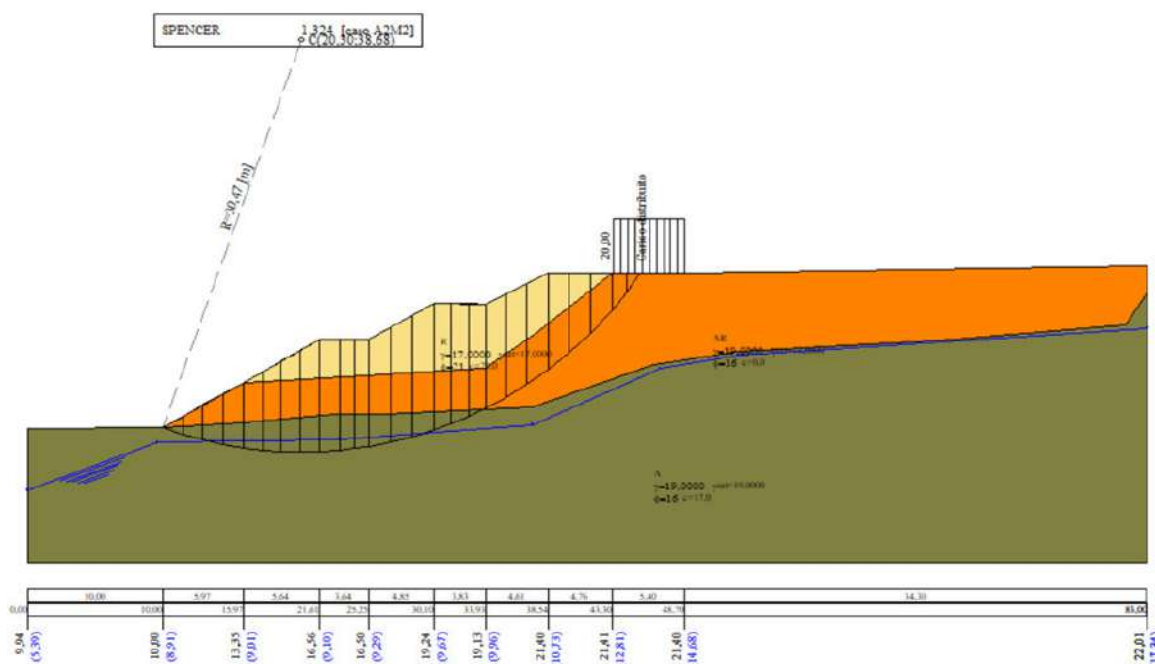


Figura 45: verifica di stabilità in corrispondenza del tratto tra le sezioni S11AA e S10AB – F=1,324



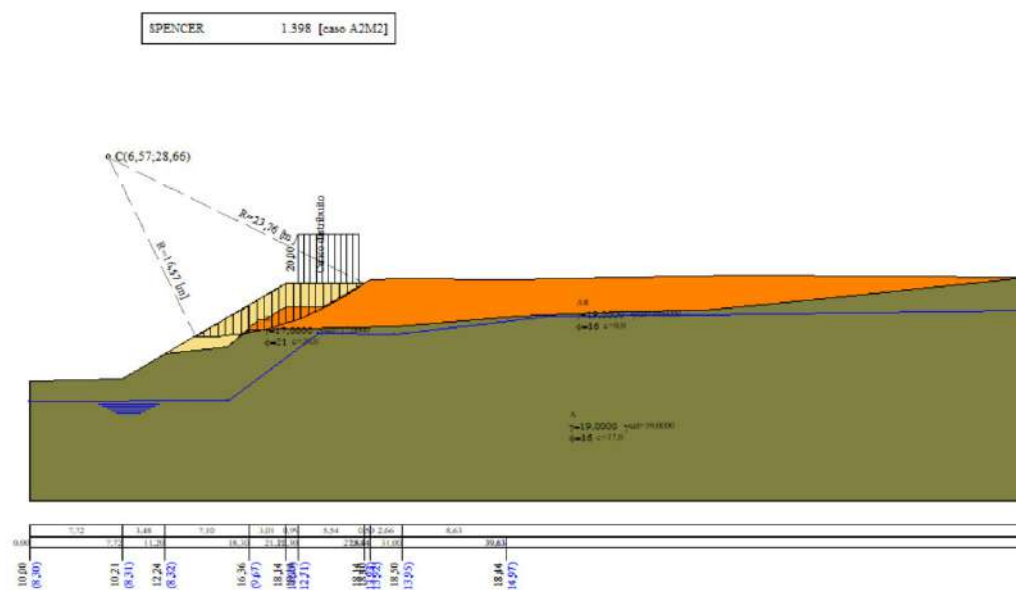


Fig. 48: verifica di stabilità in corrispondenza del tratto tra le sezz. S14AD e S13– $F=1,398$

In tutti i casi appena esaminati, per effetto degli interventi qui previsti, i coefficienti di sicurezza nei confronti della stabilità globale sono superiori al minimo previsto dalla normativa vigente (1,2).

9. MISURE AGLI INCLINOMETRI

Si è detto al paragrafo 5.3 che nei fori *SI 1*, *SI 2* ed *SI 3* stati installati tubi inclinometrici.

Il 14 marzo 2023 è stata eseguita una prima tornata di letture (lettura di zero), mediante sonda removibile, ma non si sono eseguiti rilievi all'inclinometro *SI 2* per la non adeguata cementazione della parte terminale (verso l'alto) della tubazione.

La seconda tornata di letture è stata eseguita in data 14 aprile 2023, mentre per il citato inclinometro *SI 2* alla stessa data è stata eseguita la lettura di zero.

Il 15 giugno 2023 è stata eseguita l'ultima campagna di misurazioni di spostamenti orizzontali in profondità.

Per gli inclinometri *SI 1* e *SI 3* al momento si dispone dunque di due letture effettive, mentre per l'inclinometro *SI 2* di una sola lettura.

Quelle fin qui eseguite non hanno messo in evidenza una cinematica degli spostamenti significativa, confermando che l'efficacia del banchinamento eseguito sui dissesti rilevati, che sembrano aver raggiunto una stabilizzazione: nello specifico nel tratto tra le sezioni S11AA e S10AB per effetto del banchinamento effettuato, mentre nel caso del tratto tra le sezioni S14AD ed S15 il consolidamento si è raggiunto per la naturale stabilizzazione e riduzione di pendenza media per effetto dello stesso movimento. Il massimo spostamento misurato rientra ancora nella precisione dello spostamento, che per tali strumenti è dell'ordine di ± 2 mm (valutata su tubi inclinometrici lunghi 30 m).

Solo nel caso dell'inclinometro *SI 1* si osserva un incremento dello spostamento misurato nei primi due metri di profondità (da 2 a 4 mm circa) tra le due letture di cui si dispone, ma su direzioni ruotate di circa 60° l'una rispetto all'altra. Si può ritenere che tale variazione sia legata alle attività di costruzione del rilevato in prossimità di esso e alla sua stabilizzazione nel tempo. Basti considerare che, tenuto conto che la direzione A0-A180 delle guide ha un azimut rispetto al Nord magnetico di 258° , la direzione risultante dello spostamento sarebbe diretta a $258+111^\circ = 369-360 = 9^\circ$ e tale direzione non è compatibile con la direzione del fronte di scavo, in quanto nella zona è diretto a 330° rispetto al Nord.

Analoghe considerazioni valgono per l'inclinometro *SI/ 2* per la ridotta rilevanza dell'intensità dello spostamento misurato (inferiore a 1.5 mm) e per la sua direzione (60° rispetto al Nord mentre la retta di massima pendenza del fronte di scavo è diretta a circa 300°N).

Nel caso dell'inclinometro *SI/ 3*, ubicato nei pressi del tratto tra le sezioni S14AD ed S15, la direzione degli spostamenti è compatibile con il fronte (circa 240° rispetto al Nord), ma gli spostamenti cumulati nel periodo di monitoraggio sono sempre dell'ordine di 1,5 mm. Tenuto conto che in questa zona non è stato realizzato ancora il banchinamento, si può ritenere che un intervento della stessa natura di quello adottato tra le sezioni S11AA e S10AB (banchinamento per riduzione della pendenza media del fronte di scavo) possa essere anche in questo caso risolutivo.

I grafici che seguono riportano in sintesi la risultante degli spostamenti misurati nei tubi inclinometrici e il suo azimut rispetto alla guida principale del tutto rispetto alla profondità. Per il dettaglio delle misure di monitoraggio si rimanda all'elaborato specifico del laboratorio.

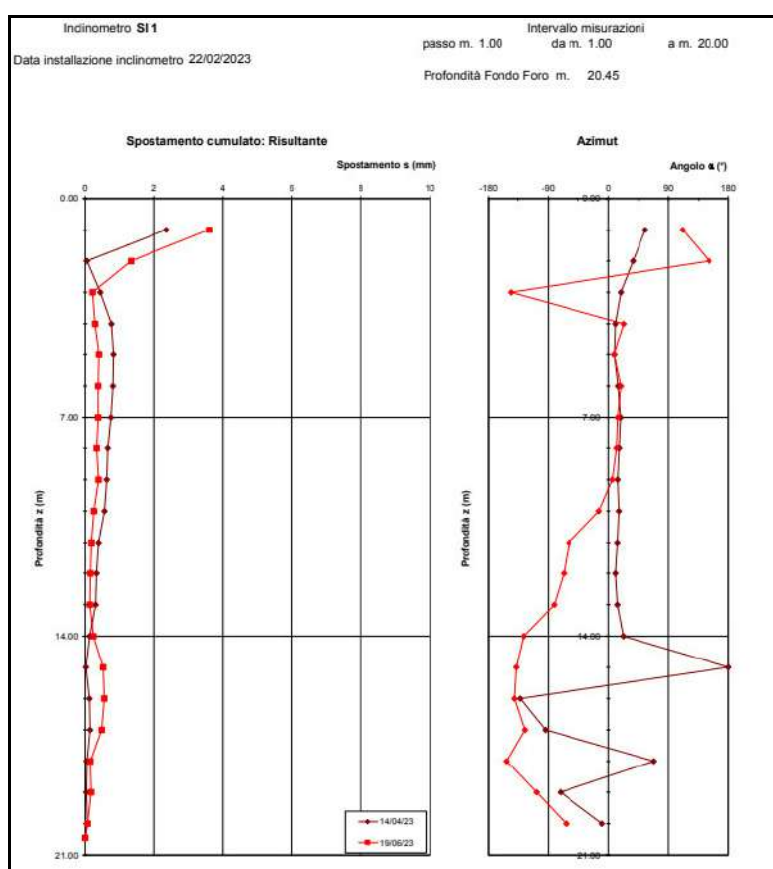


Fig. 49: misure inclinometriche SI 1 (azimut A0-A180: 258° rispetto al Nord magnetico)

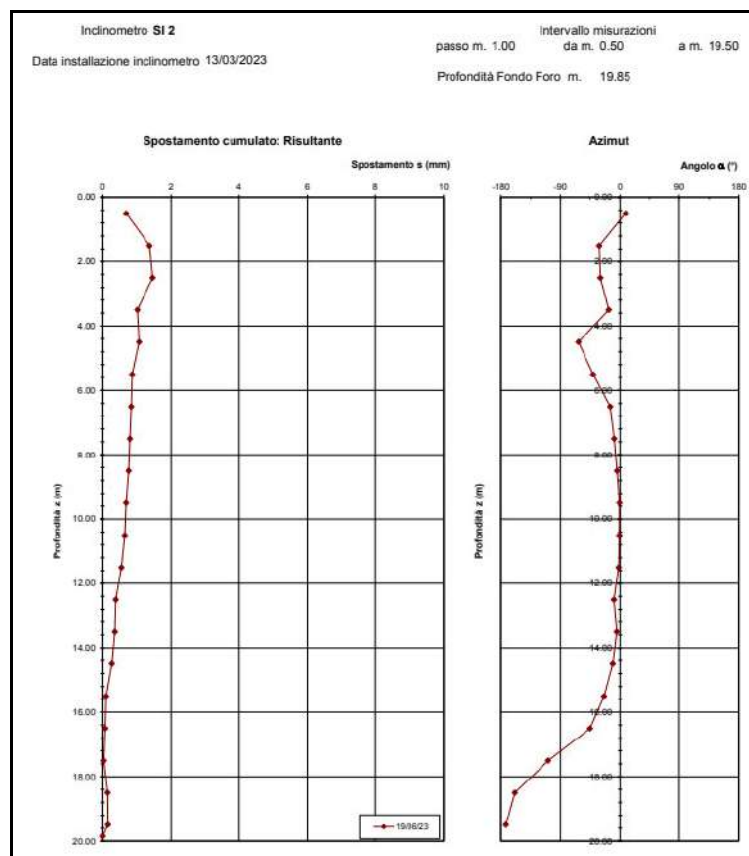


Fig. 50: misure inclinometriche SI 2 (azimut A0-A180: 58° rispetto al Nord magnetico)

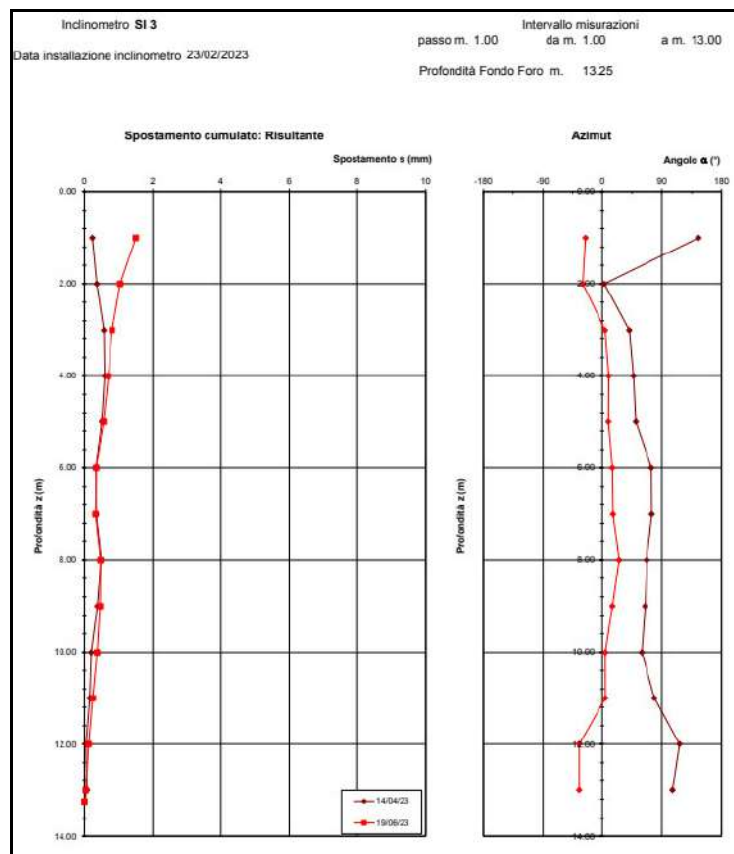


Fig. 51: misure inclinometriche SI 3 (azimut A0-A180: 266° rispetto al Nord magnetico)

10. INDICAZIONI E PRESCRIZIONI

Lo studio condotto ha portato alla definizione di quegli elementi di conoscenza geologica, nell'accezione più ampia del termine, necessari allo specifico contesto di progettazione.

Alla luce di esso si indicano in questo contesto, per quanto di competenza dello scrivente, alcune prescrizioni di carattere tecnico ed ambientale, che si configurano come interventi migliorativi sotto il profilo tecnico, ma soprattutto sotto quello ambientale.

Sotto il profilo idrogeologico e idraulico si è verificato che nell'area in esame non esiste una vera e propria falda freatica, quanto piuttosto alcuni modesti adunamenti idrici, rilevati in alcuni piezometri, che però non rappresentano una reale risorsa idrica. Il regime di queste acque è stagionale, legato quindi alle piogge, ed è spesso di tipo impulsivo, connesso cioè al singolo evento piovoso in grado di ricaricare quasi istantaneamente il modestissimo bacino imbrifero e di creare un temporaneo gradiente idraulico.

Per gli impianti di rifiuti non pericolosi, il Decreto Legislativo 13.01.2003 n. 36 e ss.mm.ii pone quale limite di permeabilità un coefficiente di permeabilità che sia inferiore o uguale a $1,00 \cdot 10^{-9}$ m/sec.

Come si è visto, le misurazioni di permeabilità delle argille in laboratorio hanno fornito perlopiù valori di permeabilità persino inferiori al suddetto limite, sino ad un valore minimo di $1,00 \cdot 10^{-11}$ m/sec, per cui si tratta di terreni di fatto impermeabili. In altre parole le argille di base di colore grigio **FB**, che costituiscono il substrato inalterato, presentano un grado di permeabilità così basso da poter essere considerate come una soglia di permeabilità definita, sotto la quale non si hanno in pratica infiltrazioni d'acqua e di fluidi in genere verso gli orizzonti più bassi.

Tuttavia è prevista, secondo normativa, una ulteriore impermeabilizzazione del fondo attraverso una barriera di confinamento aggiuntiva.

Un aspetto rilevante che è stato affrontato in questa sede riguarda la profilatura delle scarpate della nuova vasca: anche attraverso le verifiche di stabilità si è constatato infatti che l'ipotesi progettuale, che prevedeva inclinazioni pari a 43° per il terreno in posto ed a 40° per gli argini laterali, non è attuabile nel rispetto delle necessarie condizioni di sicurezza.

59

Un altro aspetto da affrontare riguarda l'assetto idrologico/idraulico della nuova vasca. Per quanto riguarda le acque superficiali, con riferimento soprattutto a quelle del reticolo idrografico, non si prevedono impatti ambientali significativi, considerato che esse saranno drenate a perimetro dell'impianto, convogliate e restituire al reticolo idrografico più a valle, senza che esse possano venire in contatto con i rifiuti organici trattati nell'impianto.

Poiché i processi di produzione dei percolati sono regolati dalla presenza di acqua nei rifiuti, legata prevalentemente alle acque meteoriche che invadono il corpo della discarica, occorre prevedere un sistema di drenaggio e di captazione attraverso cui le acque dilavanti dovranno essere allontanate dall'area di impianto con idonee canalizzazioni, distinguendo tra le acque che potrebbero giungere al corpo della vasca per ruscellamento e le acque meteoriche che invece cadono direttamente in esso, attraversando lo spessore dei rifiuti.

Per le prime si è appena detto che esse saranno drenate a perimetro dell'impianto, convogliate e restituire al reticolo idrografico più a valle, senza che esse possano venire in contatto con i rifiuti trattati nell'impianto. In questa direzione si impone la realizzazione di una trincea drenante a monte del corpo della vasca, che funga allo stesso tempo da fosso di guardia: la funzione idraulica della trincea drenante si ripercuote anche sul mantenimento delle condizioni di equilibrio delle sponde della nuova vasca.

In questa direzione si ritiene che debba essere confermata la realizzazione di una trincea drenante immediatamente a valle della strada provinciale, non distante dal ciglio della vasca di discarica, già prevista nel progetto originario. A questo esteso tratto è auspicabile che venga aggiunto un ulteriore tratto di trincea all'incirca tra le sezioni S14AD ed S15 e tra le sezz. S13 e S11AA.

Come si è detto, in luogo del previsto sistema di drenaggio di tipo tradizionale con materiale granulare si potrà realizzare uno scavo a sezione più stretta, entro cui inserire il geocomposito drenante (già previsto per il rivestimento delle pareti di scavo), riempiendo lo stesso scavo con il terreno estratto.

Per quanto riguarda invece le acque meteoriche, che per percolazione giungono al fondo dei rifiuti, è già previsto che siano drenate al fondo degli stessi rifiuti attraverso una rete di tubi

microfessurati orientati verso un collettore principale parallelo alla direzione di massima inclinazione del fondo e diretto verso appositi pozzi realizzati all'interno della vasca.

Dal pozzetto di raccolta il percolato verrà prelevato mediante una pompa e convogliato nella vasca di stoccaggio e nei silos di stoccaggio previsti nel presente progetto, per essere sottoposto a trattamento o inviato presso centri autorizzati.

Riassumendo gli interventi migliorativi che andranno sviluppati riguardano:

1. riconfigurazione dei profili delle scarpate della vasca, che dovranno possedere un'inclinazione di 30° in luogo della prevista inclinazione di 40°; con questa modifica non viene in alcun modo modificata la configurazione della nuova vasca, che manterrà integralmente la stessa superficie d'impronta, acquisendo però le necessarie condizioni di sicurezza geomorfologica;
2. realizzazione di una trincea drenante a corona di alcuni tratti del corpo della vasca, che funga allo stesso tempo da fosso di guardia, che, nello svolgere una funzione di protezione idraulica nei confronti delle acque che potrebbero giungere al corpo dei rifiuti, concorre anche al mantenimento delle condizioni di equilibrio delle sponde della nuova vasca.

Palermo, 28 giugno 2023

Gian Vito Graziano

Geologo

