

(M2C4-I3.3) PROGETTAZIONE A LIVELLO ESECUTIVO DELLE OPERE DI PROTEZIONE ARGINALE PER IL MANTENIMENTO DELL'ASSETTO AMBIENTALE E IDRAULICO-MORFOLOGICO (SCHEDA 52 LINEA PT) NELL'AMBITO DELL'INVESTIMENTO PNRR M2C4 - I3.3 RINATURAZIONE DELL'AREA DEL PO, FINANZIATO DALL'UNIONE EUROPEA NEXTGENERATIONEU

CUP: B41G21000010006

PROGETTO ESECUTIVO

SCHEDA N° 16 CAORSO (PC) - PROGETTO DIAFRAMMATURE

CODICE ELABORATO

PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A

TITOLO DELL'ELABORATO

Relazione GEOTECNICA

SCALA	COMMESSA	WBS			CODICE			REVISIONE
-	M2C4 I3.3	Fase	Scheda	Opera	Argomento	Tipo elab.	Progressivo	Rev.
		PE	016	GET	GE	RT	001	A

PROGETTAZIONE

Raggruppamento temporaneo di professionisti

Mandataria



Mandanti



Ing. Andrea Marzi

STUDIO TECNICO
ING. PUCCINELLI
www.puccinelli.webs.com



STAZIONE APPALTANTE

**Agenzia Interregionale
per il Fiume Po**
Strada G. Garibaldi n.75
43121 Parma (PR)

**Responsabile Unico
del Procedimento**
Ing. Mirella Vergnani

Responsabile dell'Integrazione delle Prestazioni Specialistiche

Ing. Andrea Marzi

Ing. Andrea Pettinaroli

Responsabile dell'elaborato

Ing. Marco Puccinelli

A	12/03/2025	Prima Emissione	PF	MP	MP
Rev.	Data	Descrizione	Redatto	Verificato	Approvato

SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE*Codice elaborato:* **PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A***Titolo elaborato:* **Relazione geotecnica**

pag. 1 / 60

Sommario

1	PREMESSA.....	2
1.1	Introduzione	2
1.2	Documentazione specifica disponibile	2
1.3	Sintesi delle indagini geognostiche	3
2	ASSETTO LITOSTRATIGRAFICO	11
2.1	Profilo geotecnico locale	11
2.2	Soil Profiling.....	11
2.3	Caratteristiche delle successioni da soil profiling	13
3	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA.....	14
3.1	Introduzione	14
3.2	Caratterizzazione da prove CPTu	14
3.3	Caratterizzazione da prove SPT	16
3.4	Caratterizzazione da prove pressiometriche Menard	23
3.5	Caratterizzazione da prove di laboratorio.....	24
3.6	Coefficiente di permeabilità.....	25
3.7	Coefficiente di Winkler	30
3.8	Parametri caratteristici	34
3.8.1	Corrispondenza livelli modelli GEOLOGICO – GEOTECNICO	36
4	ALLEGATO 1	41
4.1	Elaborazione prove cptu e modelli geotecnici	41

PNRR - M2C4 Investimento 3.3 - RINATURAZIONE DELL'AREA DEL PO	
Progetto di fattibilità tecnico economica	
SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE	
Codice elaborato:	PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A
Titolo elaborato:	Relazione geotecnica

1 PREMESSA

1.1 Introduzione

Il presente documento illustra la modellazione e caratterizzazione litostratigrafica e geotecnica delle aree in cui verranno realizzate le opere di consolidamento dell'argine maestro in froldo, posto in destra idraulica di Po, tra le progressive di Po PAI 345.5 e 346.5, denominate opere di protezione arginale mediante diaframmatura (lunghezza tratto interessato pari a circa 600 m) in dx idraulica in località Roncarolo, in Comune di Caorso (PC) su di un argine che risulta già in parte diaframmato.











La sponda destra dell'argine maestro in froldo in corrispondenza della località Roncarolo è stata rinforzata con una diaframmatura strutturale, costituita da pannelli di paratie in c.a., eseguita nel 2005, che risulta tuttavia non continua; dalla documentazione dei lavori eseguiti e dalle testimonianze di tecnici di AIPO, infatti, non vi era certezza della realizzazione del diaframma in corrispondenza dell'abitato di Roncarolo; inoltre più a valle risulta, in modo abbastanza definito, la mancanza di una tratta di più di 500 m priva di diaframmatura. I tratti mancanti comprendono due rampe di collegamento tra la strada in coronamento argine e la zona golenale in destra Po.

1.2 Documentazione specifica disponibile

La documentazione specialistica disponibile (oltre alla documentazione generale di Progetto Definitivo che non si cita per sintesi) è la seguente, in ordine cronologico:

1] Documentazione indagini in sito e di laboratorio, Luglio 2024, a cura di INJECTOSOND:

Name


-  CPTU raw data
-  1_SONDAGGI E PROVE IN SITO_CONSEGNA.pdf
-  2_CONSEGNA - PROVE CPTU.pdf
-  3_CONSEGNA POZZI E PROVE.pdf
-  4_CONSEGNA PROCEDURE AUTORIZZATIVE.pdf
-  5_CONSEGNA GEOREFERENZIAZIONE.pdf
-  6_CONSEGNA LAB GEOTECNICO.pdf
-  7_CONSEGNA LABORATORIO CHIMICO.pdf
-  8_CONSEGNA RIPRISTINI.pdf
-  Rilievi Topografici.kmz


PNRR - M2C4 Investimento 3.3 - RINATURAZIONE DELL'AREA DEL PO	
Progetto di fattibilità tecnico economica	
SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE	
Codice elaborato:	PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A
Titolo elaborato:	Relazione geotecnica


pag. 3 / 60


2] Documentazione indagini in sito e di laboratorio, Luglio 2024, a cura di AKRON:


Name

 23104_Argini Po-Caorso_indagini geofisiche_rel.pdf

 23104_CAORSO.zip

 Allegato 01.pdf

 Allegato 02.pdf

 Tavola 01.pdf

3] Relazione Tecnica di PFTE SCHEDA N° 16 CAORSO (PC) - PROGETTO DIAFRAMMATURE, 26 Luglio 2024, a cura del Gruppo di Progettazione.

4] Profilo geologico, Luglio 2024, a cura del Gruppo di Progettazione.

La documentazione sopra illustrata contiene i risultati di tutte le indagini geognostiche dirette e indirette eseguite sul sito dell'intervento oltre ai certificati di laboratorio delle prove effettuate sui campioni estratti.

1.3 Sintesi delle indagini geognostiche

Nel corso degli anni 2023÷2024 sono state eseguite sul sito numerose indagini geognostiche, descritte esaurientemente nei documenti prima elencati.

In sintesi esse sono:

Indagini meccaniche

- n. 3 sondaggi a carotaggio continuo (S3DH, S4, S5) completi di esecuzione di prove di permeabilità Lefranc, prove penetrometriche SPT a punta aperta Raymond (in n° 6+5+4 = 15), e prove pressiometriche Menard (in n° 1+2+1 = 4)
- n. 8 prove CPTU disposte lungo il tracciato, in coronamento argine
- prove di laboratorio di classificazione e caratterizzazione meccanica dei terreni estratti con campioni indisturbati e rimaneggiati dai sondaggi;

Indagini geofisiche

- n. 2 profili di tomografia geoelettrica lungo il coronamento del rilevato, n.1 sezione trasversale
- n. 2 profili MASW 2D associati alle tomografie geoelettriche e n.1 prova MASW per la caratterizzazione della categoria di terreno ai sensi della NTC 2018
- n. 1 prova down hole.

PNRR - M2C4 Investimento 3.3 - RINATURAZIONE DELL'AREA DEL PO	
Progetto di fattibilità tecnico economica	
SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE	
Codice elaborato:	PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A
Titolo elaborato:	Relazione geotecnica

pag. 4 / 60

Per lo scopo del presente documento, in particolare, sono stati esaminati in dettaglio sia prevalentemente i risultati delle recenti indagini penetrometriche statiche con piezocono (CPTu) sia le altre indagini dirette e prove eseguite nel corso del 2024 sull'area (CPTu 3÷10 e sondaggi a carotaggio continuo S3DH, S4, S5 con relative prove in foro) e illustrate su uno dei documenti di cui al punto 1] del precedente paragrafo.

L'ubicazione indicativa delle indagini è riportata sulla successiva figura.

La quota del piano di campagna dal quale sono state eseguite le indagini penetrometriche e parte dei sondaggi è variabile ma rappresentata, ad eccezione del sondaggio S5, dal piano di sommità del rilevato arginale esistente.

La soggiacenza della falda rilevata durante le indagini è variabile e rappresentata in una tabella a seguire che riporta il dato relativo alla profondità della falda, misurata in corrispondenza di alcune verticali nel momento dell'esecuzione dell'indagine.

Prova	Profondità (m da p.c.)	Data esecuzione	Profondità falda (m da p.c.)	Quota falda (m s.l.m.)
CPTu_3	25	Febbraio-Marzo 2024	9	39.5
CPTu_4	17.7	Febbraio-Marzo 2024	7.5	41
CPTu_5	19	Febbraio-Marzo 2024	9	39.5
CPTu_6	14.20	Febbraio-Marzo 2024	10	38.5
CPTu_7	14.7	Febbraio-Marzo 2024	6.5	42
CPTu_8	18.7	Febbraio-Marzo 2024	8	40.5
CPTu_9	16.7	Febbraio-Marzo 2024	5	43.4
CPTu_10	14.8	Febbraio-Marzo 2024	8	40.5

Tabella 1. Livello falda misurato durante l'esecuzione delle Indagini geognostiche Gennaio-Aprile 2024

SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE

Codice elaborato: **PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A**

Titolo elaborato: **Relazione geotecnica**

pag. 5 / 60

Nelle immagini seguenti si riporta l'ubicazione delle prove geognostiche eseguite.



Figura 1. Ubicazione prove geognostiche eseguite tra Gennaio e Aprile 2024 – Tratto Sud.

SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE

Codice elaborato: PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A

Titolo elaborato: Relazione geotecnica

pag. 7 / 60



Figura 3. Ubicazione prove geognostiche eseguite tra Gennaio e Aprile 2024. Tratto Nord.

La campagna di indagini eseguita tra Gennaio e Aprile 2024 ha visto inoltre l'installazione di un sistema di monitoraggio della falda, costituito da piezometri ad infissione. La soluzione individuata e scelta per l'area in esame ha visto l'infissione nel terreno di n°2 sonde piezometriche a corda vibrante VW attraverso il dispositivo di spinta del penetrometro statico utilizzato per le prove CPTu.

I piezometri ad infissione installati sono stati collegati ad un sistema di monitoraggio in continuo e da remoto.

SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE

Codice elaborato: **PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A**

Titolo elaborato: **Relazione geotecnica**

pag. 8 / 60

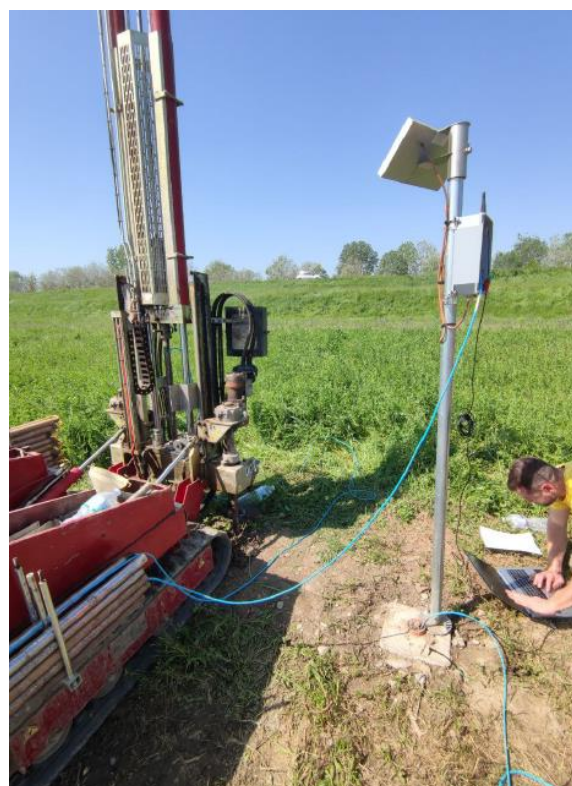


Figura 4. Installazione piezometro ad infissione PZ1_DT0015 in sommità arginale (foto a sinistra) e Installazione piezometro ad infissione PZ2_DT0014 al p.c.

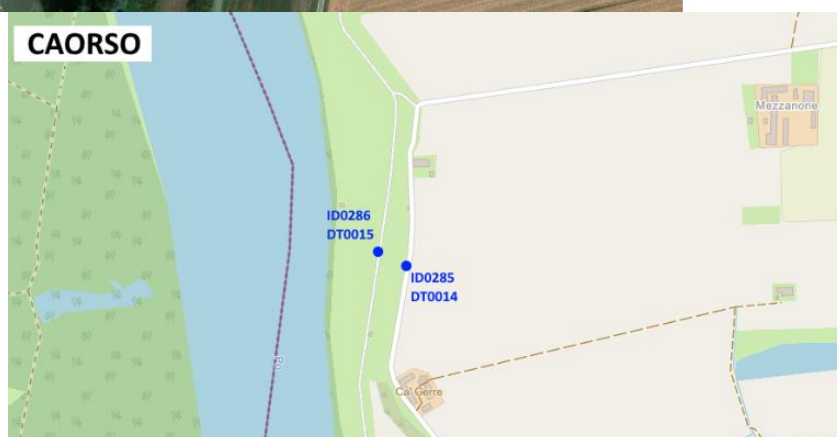


Figura 5. Ubicazione e ID piezometri ad infissione installati presso il sito di Caorso.

PNRR - M2C4 Investimento 3.3 - RINATURAZIONE DELL'AREA DEL PO	
Progetto di fattibilità tecnico economica	
SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE	
Codice elaborato:	PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A
Titolo elaborato:	Relazione geotecnica

pag. 9 / 60

Di seguito si riassumono le principali informazioni relative ai piezometri ad infissione installati.

Piezometro	Centralina	Posizione	Quota (m s.l.m.) del piano campagna in corrispondenza del punto di infissione del piezometro. (m s.l.m.)
DT0015	ID0286	Sommità arginale	+48.5
DT0014	ID0258	Piano campagna	+43.5

Piezometro	Centralina	Profondità del sensore (m da p.c.)	Elevazione del sensore (m s.l.m.)
DT0015	ID0286	14.80	+33.70
DT0014	ID0258	3.9	+39.6

Tabella 2. Informazioni relative ai piezometri di infissione installati presso il sito di Caorso.

È stata periodicamente consultata la piattaforma che permette il controllo da remoto dei dati piezometrici. Nel periodo tra Aprile 2024 e Febbraio 2025 la profondità della falda in corrispondenza dell'area in esame è variata tra:

- Sommità arginale: +42.42 ÷ 40.0 m s.l.m. (livello massimo e minimo registrato in corrispondenza del piezometro DT0015)
- Piano campagna: +42.93 ÷ 40.6 m s.l.m. (livello massimo e minimo registrato in corrispondenza del piezometro DT0014)

Piezometro	Centralina	Posizione	Quota p.c.	Livello massimo m slm	Livello minimo m slm
DT0015	ID0286	Sommità arginale	+48.5	+42.42 Ottobre 2024	+40.0 Agosto 2024
DT0014	ID0285	Piano campagna	+43.5	+42.93 Ottobre 2024	+40.6 Agosto 2024

Tabella 3. Valori di soggiacenza (m slm) minimo e massimo.

I valori rilevati rientrano nella forcella di valori rilevati nelle prove cptu, a cui si fa riferimento.

I dati sono visualizzabili attraverso i grafici seguenti.

SCHEMA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE

Codice elaborato: PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A

Titolo elaborato: Relazione geotecnica

pag. 10 / 60

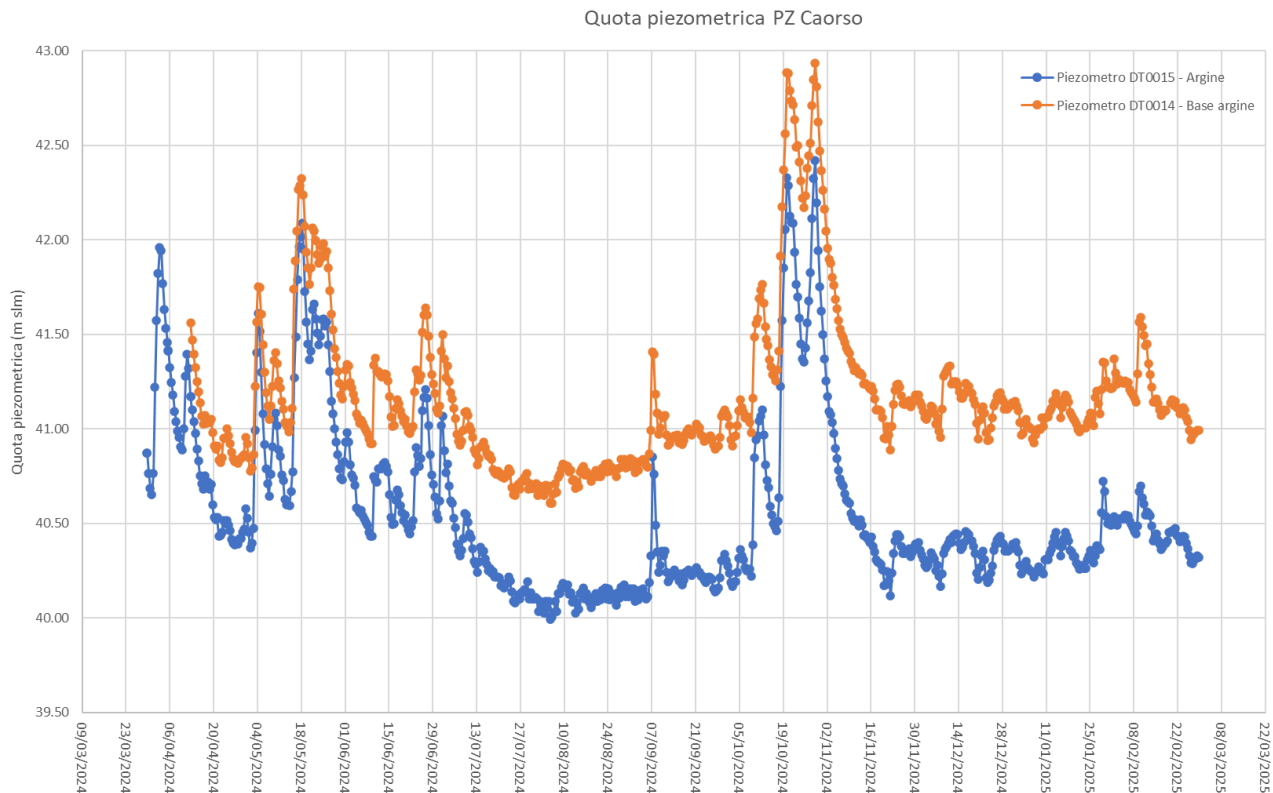


Figura 6. Variazione livello falda (m s.l.m.) – Periodo Aprile 2024 – Febbraio 2025 (PZ_DT0014 – base arginale in arancione e PZ_DT0015 sommità arginale in blu)

I grafici dell'andamento della falda nei due piezometri presenti nell'area in esame sono allineati alle letture del livello idrometrico del Fiume Po presso la stazione di Piacenza sono allineati.

La falda di subalveo, ospitata dal fondo dell'alveo del Po, costituito in prevalenza da materiali sabbiosi di medie-elevate permeabilità, si trova in comunicazione con la falda superficiale dell'area circostante.

Ipotizzando un acquifero unico intercettato dai due piezometri ad infissione la particolarità dei rilievi eseguiti è il fatto che il piezometro lato campagna (esterno all'alveo e all'argine) presenti una piezometria a quote maggiori ad indicare come la falda sembra localmente drenata dal corso d'acqua (F. Po); il divario piezometrico tra i due strumenti è di circa 60 cm in periodo di magra e si riduce a circa 20 cm durante le piene.

Si precisa che il monitoraggio della falda nell'area in esame attraverso il sistema installato è proseguito nella fase di Progetto Esecutivo, e proseguirà sino al periodo di inizio lavori (e finché questi non coinvolgeranno le aree occupate dai piezometri in oggetto)

2 ASSETTO LITOSTRATIGRAFICO

2.1 Profilo geotecnico locale

Per gli scopi delle caratterizzazioni di cui in premessa, è stato esaminato un profilo geologico disposto ad asse approssimativamente sud-nord (vedi documento di cui al punto 4] del paragrafo 1.1.).

Ciononostante, per una modellazione e caratterizzazione geotecnica di sintesi, è stata operata una procedura basata sui logs delle prove CPTu, descritta al seguito.

La costruzione della sezione geotecnica è stata sviluppata secondo i seguenti criteri/fasi:

- 1) Rappresentazione del log di caratterizzazione litologica (attraverso il parametro I_c , Index of Classification, di classificazione del parametro SBT-Soil Behaviour Type di Robertson) per le prove CPTu
- 2) Analisi geostatistica dei logs delle prove CPTu 3÷10 attraverso il software GeoStratEx per la determinazione degli strati “*ottimali*” di suddivisione della successione locale (**Soil Profiling**); il parametro esaminato, indicativo della litologia e del comportamento geotecnico dei terreni attraversati (SBT) è idoneo allo scopo poiché indipendente dalla profondità di riferimento (e dalla tensione litostatica efficace) della sua determinazione
- 3) determinazione dei confini litostratigrafici tra i diversi strati determinati con l'analisi successivamente illustrata per la scelta dei modelli geotecnici.

2.2 Soil Profiling

Con la dicitura Soil Profiling s'intende la suddivisione della successione stratigrafica locale in strati “*ottimali*” in grado di minimizzare statisticamente la dispersione stocastica del parametro marker, nel caso in oggetto rappresentato dall' I_c di Robertson & Wride, 1998 (vedi tabella al seguito).

Soil Classification (SBTn)	Zone number (1990)	I_c O I_{SBT}
Terreni organici: torbe	2	>3,6
Argille: da argille limose a argille	3	2,95 ÷ 3,60
Misti limosi: da limi argillosi a argille limose	4	2,60 ÷ 2,95
Misti sabbiosi: da sabbie limose a limi sabbiosi	5	2,05 ÷ 2,60
Sabbie: da sabbie pulite a sabbie limose	6	1,31 ÷ 2,05
Da sabbie ghiaiose a sabbie dense	7	< 1,31

Tabella di classificazione del SBT di Robertson & Wride, 1998

PNRR - M2C4 Investimento 3.3 - RINATURAZIONE DELL'AREA DEL PO		
Progetto di fattibilità tecnico economica		
SCHEMA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE		
Codice elaborato:	PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A	
Titolo elaborato:	Relazione geotecnica	pag. 12 / 60

La minimizzazione statistica (*best fit*) è operata attraverso la ricerca automatica del valore minimo del COV (Coefficiente Of Variation) competente allo strato candidato alla suddivisione.

Tale suddivisione è effettuata con diverse tecniche tra cui quella visiva (o manuale), quella Random (RND), quella denominata Progressive Scan (PS), ecc., tra cui le ultime due sono ottimali per affrancarsi dalla soggettività della scelta che inevitabilmente dipende dall'operatore.

Nella fattispecie, attraverso l'ausilio del software di calcolo automatico GeoStratEx (acronimo di Geotechnical Stratigraphic Examinations), è stato utilizzato l'accoppiamento in serie delle tecniche Random + manuale, basandosi sulla preliminare individuazione di quattro strati principali (ritenuti in numero congruo e non eccessivo), ricorrenti visivamente nelle 8 verticali CPTu indagate; la procedura inizia con la tecnica numerica Random per la determinazione degli strati ottimali e relativi COV (compreso il Weighted COV, COV_w , della successione) e si conclude, laddove necessario, con l'implementazione manuale del set di strati con essa determinato sul framework di calcolo statistico manuale per la determinazioni dei principali parametri stocastici della successione e dei singoli strati.

Per ogni verticale CPTu sono state fatte 1000 simulazioni Random, talora ripetute più volte, ottenendo valori di simulazioni complete (andate a buon fine) pari ad almeno il 20%, corrispondenti a circa 200 simulazioni, ritenute soddisfacenti per i parametri utilizzati, da cui è stata estratta quella a minimo COV_w (*best set*).

L'analisi è stata sviluppata sulle intere successioni di dati CPTu, che si dipartono tutte dalla sommità del rilevato arginale, utilizzando le quote di falda rilevate durante le prove e riportate nella successiva tabella.

Prova CPTU	Profondità falda [m dal p.c.]	Data rilievo
3	9	25/03/2024
4	7,5	25/03/2024
5	9	27/03/2024
6	10	27/03/2024
7	6,5	27/03/2024
8	8	28/03/2024
9	5	28/03/2024
10	8	28/03/2024

Tabella delle profondità della falda rilevata nelle CPTU, eseguite dalla sommità del rilevato arginale

In tutte le successioni i valori del minimo COV_w si sono mantenuti nell'intorno del 10% (variabile tra 0,069 e 0,125), corrispondenti quindi ad una dispersione molto limitata (ottimo fitting) a testimonianza della buona omogeneità litostratigrafica determinata statisticamente all'interno degli strati determinati.

PNRR - M2C4 Investimento 3.3 - RINATURAZIONE DELL'AREA DEL PO	
Progetto di fattibilità tecnico economica	
SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE	
Codice elaborato:	PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A
Titolo elaborato:	Relazione geotecnica

pag. 13 / 60

Nell'**Allegato 1** fuori testo rispetto alla presente, sono rappresentate:

- I) le schermate principali della simulazione software per ogni verticale indagata (n° 8 + 1, quest'ultima per la CPTu 3 con modello a 5 strati))
- II) i modelli geotecnici ricavati attraverso la mediazione delle stratigrafie statistiche ottenute con la procedura illustrata, di cui alla spiegazione successiva.

I 4 modelli geotecnici sviluppati con le prove CPTu sono i seguenti, scelti in funzione della vicinanza tra le prove lungo l'asse del rilevato esistente, esposti da Sud a Nord:

- Modello A (CPTu 10)
- Modello B (CPTu 3 – CPTu 4)
- Modello C (CPTu 5 – CPTu 6)
- Modello D (CPTu 7 – CPTu 8 – CPTu 9).

2.3 Caratteristiche delle successioni da soil profiling

In estrema sintesi, la procedura di soil profiling ha messo in evidenza una successione media così composta, dall'alto (top del rilevato) verso il basso stratigrafico:

Livello 1: costituente la parte alta del rilevato, si estende fino a pochi metri di profondità ed è generalmente rappresentato da terreni misti, tipo da misti sabbiosi a misti limosi: da limi argillosi a argille limose

Livello 2: rappresenta la parte bassa del rilevato ed è costituito da terreni prevalentemente coesivi, da misti limosi a argille: da argille limose a argille; si estende fino a circa 8-9 m dal top del rilevato

Livelli 3 e 4: rappresentano le alluvioni in sito al di sotto del rilevato arginale; sono costituiti da terreni francamente granulari (detto carattere aumenta con la profondità) e si estendono fino alle massime profondità raggiunte dalle prove (oltre 24 m); sono tra loro non sempre ben distinguibili.

Sottostante ai livelli di cui sopra, identificati a mezzo delle prove penetrometriche, ad una profondità di circa 30 m dal piano sommitale del rilevato, compare un livello basale di argille limose plastiche grigie di spessore medio sui tre sondaggi pari a circa 7,6 m.

PNRR - M2C4 Investimento 3.3 - RINATURAZIONE DELL'AREA DEL PO	
Progetto di fattibilità tecnico economica	
SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE	
Codice elaborato:	PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A
Titolo elaborato:	Relazione geotecnica
pag. 14 / 60	

3 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

3.1 Introduzione

La caratterizzazione geotecnica di cui a presente documento è finalizzata alla determinazione delle principali proprietà di resistenza (terreni granulari = angolo di attrito efficace φ' e terreni coesivi = coesione non drenata CU) e deformabilità (modulo elastico E) necessarie al calcolo geotecnico e strutturale delle fondazioni dei manufatti prima citati.

Nella fattispecie, sulla base della procedura di SOIL PROFILING prima illustrata, si sono sviluppate le seguenti caratterizzazioni, oltre che naturalmente quelle delle proprietà fisiche:

Resistenza

- 1) Angolo di attrito efficace \Rightarrow per i terreni appartenenti ai livelli 1, 3 e 4 da sufficientemente (misti sabbiosi) a francamente granulari (sabbie prevalenti)
- 2) Coesione non drenata \Rightarrow per i terreni appartenenti al livello 2 laddove prevalentemente coesivi (argille limose e argille prevalenti).

Deformabilità: E_0 per tutti i terreni

Pertanto si caratterizzano, come anticipato, detti strati.

3.2 Caratterizzazione da prove CPTu

La caratterizzazione è sviluppata preliminarmente con correlazioni empiriche, esistenti in letteratura, dei parametri ricercati con le prove CPTu.

In particolare si citano le seguenti per terreni granulari e per i terreni coesivi interpretati a lungo termine:

Angolo di attrito efficace φ' :

Kulhawy & Mayne (1990)

$$\varphi'(^{\circ}) = 17.60^{\circ} + 11^{\circ} \log \left(\frac{q_t}{\sqrt{\sigma'_{v0} \cdot \sigma_{atm}}} \right)$$

Modulo elastico E_0 a bassi livelli di deformazione:

$$G_0 = (q_t - \sigma_{v0}) \cdot 0.0188 \cdot 10^{0.55I_c + 1.68}$$

$$E_0 = 2 G_0 (1 + \nu)$$

La caratterizzazione della resistenza per attrito avviene con la seguente procedura, la cui oggettività è massimizzata:

SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURECodice elaborato: **PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A**Titolo elaborato: **Relazione geotecnica**

pag. 15 / 60

- a) Per ogni singolo modello geotecnico si determina, per confronto dei valori di ϕ' nei diversi log del modello, il log di riferimento statistico
- b) Con il log di riferimento di cui si sopra si sviluppa un'analisi statistica nell'ambito dei livelli geotecnici da caratterizzare nel modello geotecnico
- c) Dall'analisi statistica di cui sopra si determina il valore caratteristico per ogni singolo livello in ogni modello.

Le tabelle di sintesi statistica dei valori di picco del ϕ' desunte dalle analisi di cui sopra (vedi Allegato 1) sono le seguenti, limitate ai livelli granulari di base 3 e 4:

Modello A

Layer	Start [m]	End [m]	Number	Mean	Min	Max	SD	COV	Sk	Max occ.	Mode	Type
3	9,18	11,70	252	36,92	0,00	38,63	2,48	0,07	- 13,17	251	36,48	Skewed left
4	11,70	14,80	310	37,65	35,53	44,17	1,12	0,03	3,08	301	36,81	Skewed left

Modello B

Layer	Start [m]	End [m]	Number	Mean	Min	Max	SD	COV	Sk	Max occ.	Mode	Type
3	8,00	12,10	410	37,42	35,40	39,30	0,90	0,02	- 0,31	410	37,33	Skewed left
4	12,10	18,50	640	38,35	0,00	45,90	5,28	0,14	- 5,23	356	39,01	Skewed left

Modello C

Layer	Start [m]	End [m]	Number	Mean	Min	Max	SD	COV	Sk	Max occ.	Mode	Type
3	9,95	11,95	200	35,17	32,08	36,41	0,64	0,02	- 1,16	199	34,39	Skewed left
4	12,55	19,03	648	40,53	0,00	45,32	2,67	0,07	- 5,15	412	38,52	Skewed left

Modello D

Layer	Start [m]	End [m]	Number	Mean	Min	Max	SD	COV	Sk	Max occ.	Mode	Type
3	10,00	11,00	100	34,01	0,00	36,13	4,91	0,14	- 6,85	99	33,87	Skewed left
4	11,30	18,68	738	39,70	0,00	44,39	3,20	0,08	- 7,77	381	42,17	Skewed left

Si noti che:

- I) In genere i valori del COV si mantengono bassi, segno di un'ottima profilazione del log verticale; Il campo dei valori del COV dipende dalla proprietà misurata; valori consueti secondo alcune regole semplificate (Harr, 1987) sono:
 $COV \leq 10\% \Rightarrow$ valori bassi
 $COV = 15 \div 30\% \Rightarrow$ valori moderati
 $COV > 30\% \Rightarrow$ valori alti.
- II) tutte le distribuzioni statistiche sono asimmetriche a dx (coda a sinistra, valore di Skewness negativo) verso i valori superiori.

Nel caso di terreni molto densi si raccomanda una riduzione dei valori di picco per tenere in conto del decadimento di resistenza per *softening*.

3.3 Caratterizzazione da prove SPT

I sondaggi S3 e S4 sono terebrati dalla sommità del rilevato, come si evince dalla quota di partenza di circa 83 m slm del tutto simile a quella delle prove CPTu.

Il sondaggio S5 è terebrato da una quota di partenza di circa 5 m inferiore (circa 83 m slm).

Per l'analisi delle prove SPT in foro, effettuate tutte con campionatore Raymond aperto, si attribuiscono dette prove per la loro ubicazione rispettivamente a:

S3 DH \Rightarrow modello geotecnico B

S4, S5 \Rightarrow modello geotecnico D.

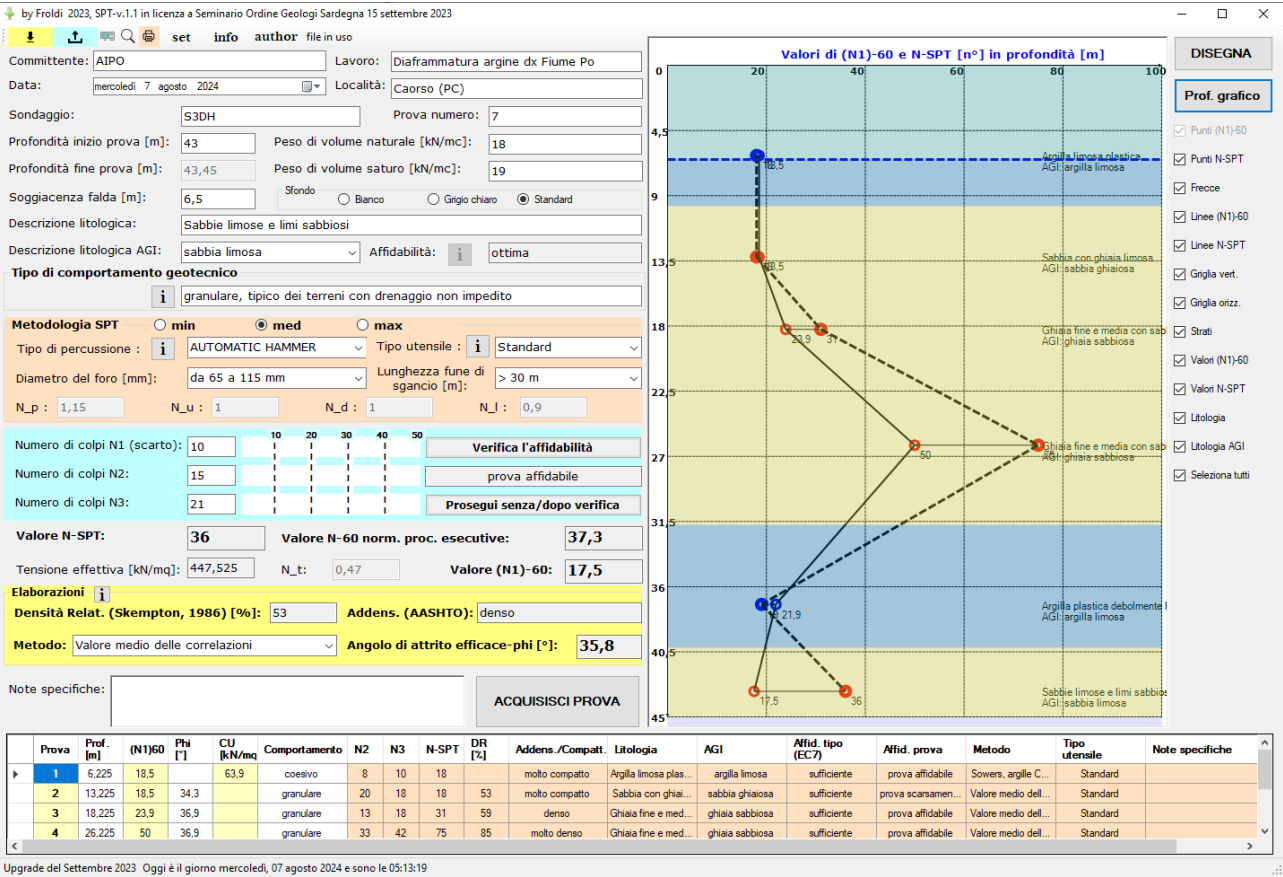
L'elaborazione delle prove SPT è sviluppata con adeguato software basato sulle norme in uso e in grado di adottare tutte le correzioni stabilite dagli standard internazionali.

L’elaborazione ha restituito i grafici e le tabelle esposte al seguito, rispettivamente per i sondaggi S3DH, S4 e S5.

I terreni granulari analizzati si dimostrano da mediamente addensati a molto addensati, quelli coesivi molto compatti.

Il valore medio del parametro ϕ' è tratto dalle seguenti correlazioni:

Peck, Hanson & Thorburn, 1974
Kulhawy & Maine, 1980
Shioi & Fukui, granulari RBS, 1982
Shioi & Fukui, granulari JNR, 1982
Hatanaka & Uchida, 1996



S3DH																
Prova	Prof. [m]	(N1)60	Phi [°]	CU [kN/mq]	Comportamento	N2	N3	N-SPT	DR [%]	Addens./Compatt.	Litologia	AGI	Affid. tipo (EC7)	Affid. prova	Metodo	Tipo utensile
1	6,225	18,5		63,9	coesivo	8	10	18		molto compatto	Argilla limosa plastica	argilla limosa	sufficiente	prova affidabile	Sowers, argille CL, 1979	Standard
2	13,225	18,5	34,3		granulare	20	18	18	53	molto compatto	Sabbia con ghiaia limosa	sabbia ghiaiosa	sufficiente	prova scarsamente affidabile	Valore medio delle correlazioni	Standard
3	18,225	23,9	36,9		granulare	13	18	31	59	denso	Ghiaia fine e media con sabbia grossolana	ghiaia sabbiosa	sufficiente	prova affidabile	Valore medio delle correlazioni	Standard
4	26,225	50	36,9		granulare	33	42	75	85	molto denso	Ghiaia fine e media con sabbia grossolana	ghiaia sabbiosa	sufficiente	prova affidabile	Valore medio delle correlazioni	Standard
5	37,225	21,9		67,4	coesivo	7	12	19		molto compatto	Argilla plastica debolmente limosa	argilla limosa	sufficiente	prova scarsamente affidabile	Sowers, argille CL, 1979	Standard
6	43,225	17,5	35,8		granulare	15	21	36	53	denso	Sabbie limose e limi sabbiosi	sabbia limosa	ottima	prova affidabile	Valore medio delle correlazioni	Standard

PNRR - M2C4 Investimento 3.3 - RINATURAZIONE DELL'AREA DEL PO

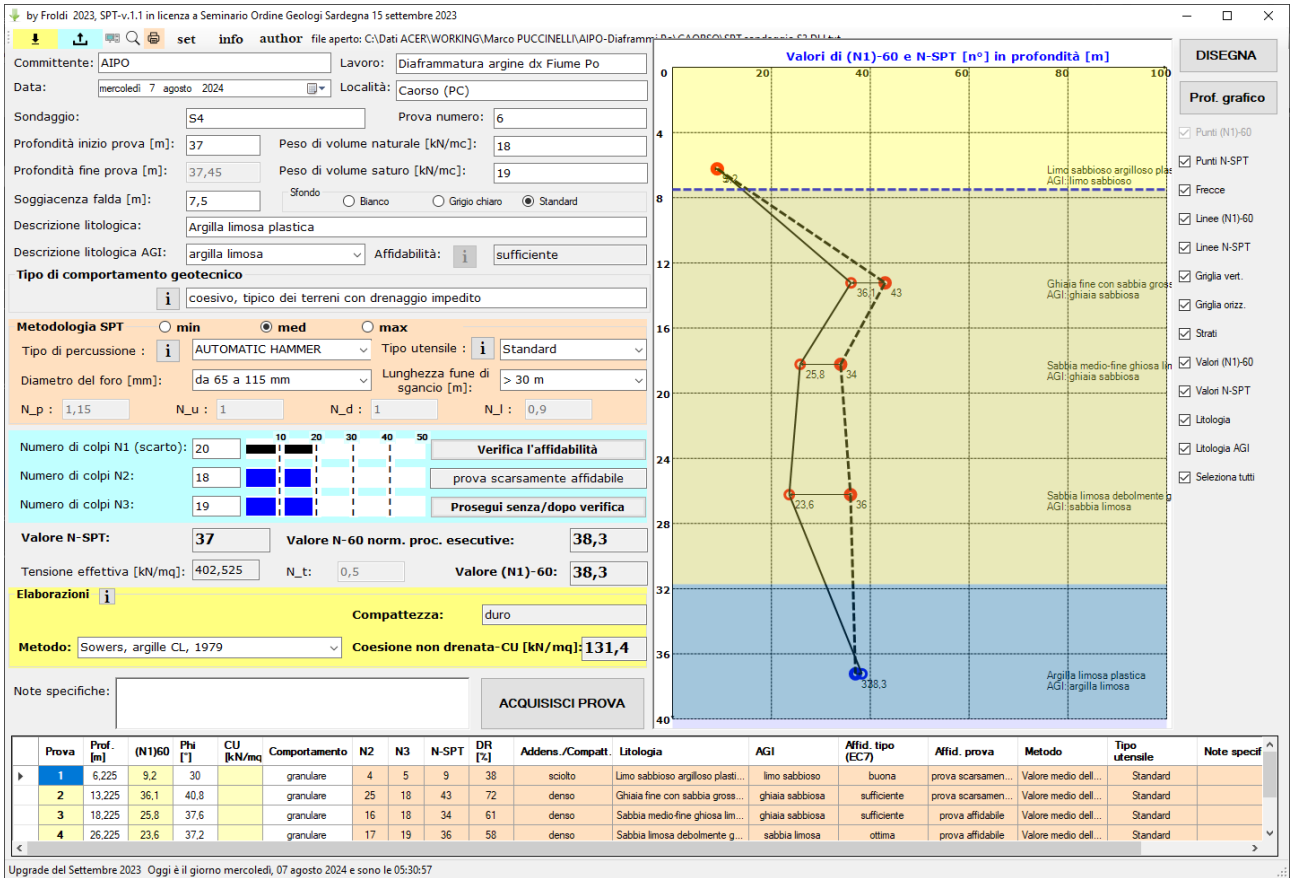
Progetto di fattibilità tecnico economica

SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE

Codice elaborato: PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A

Titolo elaborato: Relazione geotecnica

pag. 18 / 60



S4	Prova	Prof. [m]	(N1)60	Phi [°]	CU [kN/mq]	Comportamento	N2	N3	N-SPT	DR [%]	Addens./Compatt.	Litologia	AGI	Affid. tipo (EC7)	Affid. prova	Metodo	Tipo utensile
	1	6,225	9,2	30		granulare	4	5	9	38	sciolto	Limo sabbioso argilloso plastico	limo sabbioso	buona	prova scarsamente affidabile	Valore medio delle correlazioni	Standard
	2	13,225	36,1	40,8		granulare	25	18	43	72	denso	Ghiaia fine con sabbia grossolana	ghiaia sabbiosa	sufficiente	prova scarsamente affidabile	Valore medio delle correlazioni	Standard
	3	18,225	25,8	37,6		granulare	16	18	34	61	denso	Sabbia medio-fine ghiaiosa limosa	sabbia ghiaiosa	sufficiente	prova affidabile	Valore medio delle correlazioni	Standard
	4	26,225	23,6	37,2		granulare	17	19	36	58	denso	Sabbia limosa debolmente argillosa	sabbia limosa	ottima	prova affidabile	Valore medio delle correlazioni	Standard
	5	37,225	38,3		131,4	coesivo	18	19	37		duro	Argilla limosa plastica	argilla limosa	sufficiente	prova scarsamente affidabile	Sowers, argille CL, 1979	Standard

PNRR - M2C4 Investimento 3.3 - RINATURAZIONE DELL'AREA DEL PO

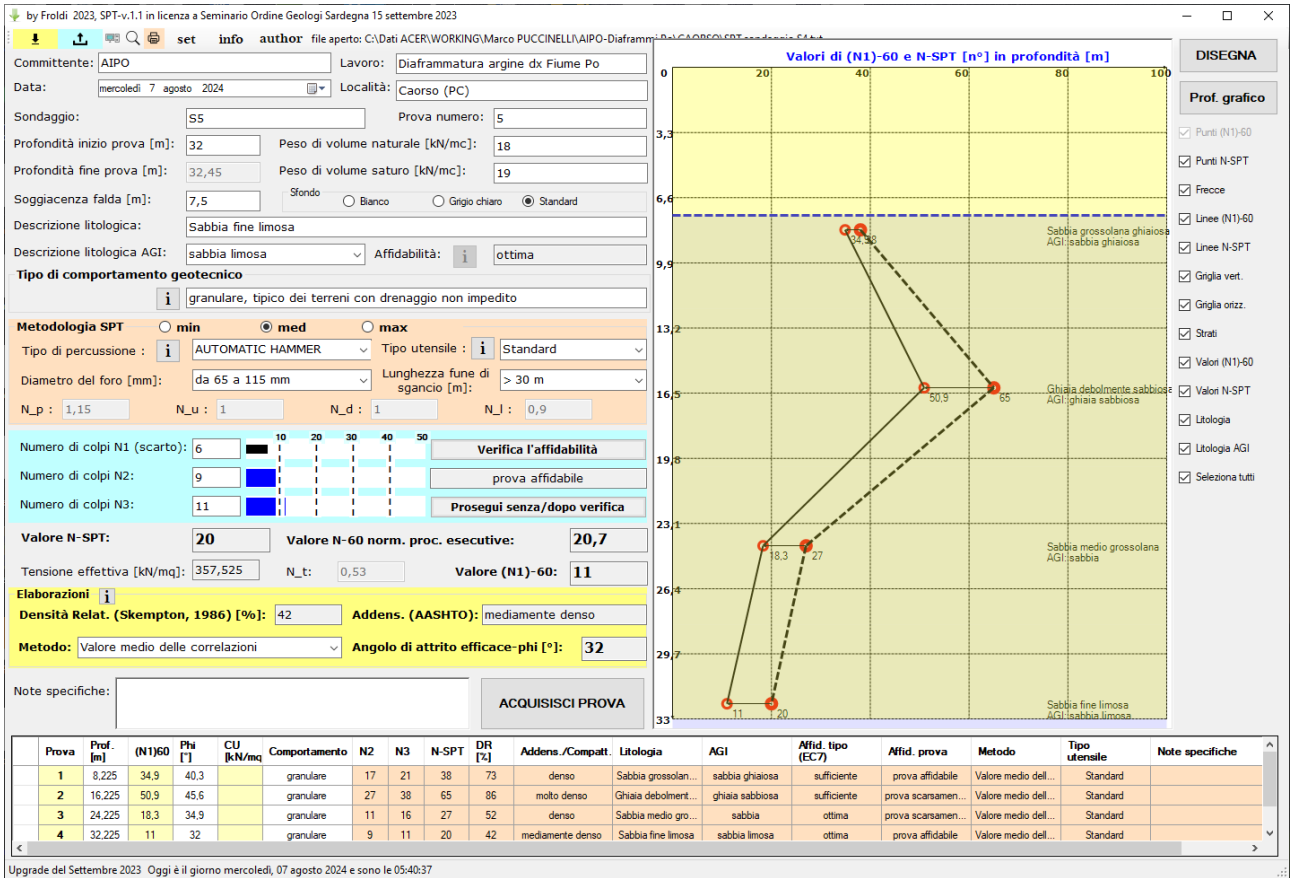
Progetto di fattibilità tecnico economica

SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE

Codice elaborato: PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A

Titolo elaborato: Relazione geotecnica

pag. 19 / 60



S5	Prova	Prof. [m]	(N1)60	Phi [°]	CU [kN/mq]	Comportamento	N2	N3	N-SPT	DR [%]	Addens./Compatt.	Litologia	AGI	Affid. tipo (EC7)	Affid. prova	Metodo	Tipo utensile
	1	8,225	34,9	40,3		granulare	17	21	38	73	denso	Sabbia grossolana ghiaiosa	sabbia ghiaiosa	sufficiente	prova affidabile	Valore medio delle correlazioni	Standard
	2	16,225	50,9	45,6		granulare	27	38	65	86	molto denso	Ghiaia debolmente sabbiosa	ghiaia sabbiosa	sufficiente	prova scarsamente affidabile	Valore medio delle correlazioni	Standard
	3	24,225	18,3	34,9		granulare	11	16	27	52	denso	Sabbia medio grossolana	sabbia	ottima	prova scarsamente affidabile	Valore medio delle correlazioni	Standard
	4	32,225	11	32		granulare	9	11	20	42	mediamente denso	Sabbia fine limosa	sabbia limosa	ottima	prova affidabile	Valore medio delle correlazioni	Standard

Con riferimento ai modelli geotecnici e relativi modelli precedentemente istituiti, vengono realizzate le seguenti tabelle di sintesi del parametro ϕ' :

Livello geotecnico	Modello B S3 DH
1 (0÷1,8) misto	nd
2 (1,8÷8,2) misto	nd
3 (8,2÷14,8) granulare	34,3
4 (14,2÷24,9) granulare	36,9

Livello geotecnico	Modello D S4, S5 (S5 sfalsato)
1 (0÷5,9) coesivo	nd
2 (5,9÷8,5) misto	35,2
3 (8,5÷11,8) granulare	43,2
4 (11,8÷18,7) granulare	37,6

A conferma e validazione dei dati dedotti dalle correlazioni empiriche in uso, che come noto non sono fisicamente basate e quindi non considerano appieno le effettive condizioni di esecuzione delle prove, sono state sviluppate determinazioni basate su rigorose formulazioni energetiche e fisico-meccaniche, in grado di cogliere tutti gli aspetti che caratterizzano la meccanica (dinamica e statica) della prova SPT.

Dette determinazioni passano sotto la denominazione di SPT Razionale (Rational SPT).

Nelle successive figure si riportano:

- a) Lo schema della meccanica della prova
- b) Una schermata di esempio del calcolo.



SCHEMA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE

Codice elaborato: PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A

Titolo elaborato: Relazione geotecnica

pag. 22 / 60

Rational Interpretation of the SPT [Froldi, P. 2024]									
Input data equipment									
Hammer mass - m_h [kg] =	63,5								
Anvil mass - m_a [kg] =	3,3								
Rod mass - m_r [kg/m] =	3,23								
Hammer weight - w_h [kN] =	0,623	$g = 9,81 \text{ m/s}^2$							
Anvil weight - w_a [kN] =	0,032	$g = 9,81 \text{ m/s}^2$							
Rod weight - w_r [kN] =	0,824	$g = 9,81 \text{ m/s}^2$							
Test start depth f.g.l. (rod length) - depth [m] =	26								
Hammer-anvil efficiency - η_{ha} (F-V method) [] =	0,76	Automatic hammer							
Rod efficiency - η_r [] =	0,943	Morgano & Liang (1992)							
Sampler external diameter - D_e [m] =	0,051								
Tip external diameter - D_p [m] =	0,04								
Shoe external diameter - D_s [m] =	0,035								
Sampler tip length - L_p [m] =	0,019								
Sampler shoe length - L_s [m] =	0,05								
Aoki parameter - α [] =	0,7								(Zapata-Galvis & Rogério-Esquivel, 2016)
Input data test for any increment									
Blows number N [] =	12	Inc ₂	17	Inc ₃	19	N _{SPT}	N2/N1	N3/N2	N3/N1
Unitary increment δ_N [m] =	0,013	0,009	0,008			36	1,417	1,118	1,583
Sampler advancement length (aver.) - L_{adv} [m] =	0,075	0,225	0,375						
Output data equipment									
Hammer + anvil + rods weight - w_{har} [kN] =	1,479								
Total efficiency - η^* [] =	0,720								
Unitary equivalent static force FSE = R_s [kN] =	28,800	40,184	44,737						
Soil properties									
Soil type =	sand								
Poisson's coefficient - ν [] =	0,2								
Young's modulus - E [kN/m ²] =	41272	Sand - (various authors - average)						2500	
Water depth - d_w [m from g.l.] =	7,5								
Soil density - γ_t [kN/m ³] =	19								
Sampler equivalent geometry									
Tip oblique length - L_o [m] =	0,0198								
Tip oblique surface - S_i [m ²] =	0,0028								
Sampler external surface - G [m ²] =	0,0090	0,0330	0,0570						
Shoe internal equivalent surface - I [m ²] =	0,0038								
Vertically projected obl. external surface - U [m ²] =	0,0027								
Equivalent internal shoe length - L_{se} [m] =	0,0343								
Equivalent length for any increment									
Equivalent lateral stiffness length - L_e [m] =	0,1093	0,2593	0,4093						
Elastic rebound forces									
Sampler lateral stiffness - K_l [kN/m] =	2953	7005	11057						
Experimental calibration from test data									
Lateral stiffness Correction Factor									
Calibrated sampler lat. stiffness - $K_{l,cal}$ [kN/m] =	10423	23536	30295						
Tip circular crown surface - S_p [m ²] =	0,0003								
Crown tip equivalent diameter - D_{ep} =	0,0194								
Sampler tip stiffness - K_p [kN/m] =	833								
Sampler stiffness ratio - $R_k = K_l/K_p$ [] =	3,547	8,414	13,281						
Sampler equivalent stiffness - $K_{eq,sa}$ [kN/m] =	11256	24368	31128						
Elastic displacement - δ_e [m] =	0,0026	0,0016	0,0014						
Reduction FSE factor $R_{\delta} < 1$ [] =	0,830	0,843	0,846						
Effective unit. equiv. static force FSE* = R_s^* [kN] =	23,907	33,856	37,847						
Theoretical Ratios between FSE* = between N									
$FSE^*_2/FSE^*_1 \cdot SE^*_3/FSE^*_3 \cdot SE^*_1/FSE^*_1$									
	1,416	1,118	1,583						
Difference from experimental ratios									
	0,000	0,000	0,000						
Sum of differences									
								0,000	
Forces and resistances									
Lateral and tip resistances									
Equivalent lateral surface - S_l [m ²] =	0,0175	0,0415	0,0656	$R_{p,1}$ [kN]	$R_{p,2}$ [kN]	$R_{p,3}$ [kN]	(Zapata & Esquivel, 2016)		
Equivalent friction ratio - R_{fe} [] =	0,0596	0,0596	0,0596	5,766	3,756	2,727	(Zapata & Esquivel, 2016)		
Parameter J [m ²] =	0,0049	0,0049	0,0049	$R_{l,1}$ [kN]	$R_{l,2}$ [kN]	$R_{l,3}$ [kN]	(Zapata & Esquivel, 2016)		
External laterale resistance - r_l [kPa] =	1168	761	552	20,450	31,604	36,213	(Zapata & Esquivel, 2016)		
Tip resistance - r_p [kPa] =	19576	12754	9258		$R_{t,2}/R_{t,1}$	$R_{t,3}/R_{t,2}$			
Effective vertical stress - σ_v [kN/m ²] =	310	312	313		1,55	1,15			
Bearing capacity factor - N_q [] =	63,079	40,917	29,574	< >	< >	< >			
Try bearing capacity factor - N_q [] =	62,986	41,098	29,675	399	367	341			
Effective friction angle - ϕ' [°] =	39,9	36,7	34,1						
Lateral resistance (method from N)									
External laterale resistance - r_l [kPa] N2-N1 =	464								
External laterale resistance - r_l [kPa] N3-N2 =	192								
Effective average friction angle - ϕ' [°] (N2, N3) =			35,4	Average on 2 nd and 3 rd advancement					

Figura 8 – Schermata di esempio del calcolo

PNRR - M2C4 Investimento 3.3 - RINATURAZIONE DELL'AREA DEL PO	
Progetto di fattibilità tecnico economica	
SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE	
Codice elaborato:	PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A
Titolo elaborato:	Relazione geotecnica

pag. 23 / 60

3.4 Caratterizzazione da prove pressiometriche Menard

La prova pressiometrica consiste nella misurazione delle dilatazioni indotte in una cella facente parte di una sonda tricellulare, calata in foro di sondaggio appositamente realizzato con un carotiere da 62 mm.

Le prove pressiometriche Menard effettuate nel corso dei sondaggi a carotaggi o continuo sono state analizzate in riferimento ai modelli e livelli geotecnici istituiti; al seguito si presenta una tabella riassuntiva dei risultati ottenuti, limitatamente ai modelli in cui tali prove sono presenti.

Modello geotecnico B				
Sondaggio	Prova	Profondità [m]	Livello	E [MPa]
S3 DH	1	11,25	3	30,3
	2	28,25	4	44,3
Modello geotecnico D				
S4	1	11,25	3	20,9
	2	27,25	4	42
S5 (sfals.)	1	4,25	3	13,3
		Valore medio livello 3		21,50
		Valore medio livello 4		35,93

Tabella di sintesi risultati da prove pressiometriche

I risultati sopra esposti sono stati estratti direttamente dal report delle indagini geognostiche; è stata anche realizzata una elaborazione dei dati direttamente dagli scriventi finalizzata a ricavare, oltre che il modulo pressiometrico E_M di Ménard (procedura normata NF P 94-110, 1991), anche il valore dell'angolo di attrito efficace (φ' , terreni granulari) e della coesione non drenata (CU, terreni coesivi) rispettivamente con note correlazioni internazionali.

Le elaborazioni sono esposte nello specifico allegato, mentre la sintesi dei risultati è esposta nella successiva tabella.

Sintesi dei valori resistenza da prova pressiometrica					
Prova	Prof. [m]	Litologia	E_M [MPa]	φ' [°]	CU [kPa]
S3-1	11,25	Sabbia con ghiaia medio-fine limosa	29,42	35,1	
S3-2	28,25	Sabbia da media a fine ghiaioso-limosa	31,84	37,4	
S4-1	11,25	Ghiaia grossolana debolmente sabbiosa	14,17	36,1	
S4-2	27,25	Sabbia limosa debolmente ghiaiosa	35,30	37,6	
S5-1	4,25	Argilla limosa debolmente sabbiosa plastica	7,80		0,71
		media granulari	27,7	36,5	

Tabella di sintesi elaborazione da prove pressiometriche

PNRR - M2C4 Investimento 3.3 - RINATURAZIONE DELL'AREA DEL PO									
Progetto di fattibilità tecnico economica									
SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE									
Codice elaborato:		PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A							
Titolo elaborato:		Relazione geotecnica							
								pag. 24 / 60	

3.5 Caratterizzazione da prove di laboratorio

Sui campioni indisturbati (CI) e rimaneggiati (CR) estratti dai sondaggi sono state effettuate indagini di laboratorio di carattere fisico-meccanico granulometrico.

Una sintesi dei risultati ottenuti è riportata nelle successive tabelle.

SONDAGGIO	LITOLOGIA da analisi granulometrica		CAMPIONI	PROFONDI TA'	LIVELLO	QUOTA da DTM m slm	CONTENUTO ACQUA	PESO VOLUME NATURALE	Densità umida prove EDO/TD
				m da b.f.		48.5			
S3_DH	limo (50.6%) - argilla (46.5%)	limo con argilla	CI1	3.5	4	1	44.5	23.59%	g=19.96 kN/m3
S3-DH	limo (57.26%) - argilla (41.38%)	limo con argilla	CR1	7	7.5	2	41		g=19.09 kN/m3
S3-DH	sabbia (72.11%) limo argillosa	sabbia limosa	CR2	11.5	12	3	36.5		g=19.10 kN/m3
S3-DH	sabbia (55.37%) ghiaiosa (33.87%)	sabbia con ghiaia, deb. limosa	CR3	15	15.5	4	33		
S3-DH	sabbia (91.42%)	sabbia deb. limosa	CR4	27.5	28	4	20.5		
S3_DH	argilla (82.63%)	argilla limosa	CI2	31.5	32.2	5	16.3	33.76%	g=17.90 kN/m3
SONDAGGIO	LITOLOGIA da analisi granulometrica	LITOLOGIA - AGI	CAMPIONI	PROFONDI TA'	LIVELLO	QUOTA da DTM m slm	CONTENUTO ACQUA	PESO VOLUME NATURALE	Densità umida prove EDO/TD
				m da b.f.		48.5			
S4	limo (47.81%) - argilla (41.63%)	limo con argilla deb. Sabbioso	CI1	3	3.6	1	44.9	27.21%	g=19.59 kN/m3
S4	Limo (61.16) argilloso	limo argilloso sabbioso	CR1	7	7.5	2	41		g=19.68-20.00 kN/m3
S4	Ghiaia (56.93%) sabbiosa	ghiaia con sabbia limosa	CR2	11.5	12	3	36.5		
S4	Sabbia (50.78%) ghiaiosa	sabbia con ghiaia deb. limosa	CR3	15	15.5	4	33		g=19.49 kN/m3
S4	sabbia (70.82%)	sabbia limosa	CI2	24	24.5	4	24	14.96%	g=21.55 kN/m3
S4	Sabbia (64%)	sabbia limo-ghiaiosa	CR4	27.5	28	4	20.5		g=21.14 kN/m3
SONDAGGIO	LITOLOGIA da analisi granulometrica		CAMPIONI	PROFONDI TA'	LIVELLO	QUOTA da DTM m slm	CONTENUTO ACQUA	PESO VOLUME NATURALE	Densità umida prove EDO/TD
				m da b.f.		43.5			
S5	sabbia (64.52%) ghiaia (15.77%)	sabbia limo ghiaiosa	CR1	7	7.5	3	36		g=19.12-19.58 kN/m3
S5	ghiaia (62.27%) sabbia (34.55%)	ghiaia con sabbia	CR2	15	15.5	3	28		
S5	argilla (51.62%) - limo (43.65%)	argilla con limo	CI1	25	25.6	5	17.9	19.60%	g=19.85 kN/m3
S5	argilla (57.62%) - limo (38.7%)	argilla con limo	CI2	28.6	29.3	5	14.2	24.60%	g=19.66-19.84 kN/m3
S5	sabbia (91.25%)	sabbia limosa	CR3	34	34.5	6	9		g=19.80-19.36 kN/m5

Tabella di caratterizzazione fisico-granulometrica

SONDAGGIO	CAMPIONI	PROFONDI TA'	LIVELLO	QUOTA da DTM m slm			
		m da b.f.		48.5			
S3_DH	CI1	3.5	4	1	44.5	M=2.43 MPa	c'=15.4 kPa fi'=28.3°
S3-DH	CR1	7	7.5	2	41		c'=13.7 kPa fi'=27.4°
S3-DH	CR2	11.5	12	3	36.5		c'=1.6 kPa fi'=34.2°
S3-DH	CR3	15	15.5	4	33		
S3-DH	CR4	27.5	28	4	20.5		
S3_DH	CI2	31.5	32.2	5	16.3		c'=22.3 kPa fi'=20.5°
							Cu= 81.47/2=40.7 kPa
SONDAGGIO	CAMPIONI	PROFONDI TA'	LIVELLO	QUOTA da DTM m slm	EDO	TD CD	ELL
		m da b.f.		48.5			
S4	CI1	3	3.6	1	44.9	M=2.59 MPa	c'=12.4 kPa fi'=26.2°
S4	CR1	7	7.5	2	41		
S4	CR2	11.5	12	3	36.5		
S4	CR3	15	15.5	4	33		c'=1.4 kPa fi'=32.4°
S4	CI2	24	24.5	4	24	M=22.22 MPa	c'=3.2 kPa fi'=32.8°
S4	CR4	27.5	28	4	20.5		Cu= 29.99/2=15 kPa
SONDAGGIO	CAMPIONI	PROFONDI TA'	LIVELLO	QUOTA da DTM m slm			
		m da b.f.		43.5			
S5	CR1	7	7.5	3	36		c'=4.4 kPa fi'=32.7°
S5	CR2	15	15.5	3	28		
S5	CI1	25	25.6	5	17.9	M=6.85 MPa	c'=17 kPa fi'=24.1°
S5	CI2	28.6	29.3	5	14.2	M=8.77 MPa	c'=22.4 kPa fi'=20.5°
S5	CR3	34	34.5	6	9		Cu= 52.88/2=26.44 kPa

Tabella di caratterizzazione meccanica

Sintesi prove di laboratorio con riferimento ai modelli B e D e relativi livelli geotecnici

PNRR - M2C4 Investimento 3.3 - RINATURAZIONE DELL'AREA DEL PO	
Progetto di fattibilità tecnico economica	
SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE	
Codice elaborato:	PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A
Titolo elaborato:	Relazione geotecnica
pag. 25 / 60	

3.6 Coefficiente di permeabilità

Per la stima dei valori di permeabilità di ciascun livello individuato in corrispondenza dell'area e attraversato dalle prove geognostiche sono state considerate le risultanze di alcune prove eseguite in corrispondenza del sito di studi.

Di particolare rilevanza è risulta determinazione diretta della permeabilità dei terreni dell'acquifero interessati dal progetto che è stata effettuata mediante le prove di portata eseguite in corrispondenza dei pozzi e piezometri realizzati lungo due punti (due campi prova) presso il tratto di argine in esame. Entrambi i campi prova sono costituiti da n°1 pozzo profondo 25 m, e n° 3 piezometri profondi 25 m.

Una sintesi dei risultati ottenuti è riportata nella successiva tabella.

			S3_DH	S4_2023	LIVELLO				S5_2023	LIVELLO
			sommità	sommità					p.c. base arginale	
Profondità			quota DTM m s.l.m.	quota DTM m s.l.m.					quota DTM m s.l.m.	
m da bocca foro	quota m s.l.m.		48.5	48.5		Profondità			43.5	
5.0	5.5	43.0	1.22E-08	3.65E-08	2	m da bocca foro	quota m s.l.m.			
10.0	10.5	38.0	1.05E-06	1.31E-06	2	5.0	5.5	38.0	2.07E-07	2
15.0	15.5	33.0	1.40E-04	1.13E-04	3	10.0	10.5	33.0	3.80E-05	3
20.0	20.5	28.0	1.05E-04	1.33E-04	4	15.0	15.5	28.0	1.12E-04	4
25.0	25.5	23.0	1.65E-04	1.40E-05	4	20.0	20.5	23.0	1.60E-04	4
30.0	30.5	18.0	2.43E-08	6.44E-07	4	25.0	25.5	18.0	1.22E-09	5
35.0	35.5	13.0	3.65E-09	6.08E-09	5	30.0	30.5	13.0	3.65E-09	5
						35.0	35.5	8.0	3.65E-08	sotto basale

Sintesi valori di permeabilità (k) da prove Lefranc

I valori stimati per i diversi livelli individuati sono i seguenti:

	2	3	4	5
media	5.23E-07	9.70E-05	9.85E-05	1.26E-08
5° percentile	1.71E-08	4.55E-05	4.65E-06	1.83E-09
minimo	1.22E-08	3.80E-05	6.44E-07	1.22E-09
massimo	1.31E-06	1.40E-04	1.65E-04	3.65E-08
Dev stad	6.11E-07	5.28E-05	6.63E-05	1.44E-08
COV	1.17E+00	5.45E-01	6.72E-01	1.15E+00
Bayesiano	2.18E-07	7.06E-05	6.54E-05	5.35E-09
16° percentile	2.78E-08	6.20E-05	1.35E-05	3.16E-09

Valori di permeabilità da prove di portata

Le prove di portata hanno permesso di valutare la permeabilità dei livelli L3 ed L4 che sono principalmente costituiti da sabbia e sabbia limosa (L3) e sabbiosa limosa con orizzonti di ghiaia (L4).

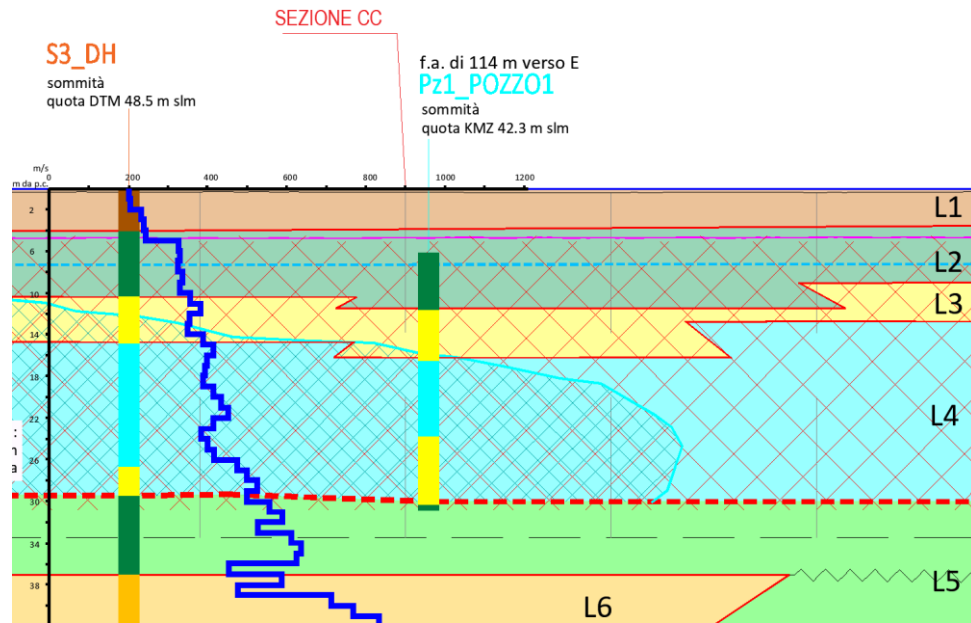


Figura 9 - Porzione profilo geologico ricostruito per l'area in esame, in corrispondenza del PZ1_Pozzo 1.

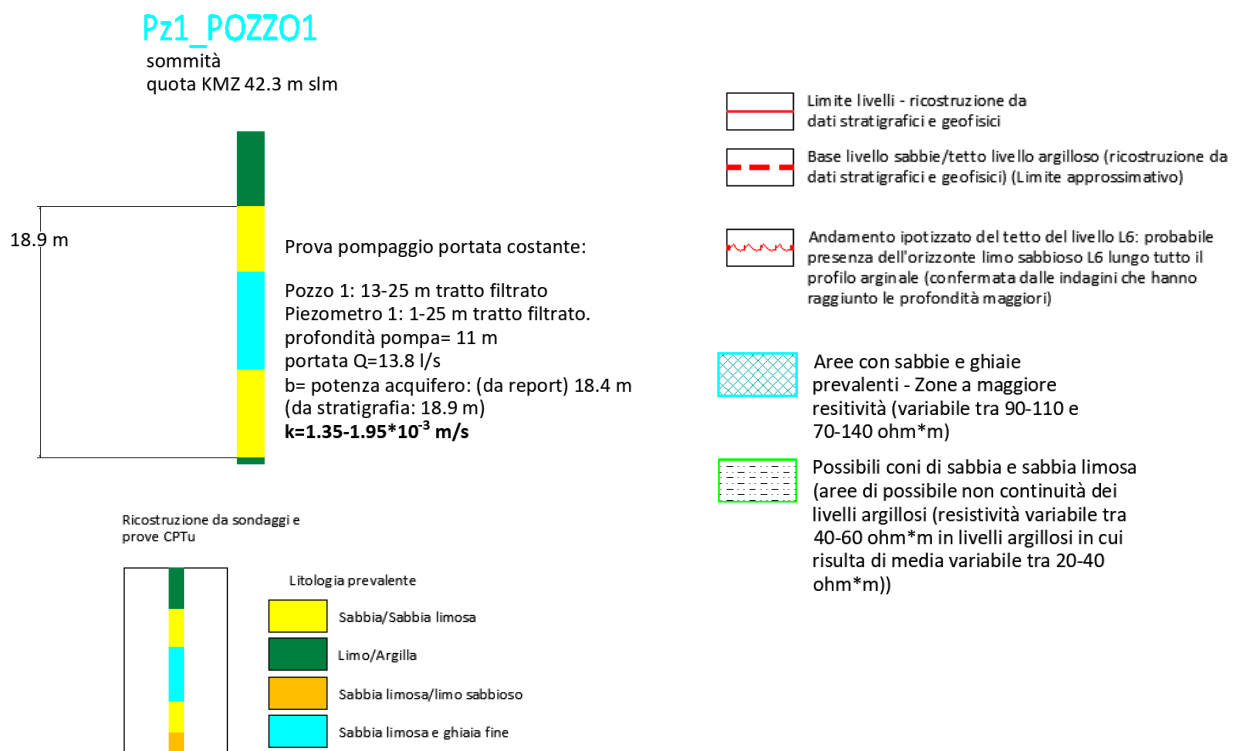


Figura 10 - Stratigrafia del PZ1_Pozzo 1 e configurazione piezometro per prova di portata su Pozzo 1. Porzione legenda da PF.0.1.6.GEO.GE.P.F.0.0.1

SCHEMA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE

Codice elaborato: PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A

Titolo elaborato: Relazione geotecnica

pag. 27 / 60

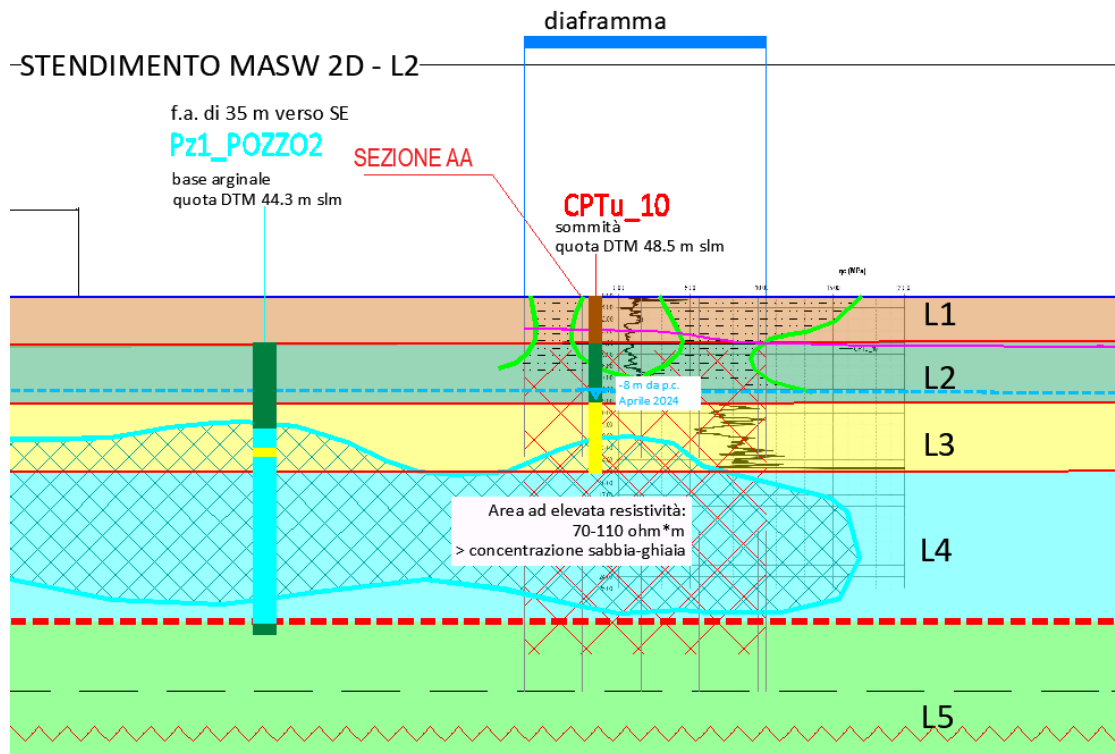
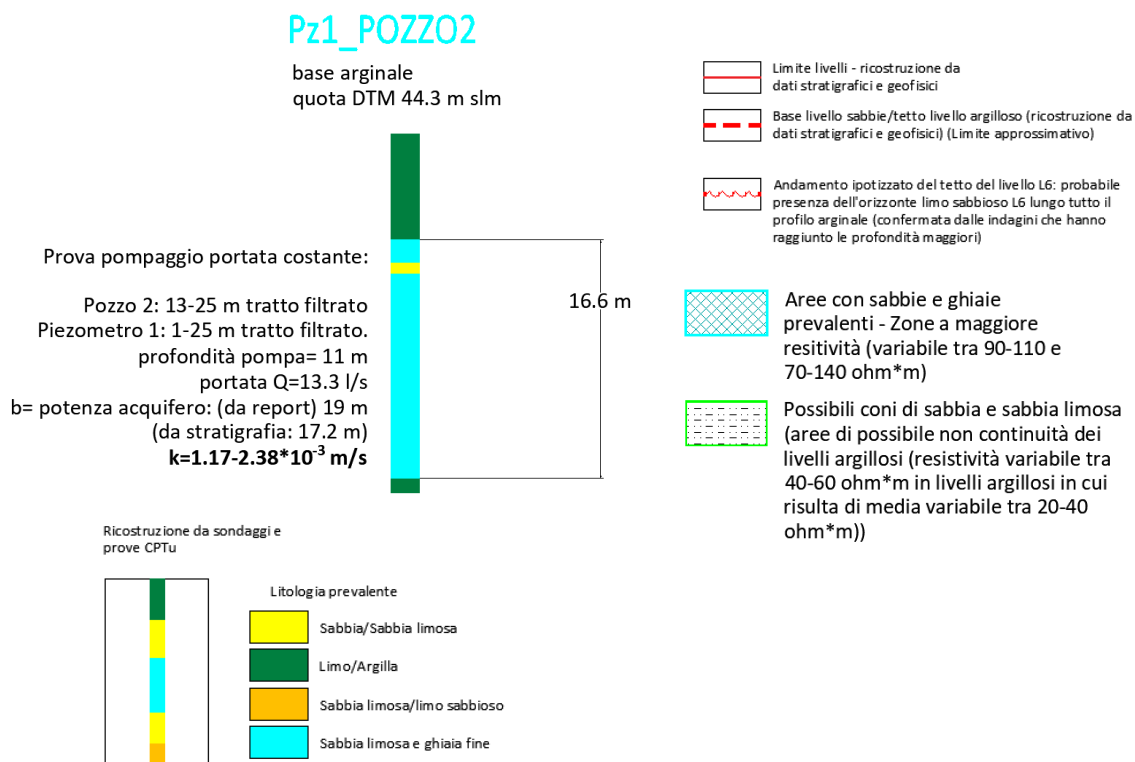


Figura 11 - Porzione profilo geologico ricostruito per l'area in esame, in corrispondenza del PZ1_Pozzo 2.



Porzione legenda da PF.0.1.6.GEO.GE.P.F.0.0.1

Figura 12 - Stratigrafia del PZ1_Pozzo 2 e configurazione piezometro per prova di portata su Pozzo 2.

Nella tabella seguente si riportano i risultati delle prove di portata eseguite in corrispondenza dell'area in esame.

POZZO 1					
Sigla piezometro		T m ² /s	S	k	LIVELLO
P1	pompaggio	3.44E-02	6.91E-04	1.87E-03	L3-L4
	risalita	2.48E-02		1.35E-03	L3-L4
P2	pompaggio	3.39E-02	2.89E-03	1.84E-03	L3-L4
	risalita	2.90E-02		1.58E-03	L3-L4
P3	pompaggio	3.59E-02	1.54E-03	1.95E-03	L3-L4
	risalita	2.70E-02		1.47E-03	L3-L4

Tabella 4. Risultati prova di portata Pozzo 1. Legenda: T = trasmissività; S = coefficiente di immagazzinamento; k = coefficiente di permeabilità.

POZZO 2					
Sigla piezometro		T m ² /s	S	k	LIVELLO
P1	pompaggio	3.50E-02	8.35E-04	1.84E-03	L3-L4
	risalita	2.22E-02		1.17E-03	L3-L4
P2	pompaggio	3.64E-02	7.12E-03	1.92E-03	L3-L4
	risalita	2.78E-02		1.46E-03	L3-L4
P3	pompaggio	4.51E-02	1.04E-03	2.38E-03	L3-L4
	risalita	2.63E-02		1.38E-03	L3-L4

Tabella 5. Risultati prova di portata Pozzo 2. Legenda: T = trasmissività; S = coefficiente di immagazzinamento; k = coefficiente di permeabilità.

La stima di k determinata attraverso l'elaborazione delle prove di portata individua per l'acquifero presente in corrispondenza dell'area in esame, costituito dai livelli L3 ed L4 valori variabili nel range tra **1.17E-03 e 2.38E-03 m/s**.

POZZO1		POZZO2	
p.c.		p.c.	
quota DTM m s.l.m.		quota DTM m s.l.m.	
43.5	LIVELLO	44.5	LIVELLO
1.35E-03	L3-L4	1.17E-03	L3-L4
1.95E-03		2.38E-03	

Nella tabella seguente si riportano i risultati delle prove di portata eseguite in corrispondenza dell'area in esame.

POZZO 1					
Sigla piezometro		T m ² /s	S	k	Livello
P1	pompaggio	3.44E-02	6.91E-04	1.87E-03	3-4
	risalita	2.48E-02		1.35E-03	3-4
P2	pompaggio	3.39E-02	2.89E-03	1.84E-03	3-4
	risalita	2.90E-02		1.58E-03	3-4
P3	pompaggio	3.59E-02	1.54E-03	1.95E-03	3-4
	risalita	2.70E-02		1.47E-03	3-4

Tabella 6. Risultati prova di portata Pozzo 1. Legenda: T = trasmissività; S = coefficiente di immagazzinamento; k = coefficiente di permeabilità.

POZZO 2					
Sigla piezometro		T m ² /s	S	k	Livello
P1	pompaggio	3.50E-02	8.35E-04	1.84E-03	3-4
	risalita	2.22E-02		1.17E-03	3-4
P2	pompaggio	3.64E-02	7.12E-03	1.92E-03	3-4
	risalita	2.78E-02		1.46E-03	3-4
P3	pompaggio	4.51E-02	1.04E-03	2.38E-03	3-4
	risalita	2.63E-02		1.38E-03	3-4

Tabella 7. Risultati prova di portata Pozzo 2. Legenda: T = trasmissività; S = coefficiente di immagazzinamento; k = coefficiente di permeabilità.

La stima di k determinata attraverso l'elaborazione delle prove di portata individua per l'acquifero presente in corrispondenza dell'area in esame, costituito dai livelli L2 ed L3 valori variabili nel range tra **1.17E-03 e 2.38E-03 m/s**.

POZZO1		POZZO2	
p.c.		p.c.	
quota DTM m s.l.m.		quota DTM m s.l.m.	
43.5	LIVELLO	44.5	LIVELLO
1.35E-03	3-4	1.17E-03	3-4
1.95E-03		2.38E-03	

Per la stima dei valori caratteristici di permeabilità di ciascun livello (e unità geotecnica) si rimanda al paragrafo "Parametri caratteristici".

Per i livelli costituenti l'acquifero (3-4) i valori di permeabilità considerati caratteristici sono **il valore minimo ed il valore massimo ottenuti dalle prove di portata** eseguite in corrispondenza dei campi prova realizzati nell'area in esame (sistemi pozzo+piezometri).

PNRR - M2C4 Investimento 3.3 - RINATURAZIONE DELL'AREA DEL PO	
Progetto di fattibilità tecnico economica	
SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE	
Codice elaborato:	PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A
Titolo elaborato:	Relazione geotecnica
pag. 30 / 60	

Per quanto riguarda il livello 1 (rilevato arginale) sono stati considerati i valori di permeabilità ottenuti dalle prove Lefranc eseguiti nel sottostante livello 2.

Mentre per il livello sottobasale (Livello 6 del modello geologico) è disponibile un solo dato di permeabilità da prova Lefranc eseguita in corrispondenza del sondaggio S5: questo valore risulta pari a $3.65 \cdot 10^{-8}$ m/s.

3.7 Coefficiente di Winkler

È noto che il coefficiente (o modulo, o costante) di sottofondo o di reazione (in termini anglosassoni Soil Stiffness o Spring Constant o ancora elastic Subgrade Reaction) di un terreno (K, orizzontale (h) o verticale (v)) è definito come il cedimento Δs di un elemento di fondazione di dimensioni unitarie sottoposto a un carico o pressione unitaria Δp , pertanto espresso dimensionalmente, per esempio, come kgf/cm^3 .

Il concetto di coefficiente di sottofondo fu introdotto da Winkler (1867) e in seguito utilizzato da Zimmermann (1888) per il calcolo delle tensioni nelle traversine ferroviarie posate sul ballast. Fu ripreso inoltre da Westergaard (1926) per il calcolo delle tensioni nei pavimenti in calcestruzzo.

Il coefficiente, che prende il nome dallo scienziato cecoslovacco (Winkler) che definì per primo la necessità di definire l'interazione terreno-struttura, individua in sé la costante di proporzionalità tra pressione e cedimento, il cui campo di validità si sviluppa fino a circa il 40-50% della tensione di rottura del terreno corrispondente ancora al campo di deformabilità elastica dello stesso.

Seppur teoricamente detto parametro appaia come costante, nonché come caratteristica intrinseca del terreno, e quindi indipendente da forma, estensione e superficie di carico, esso dipende almeno da:

- intensità del carico
- velocità di applicazione del carico
- presenza di falda
- caratteristiche geometriche della superficie di contatto terreno-fondazione.

Se ne deduce che è quindi una caratteristica intrinseca del sistema opera-struttura e, come tale, da definirsi sulla base del comportamento dello stesso.

Nella sua accezione elastica non dipende invece dal valore della pressione ed è assunto costante per i terreni coesivi e variabile linearmente con la profondità da piano di campagna per i terreni non coesivi (Terzaghi, 1955).

Nella realtà fisica il coefficiente K è meno che lineare e diminuisce al crescere delle deformazioni.

SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURECodice elaborato: **PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A**Titolo elaborato: **Relazione geotecnica**

pag. 31 / 60

Nonostante il modello d'interazione terreno-struttura con il metodo di Winkler si riveli sufficientemente adeguato a modellare le fondazioni flessibili monodimensionali che lavorano in condizioni di deformazione piana, esso trova i suoi limiti nelle seguenti considerazioni:

- il terreno, ancorché supposto come mezzo continuo, nella realtà si deforma anche al di fuori dell'impronta di carico;
- non considera la variazione delle caratteristiche elastiche del terreno con la posizione spaziale della tensione indotta sotto la fondazione.

Numerosi sono i metodi per la determinazione empirica o analitica del coefficiente di sottofondo.

Nel seguito si fa uso di metodi analitici.

Metodi analiticiVesic (1965)

In tal senso, per il coefficiente K nella modellazione del terreno alla Winkler si può utilizzare la nota relazione proposta da Vesic (1965), con nota conoscenza dei termini non espressamente illustrati:

$$K = \frac{0.65 \times E_s}{1 - \nu^2} \times \left[\frac{E_s \times B^4}{(EJ)_t} \right]^{1/12} \times \frac{1}{B}$$

dove:

E_s = modulo secante di elasticità del terreno per bassi livelli di sforzo [kN/m²]

ν = coefficiente di Poisson del terreno

E = modulo elastico del materiale di fondazione [kN/m²]

J = momento di inerzia della sezione del palo [m⁴]

EJ = rigidezza della fondazione [KN m²]

B = larghezza della fondazione [m].

Si farà uso di tale relazione ipotizzando una striscia di larghezza unitaria (concio unitario) del diaframma di arginatura per ogni livello litotecnico e indipendentemente dal modello assunto.

SCHEMA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE

Codice elaborato: PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A

Titolo elaborato: Relazione geotecnica

pag. 32 / 60

Livello 1 misto e livello 2 coesivo

Calcolo del coefficiente di Winkler			
Rigidezza del terreno di fondazione - Equazione empirica di Vesic (1961)			
			Note
Modulo elastico del terreno - E_s [kN/m ²] =	2500		indag. varie+pressiometriche
Coefficiente di Poisson del terreno - u_s [kN/m ²] =	0,35		livello 1 misto + 2 coesivo
Larghezza fondazione - B [m] =	1		concio unitario
Altezza della fondazione - h [m] =	0,8		altezza trave equivalente
Modulo elastico del calcestruzzo - E_c [N/mm ²] =	31476		C25/30 $\Rightarrow f_{ck} = 25$
Modulo elastico del calcestruzzo - E_c [kN/m ²] =	31475806		
Momento di inerzia della trave - J [m ⁴] =	0,0426667		$B \times h^3 / 12$
Coefficiente di Winkler - k [kN/m ³] =	1097		
Coefficiente di Winkler - k [daN/cm ³] =	0,110		
$K = \frac{0.65 \times E_s}{1 - \nu^2} \times \left[\frac{E_s \times B^4}{(EJ)_t} \right]^{1/12} \times \frac{1}{B}$			

Livello 3 granulare

Calcolo del coefficiente di Winkler			
Rigidezza del terreno di fondazione - Equazione empirica di Vesic (1961)			
			Note
Modulo elastico del terreno - E_s [kN/m ²] =	21500		indag. varie+pressiometriche
Coefficiente di Poisson del terreno - u_s [kN/m ²] =	0,3		livello 3 granulare
Larghezza fondazione - B [m] =	1		concio unitario
Altezza della fondazione - h [m] =	0,8		altezza trave equivalente
Modulo elastico del calcestruzzo - E_c [N/mm ²] =	31476		C25/30 $\Rightarrow f_{ck} = 25$
Modulo elastico del calcestruzzo - E_c [kN/m ²] =	31475806		
Momento di inerzia della trave - J [m ⁴] =	0,0426667		$B \times h^3 / 12$
Coefficiente di Winkler - k [kN/m ³] =	10881		
Coefficiente di Winkler - k [daN/cm ³] =	1,088		
$K = \frac{0.65 \times E_s}{1 - \nu^2} \times \left[\frac{E_s \times B^4}{(EJ)_t} \right]^{1/12} \times \frac{1}{B}$			

SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE

Codice elaborato: PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A

Titolo elaborato: Relazione geotecnica

pag. 33 / 60

Livello 4 granulare

Calcolo del coefficiente di Winkler			
Rigidezza del terreno di fondazione - Equazione empirica di Vesic (1961)			
		Note	
Modulo elastico del terreno - E_s [kN/m ²] =	35000	indag. varie+pressiometriche	
Coefficiente di Poisson del terreno - u_s [kN/m ²] =	0,3	livello 4 granulare	
Larghezza fondazione - B [m] =	1	concio unitario	
Altezza della fondazione - h [m] =	0,8	altezza trave equivalente	
Modulo elastico del calcestruzzo - E_c [N/mm ²] =	31476	C25/30 $\Rightarrow f_{ck} = 25$	
Modulo elastico del calcestruzzo - E_c [kN/m ²] =	31475806		
Momento di inerzia della trave - J [m ⁴] =	0,0426667	$B \times h^3 / 12$	
Coefficiente di Winkler - k [kN/m ³] =	18448		
Coefficiente di Winkler - k [daN/cm ³] =	1,845		
$K = \frac{0.65 \times E_s}{1 - \nu^2} \times \left[\frac{E_s \times B^4}{(EJ)_t} \right]^{1/12} \times \frac{1}{B}$			

Livello 5 basale (coesivo)

Calcolo del coefficiente di Winkler			
Rigidezza del terreno di fondazione - Equazione empirica di Vesic (1961)			
			Note
Modulo elastico del terreno - E_s [kN/m ²] =	9000	indag. varie+pressiometriche	
Coefficiente di Poisson del terreno - u_s [kN/m ²] =	0,4	livello 5 basale (coesivo)	
Larghezza fondazione - B [m] =	1	concio unitario	
Altezza della fondazione - h [m] =	0,8	altezza trave equivalente	
Modulo elastico del calcestruzzo - E_c [N/mm ²] =	31476	C25/30 $\Rightarrow f_{ck} = 25$	
Modulo elastico del calcestruzzo - E_c [kN/m ²] =	31475806		
Momento di inerzia della trave - J [m ⁴] =	0,0426667	$B \times h^3 / 12$	
Coefficiente di Winkler - k [kN/m ³] =	4589		
Coefficiente di Winkler - k [daN/cm ³] =	0,459		
$K = \frac{0.65 \times E_s}{1 - \nu^2} \times \left[\frac{E_s \times B^4}{(EJ)_t} \right]^{1/12} \times \frac{1}{B}$			

3.8 Parametri caratteristici

Sulla base delle analisi e determinazioni precedentemente illustrate, relativamente ai modelli geotecnici e relativi livelli, si deducono le seguenti caratterizzazioni.

Laddove non presenti prove o altre indagini, i parametri caratteristici sono stati attribuiti sulla base dell’affinità litologica e di comportamento geotecnico con i livelli compiutamente caratterizzati.

Modello A

				Granulari	BT-coesivi	LT – misti e coesivi		Deformabilità		Permeabilità
Prof. [m]	Unità Geot.	γ naturale [kN/m ³]	γ saturo [kN/m ³]	ϕ' [°]	Cu [kN/m ²]	c' [kN/m ²]	ϕ' [°]	E _{ed} [MPa]	E _M [MPa]	k [m/s]
0-2.5	UG1 misto	19-20 (19.5)	20.5	-	-	12-13 (12.5)	25-27 (26)	2-3 (2.6)		1.22E-08 – 1.31E-06
2.5-9.1	UG2/2a coesivo	19-20 (19.5)	20.5	-	60-70 (65)	12-13 (12.5)	27.5-28.5 (28)	2-3 (2.5)		1.22E-08 – 1.31E-06
9.1-11.7	UG3 gran.	19.5-20.5 (20)	21	36-37 (36.5)	-	-	-	21-22 (21.5)	27-28	1.17E-03 - 2.38E-03
11.7-27.9	UG4 gran.	19.5-20.5 (20)	21	36-38 (37)	-	-	-	30-40 (35)	27-28	1.17E-03 - 2.38E-03
>27.9	UG5	19.5-20.5 (20)	21	-	60-70 (65)	21-23 (22)	20-21 (20.5)	8-10 (9)		1.22E-09 - 3.65E-08

PNRR - M2C4 Investimento 3.3 - RINATURAZIONE DELL'AREA DEL PO

Progetto di fattibilità tecnico economica

SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURECodice elaborato: **PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A**Titolo elaborato: **Relazione geotecnica**

pag. 35 / 60

Modello B

				Granulari	BT-coesivi	LT – misti e coesivi		Deformabilità		Permeabilità
Prof. [m]	Unità Geot.	γ naturale [kN/m ³]	γ saturo [kN/m ³]	ϕ' [°]	Cu [kN/m ²]	c' [kN/m ²]	ϕ' [°]	E _{ed} [MPa]	E _M [MPa]	k [m/s]
0-1.8	UG1 misto	19-20 (19.5)	20.5	-	-	12-13 (12.5)	25-27 (26)	2-3 (2.6)		1.22E-08 – 1.31E-06
1.8-8.2	UG2/2a coesivo	19-20 (19.5)	20.5	-	60-70 (65)	12-13 (12.5)	27.5-28.5 (28)	2-3 (2.5)		1.22E-08 – 1.31E-06
8.2-14.8	UG3 gran.	19.5-20.5 (20)	21	34-37 (34.5)	-	-	-	21-22 (21.5)	27-28	1.17E-03 2.38E-03
14.8-29.6	UG4 gran.	19.5-20.5 (20)	21	36-38 (37)	-	-	-	30-40 (35)	27-28	1.17E-03 - 2.38E-03
>29.5	UG5	19.5-20.5 (20)	21	-	60-70 (65)	21-23 (22)	20-21 (20.5)	8-10 (9)		1.22E-09 - 3.65E-08

Modello C

				Granulari	BT-coesivi	LT – misti e coesivi		Deformabilità		Permeabilità
Prof. [m]	Unità Geot.	γ naturale [kN/m ³]	γ saturo [kN/m ³]	ϕ' [°]	Cu [kN/m ²]	c' [kN/m ²]	ϕ' [°]	E _{ed} [MPa]	E _M [MPa]	k [m/s]
0-5.9	UG1/1a misto	19-20 (19.5)	20.5	-	-	12-13 (12.5)	25-27 (26)	2-3 (2.6)		1.22E-08 – 1.31E-06
5.9-9.1	UG2 coesivo	19-20 (19.5)	20.5	-	60-70 (65)	12-13 (12.5)	27.5-28.5 (28)	2-3 (2.5)		1.22E-08 – 1.31E-06
9.1-12.5	UG3 gran.	19.5-20.5 (20)	21	32-36 (34)	-	-	-	21-22 (21.5)	27-28	1.17E-03 2.38E-03
12.5-30.4	UG4 gran.	19.5-20.5 (20)	21	38-39 (38.5)	-	-	-	30-40 (35)	27-28	1.17E-03 - 2.38E-03
>30.4	UG5	19.5-20.5 (20)	21	-	60-70 (65)	21-23 (22)	20-21 (20.5)	8-10 (9)		1.22E-09 - 3.65E-08

PNRR - M2C4 Investimento 3.3 - RINATURAZIONE DELL'AREA DEL PO		
Progetto di fattibilità tecnico economica		
SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE		
Codice elaborato:	PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A	
Titolo elaborato:	Relazione geotecnica	pag. 36 / 60

Modello D

				Granulari	BT-coesivi	LT – misti e coesivi		Deformabilità		Permeabilità
Prof. [m]	Unità Geot.	γ naturale [kN/m ³]	γ saturo [kN/m ³]	ϕ' [°]	Cu [kN/m ²]	c' [kN/m ²]	ϕ' [°]	E _{ed} [MPa]	E _M [MPa]	k [m/s]
0-5.9	UG 1/1a misto	19-20 (19.5)	20.5	nd	nd	12-13 (12.5)	25-27 (26)	2-3 (2.6)		1.22E-08 – 1.31E-06
5.9-8.5	UG2 coesivo	19-20 (19.5)	20.5	nd	60-70 (65)	12-13 (12.5)	27.5-28.5 (28)	2-3 (2.5)		1.22E-08 – 1.31E-06
8.5-11.8	UG3 gran.	19.5-20.5 (20)	21	32-36 (34)	-	-	-	21-22 (21.5)	27-28	1.17E-03 2.38E-03
11.8-28.7	UG4 gran.	19.5-20.5 (20)	21	35-37 (36)	-	-	-	30-40 (35)	27-28	1.17E-03 - 2.38E-03
>28.7	UG5	19.5-20.5 (20)	21	nd	60-70 (65)	21-23 (22)	20-21 (20.5)	8-10 (9)		1.22E-09 - 3.65E-08

3.8.1 Corrispondenza livelli modelli GEOLOGICO – GEOTECNICO

Come riportato nella Relazione Geologica (PF.0.1.6.GEO.GE.R.T.0.0.1) le informazioni ottenute attraverso i risultati delle prove geognostiche eseguite nella campagna di indagini di Gennaio-Aprile 2024 hanno permesso di ricostruire il modello geologico-geotecnico. Nella tabella che segue si riporta sinteticamente il modello geologico dell'area.

			Profondità	
			DA SOMMITÀ ARGINALE	DA P.C.
L1	<p>- Argine – L1: rilevato arginale, costituito da terreno di riporto limo-argilloso; in superficie le prove hanno attraversato anche un livello di circa 1 m di materiale che costituisce il sottofondo stradale. Il livello è stato riconosciuto sia lungo le verticali delle prove CPTu, eseguite tutte a partire dalla sommità arginale, che in corrispondenza dei sondaggi S3_DH e S4, eseguiti in sommità arginale. È costituito prevalentemente da terreni limosi/limo sabbiosi. Il livello è presente sino a -4/-4.5 m da sommità arginale. Parametri caratteristici del livello: $qc = 0.6/0.9$ MPa; $Vs = <200$ m/s; Resistività $< 70-50$ ohm*m</p>		-4/4.5 m da sommità arginale	-
L2	<p>- Livello L2: coltre alluvionale di superficie prevalentemente limosa-argillosa con presenza di sabbia. Questo livello, prevalentemente limo argilloso, è stato attraversato da tutte le prove, è presente a partire da p.c. (quindi si trova al di sotto dell'argine sopra descritto/a partire dalla base arginale) sino a profondità di -4/7.5 m da p.c. Parametri caratteristici del livello: $qc = 0.7/1.1$ MPa; $Vs = 190/200$ m/s; Resistività $< 70-30$ ohm*m</p>		-7/11 m da sommità arginale	-4/7.5 m da p.c.

PNRR - M2C4 Investimento 3.3 - RINATURAZIONE DELL'AREA DEL PO		
Progetto di fattibilità tecnico economica		
SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE		
Codice elaborato:	PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A	
Titolo elaborato:	Relazione geotecnica	pag. 37 / 60

		Profondità	
		DA SOMMITÀ ARGINALE	DA P.C.
L3	- <i>Livello L3:</i> livello prevalentemente costituito da sabbia e sabbia limosa. Il livello è presente a partire da -4/7.5 m da p.c. sino a circa -8/13 m da p.c. <i>Parametri caratteristici del livello:</i> $q_c = 1.2/4.7 \text{ MPa}$; $V_s = 200\text{-}250 \text{ m/s}$; <i>Resistività</i> = 70-30 ohm*m	-12/16.5 m da sommità arginale	-8/13 m da p.c.
L4	- <i>Livello L4:</i> livello prevalentemente costituito da sabbia/sabbia limosa con presenza di orizzonti di ghiaia fine. Il livello è presente a partire dai 8/13 m da p.c. sino a circa 23.5/26.0 m da p.c. La maggior parte delle prove penetrometriche statiche raggiunge il rifiuto in corrispondenza di questo livello. Attraverso i sondaggi a carotaggio continuo eseguiti è stato possibile verificare che la base del livello è presente a circa 23-26 m da p.c. <i>Parametri caratteristici del livello:</i> $q_c = 6/12.7 \text{ MPa}$; $V_s = 250\text{-}350 \text{ m/s}$; <i>Resistività</i> > 70-90 ohm*m	-29/-30 m da sommità arginale	-23.5/26 m da p.c.
L5	- <i>Livello L5:</i> livello prevalentemente costituito da argilla limosa. Il livello è presente a partire da 23.5/26 m da p.c. <i>Parametri caratteristici del livello:</i> $V_s = 350\text{-}400 \text{ m/s}$.	-35/-39 m da sommità arginale	-31/33 m da p.c.
L6	- <i>Livello L6:</i> A partire da profondità superiori ai 35/38.6 m da sommità arginale la litologia prevalente risulta essere costituita da limo sabbioso con presenza di sacche decimetriche di sabbia/sabbia limosa debolmente ghiaiosa. Il livello è stato riconosciuto in corrispondenza dei sondaggi geognostici che hanno raggiunto la profondità massima di -45 m da sommità arginale. <i>Parametri caratteristici del livello:</i> $V_s \text{ (prova DH)} > 400 \text{ m/s}$.		

Nella tabella seguente è visualizzabile la corrispondenza tra i livelli geologici e le unità Geotecniche per ogni modello geotecnico individuato.

Il modello geologico è stato costruito considerando in generale le informazioni stratigrafiche date dai sondaggi e dalle prove sismiche eseguite in corrispondenza dell'area, considerando la quota della base arginale come individuata dalla topografia. I modelli geotecnici descritti precedentemente sono stati costruiti puntualmente rispetto ai dati delle prove CPTu, in alcuni casi in questi ultimi si sono omogeneizzati i parametri dei livelli più superficiali L1 (argine) ed L2 (livello).

SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE

Codice elaborato: **PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A**

Titolo elaborato: **Relazione geotecnica**

pag. 38 / 60

MODELLO GEOLOGICO	MODELLO GEOTECNICO
	A
Livello modello geologico	Unità geotecnica
L1	1
	2a
L2	2
L3	3
	4
L4	4
L5	5

MODELLO GEOLOGICO	MODELLO GEOTECNICO
	B
Livello modello geologico	Unità geotecnica
L1	1
	2a
L2	2
L3	3
L4	4
L5	5

MODELLO GEOLOGICO	MODELLO GEOTECNICO
	C-D
Livello modello geologico	Unità geotecnica
L1	1
L2	1a
	2
L3	3
L4	4
L5	5

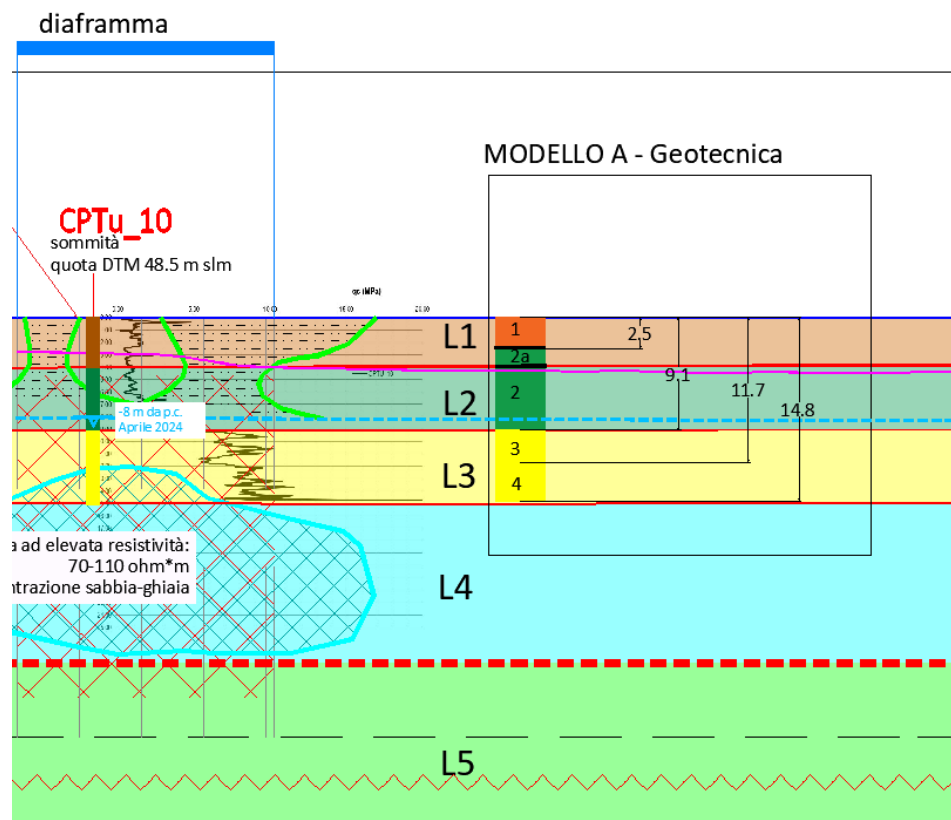
Corrispondenza tra i livelli geologici e le unità geotecniche per ogni modello geotecnico individuato

SCHEMA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE

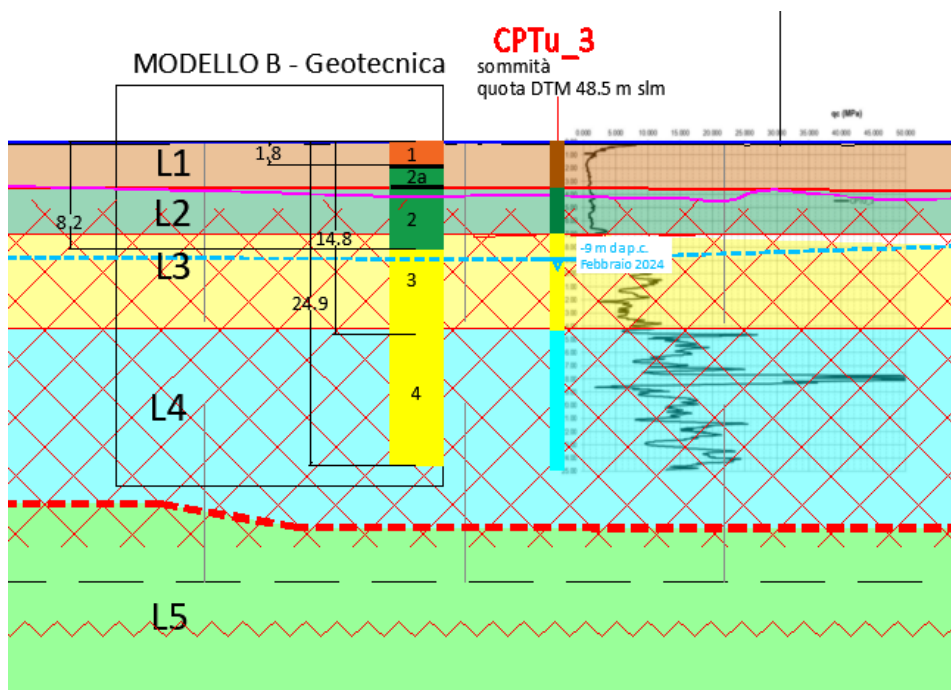
Codice elaborato: PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A

Titolo elaborato: Relazione geotecnica

pag. 39 / 60

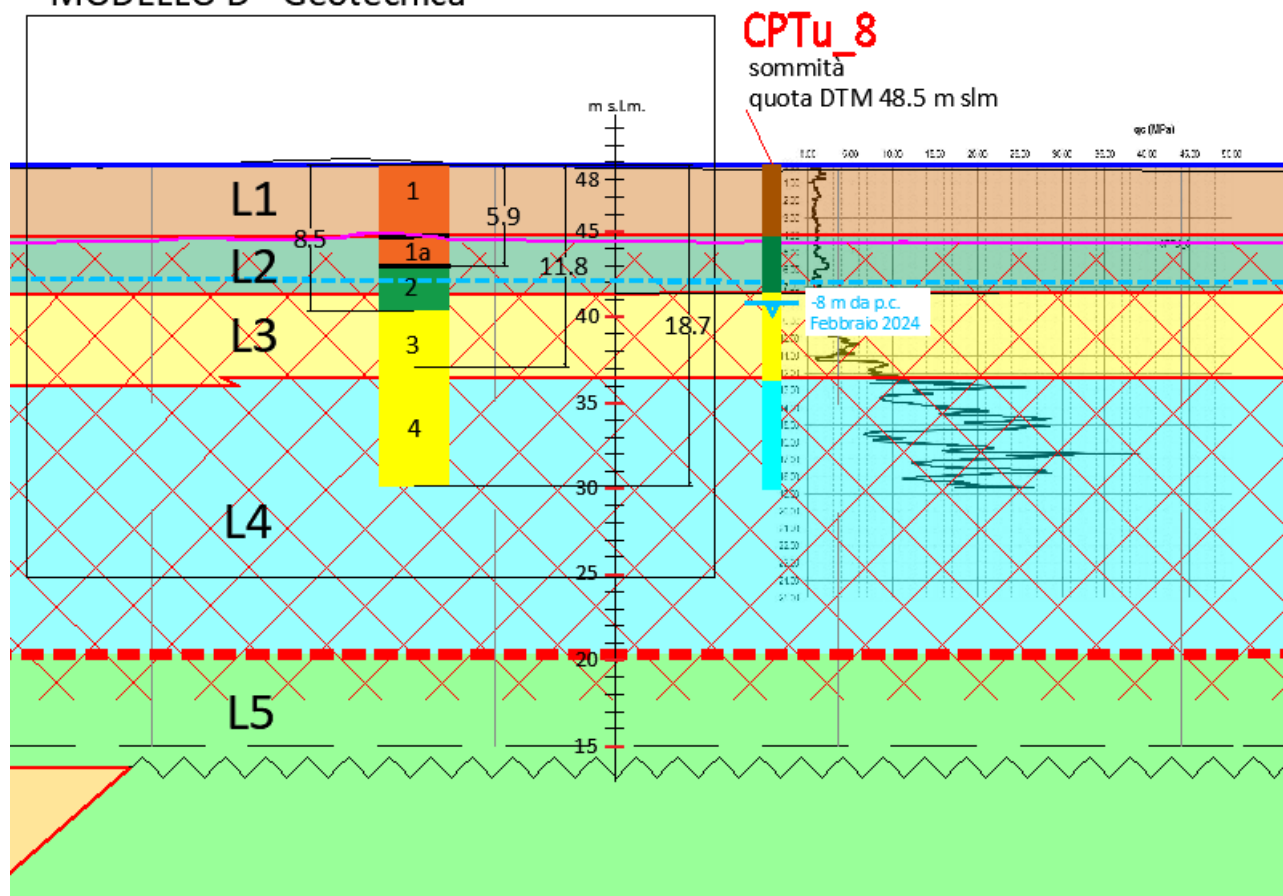


Modello geotecnico A



Modello geotecnico B

MODELLO D - Geotecnica



Modello geotecnico C-D

4 ALLEGATO 1

4.1 Elaborazione prove cptu e modelli geotecnici

Le elaborazioni delle prove cptu sono state eseguite tramite il software GeoStratEx.

PNRR - M2C4 Investimento 3.3 - RINATURAZIONE DELL'AREA DEL PO

Progetto di fattibilità tecnico economica

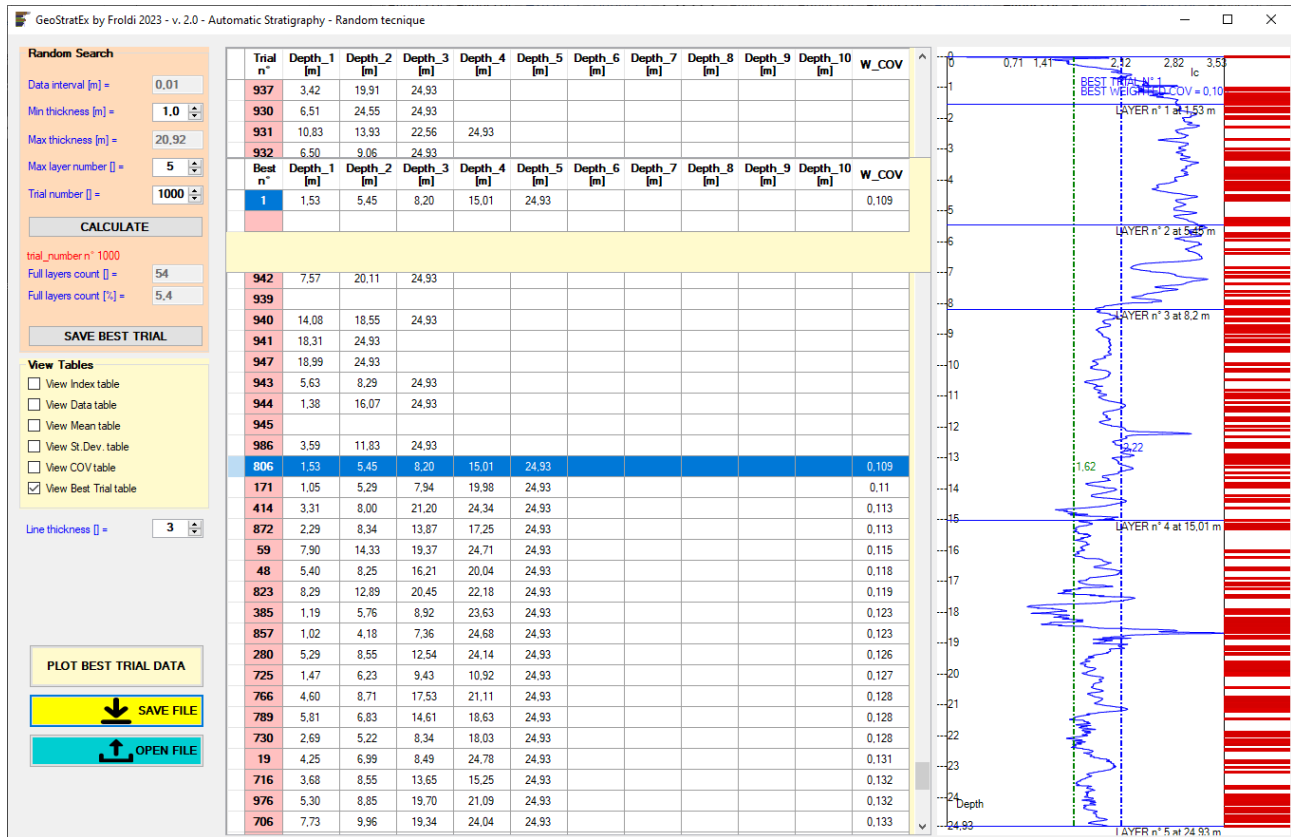
SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE

Codice elaborato: PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A

Titolo elaborato: Relazione geotecnica

pag. 42 / 60

Prova CPTu 3 – RND modello a 5 strati



PNRR - M2C4 Investimento 3.3 - RINATURAZIONE DELL'AREA DEL PO

Progetto di fattibilità tecnico economica

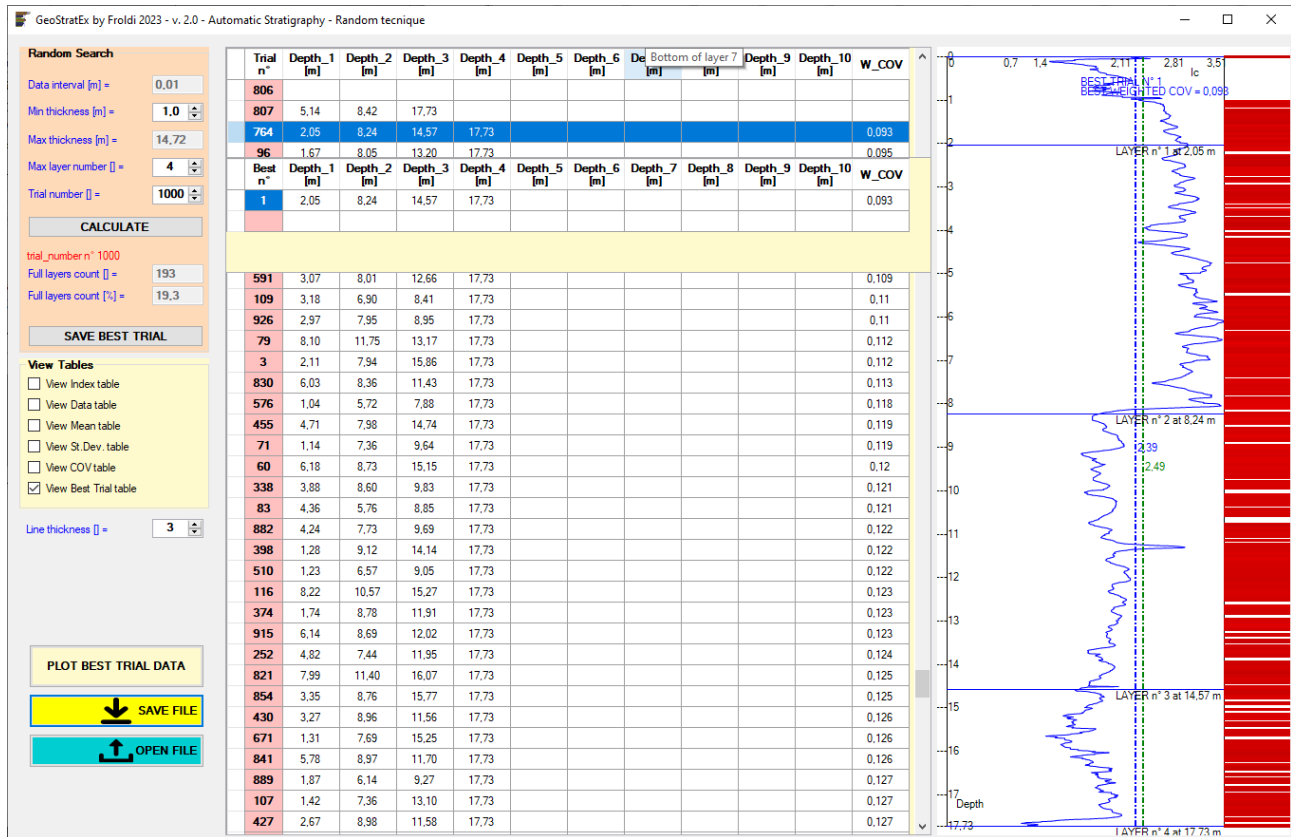
SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE

Codice elaborato: PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A

Titolo elaborato: Relazione geotecnica

pag. 43 / 60

Prova CPTu 4 – RND modello a 4 strati



PNRR - M2C4 Investimento 3.3 - RINATURAZIONE DELL'AREA DEL PO

Progetto di fattibilità tecnico economica

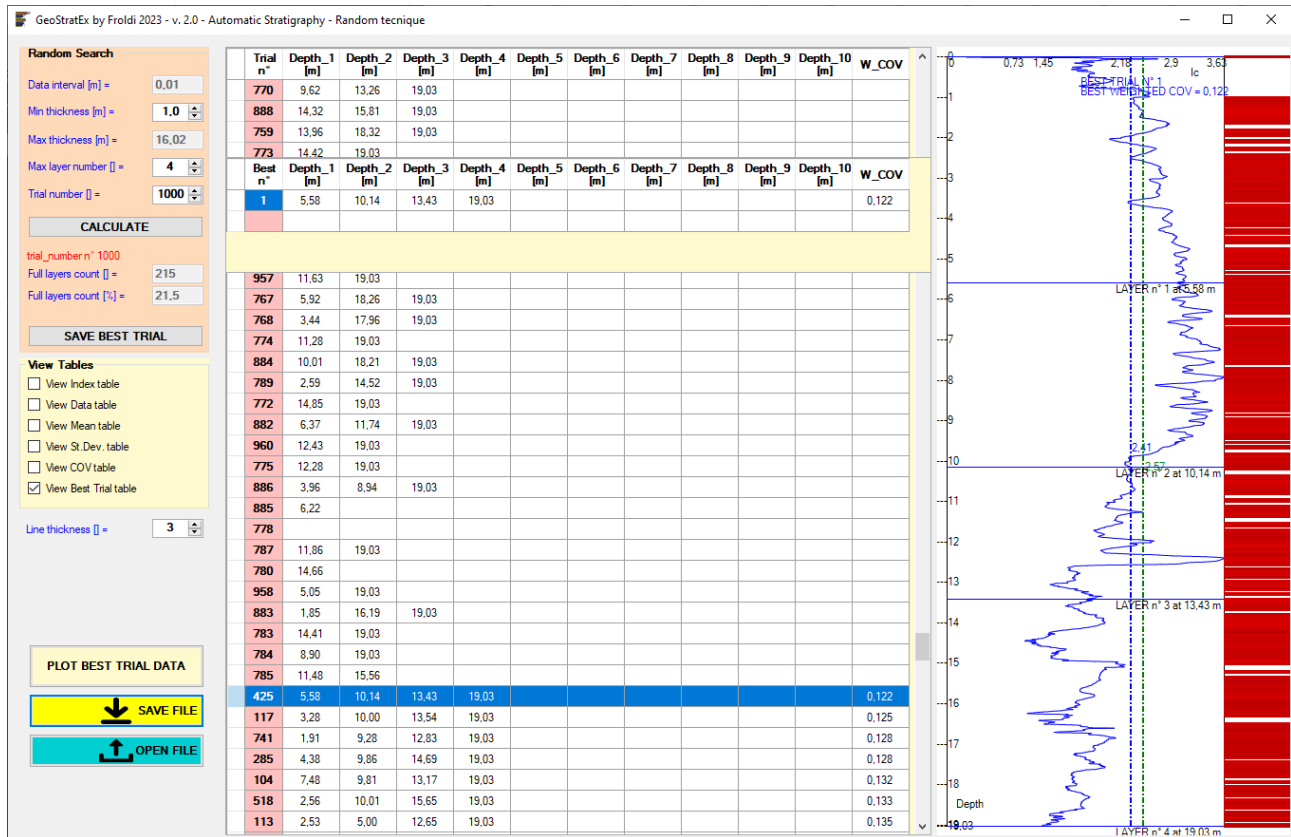
SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE

Codice elaborato: PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A

Titolo elaborato: Relazione geotecnica

pag. 44 / 60

Prova CPTu 5 – RND modello a 4 strati



PNRR - M2C4 Investimento 3.3 - RINATURAZIONE DELL'AREA DEL PO

Progetto di fattibilità tecnico economica

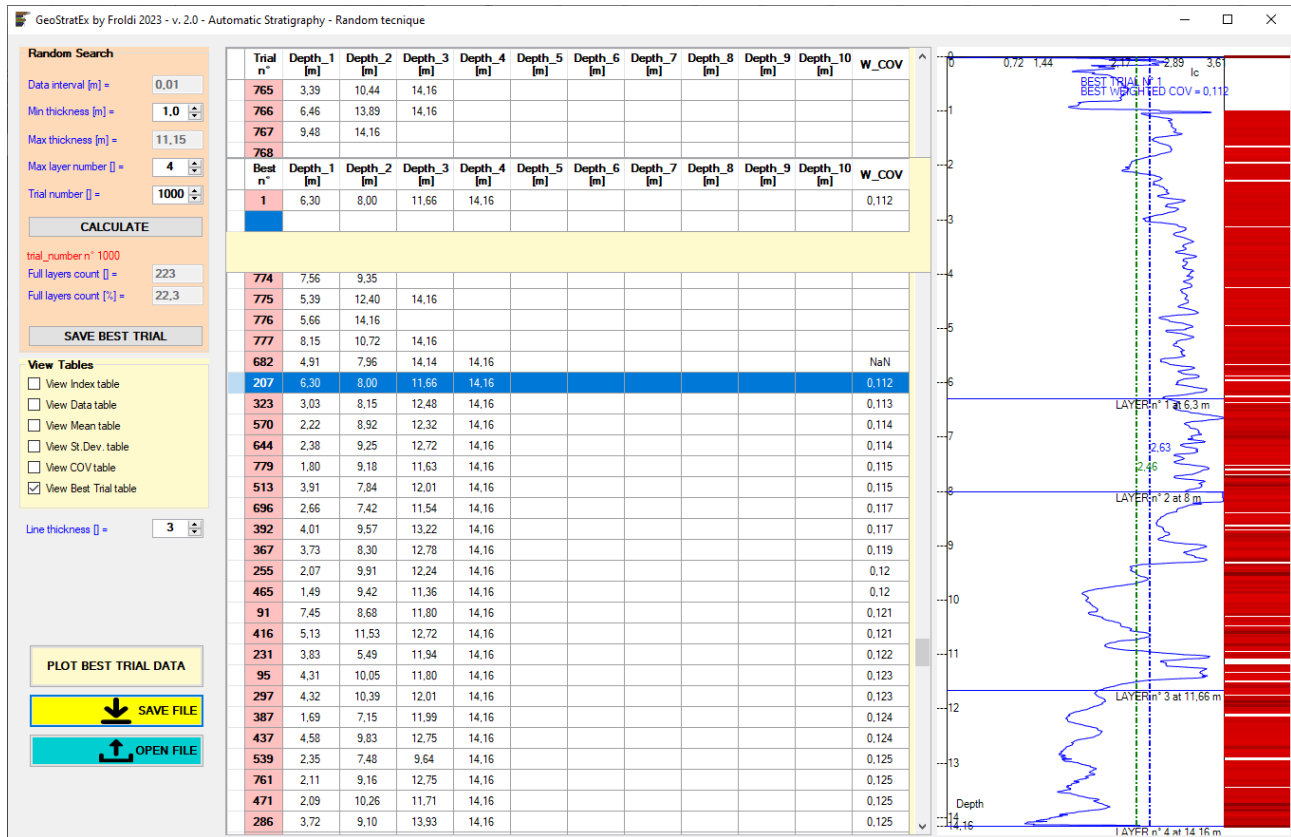
SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE

Codice elaborato: PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A

Titolo elaborato: Relazione geotecnica

pag. 45 / 60

Prova CPTu 6 – RND modello a 4 strati



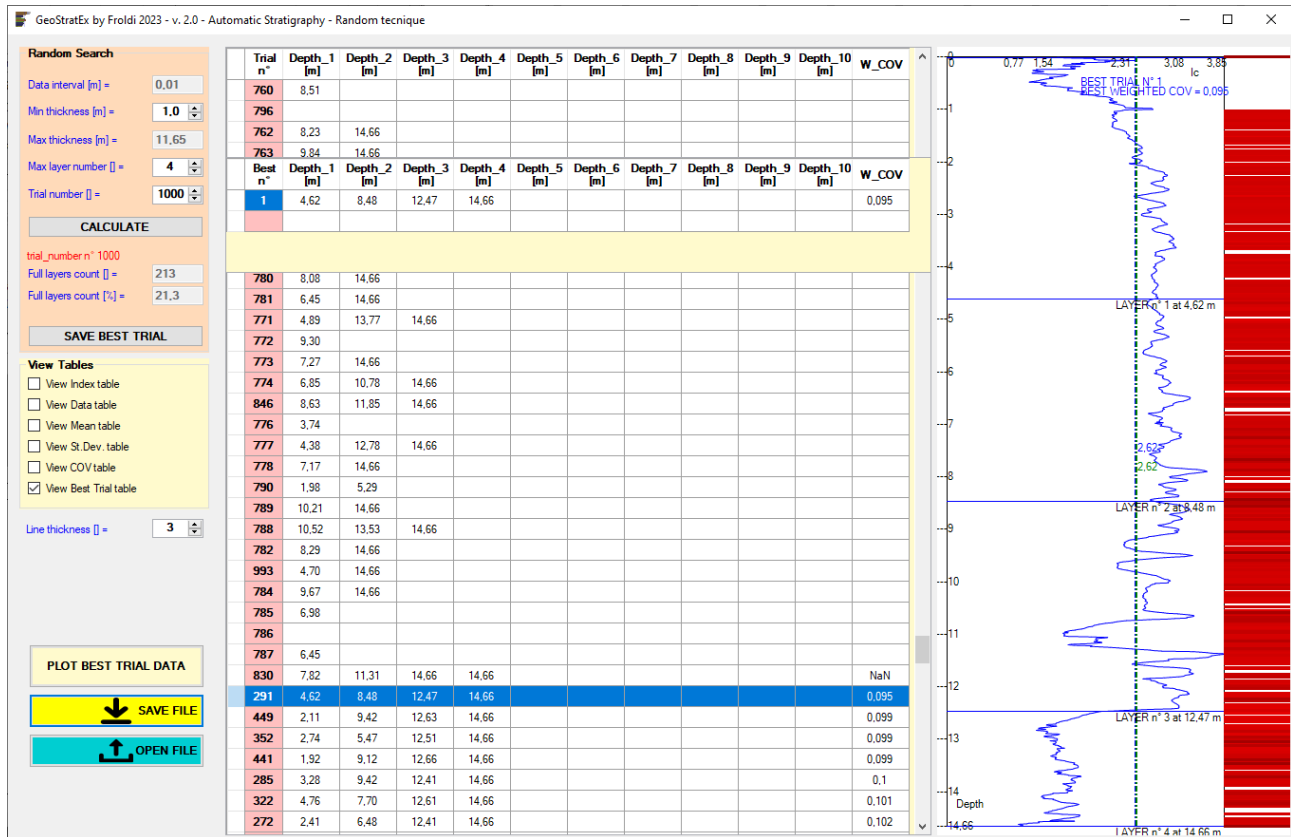
SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE

Codice elaborato: PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A

Titolo elaborato: Relazione geotecnica

pag. 46 / 60

Prova CPTu 7 – RND modello a 4 strati



PNRR - M2C4 Investimento 3.3 - RINATURAZIONE DELL'AREA DEL PO

Progetto di fattibilità tecnico economica

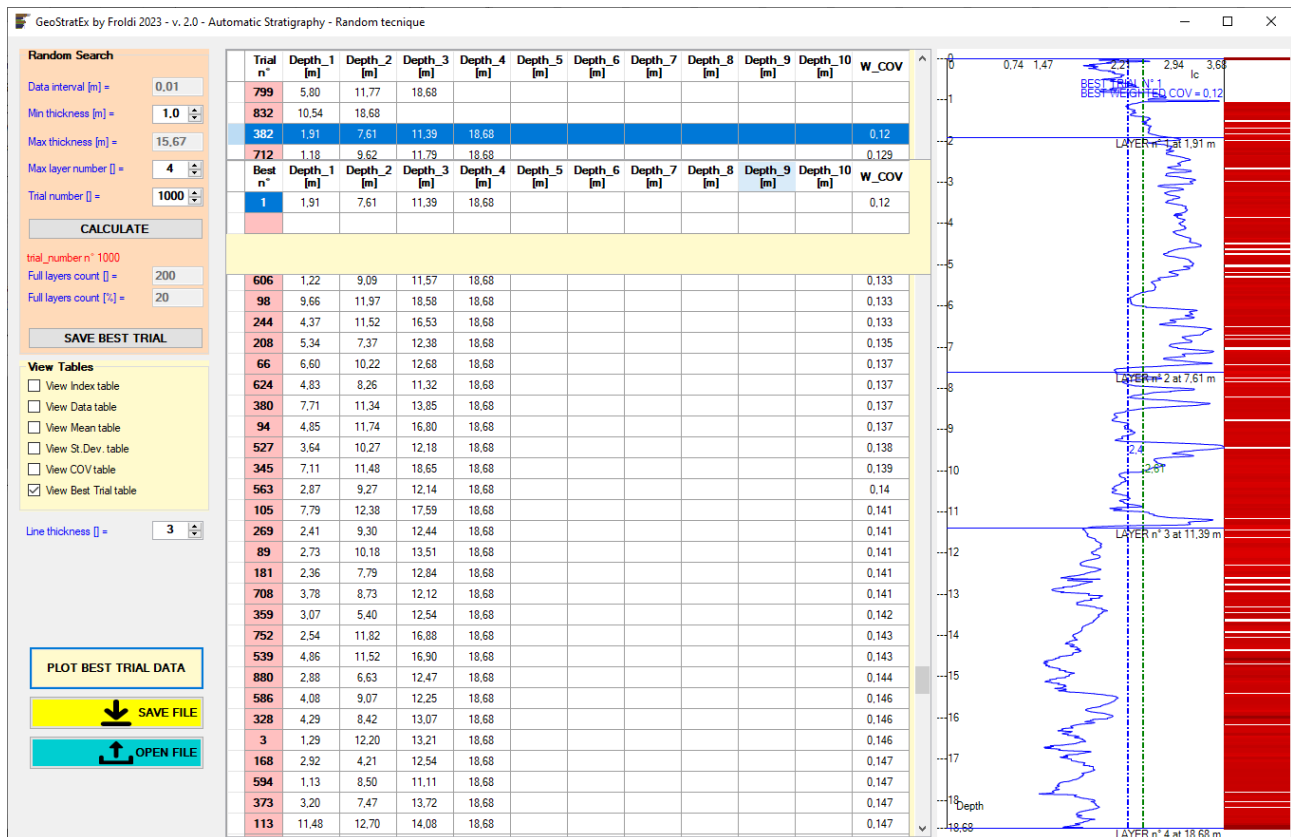
SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE

Codice elaborato: PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A

Titolo elaborato: Relazione geotecnica

pag. 47 / 60

Prova CPTu 8 – RND modello a 4 strati



PNRR - M2C4 Investimento 3.3 - RINATURAZIONE DELL'AREA DEL PO

Progetto di fattibilità tecnico economica

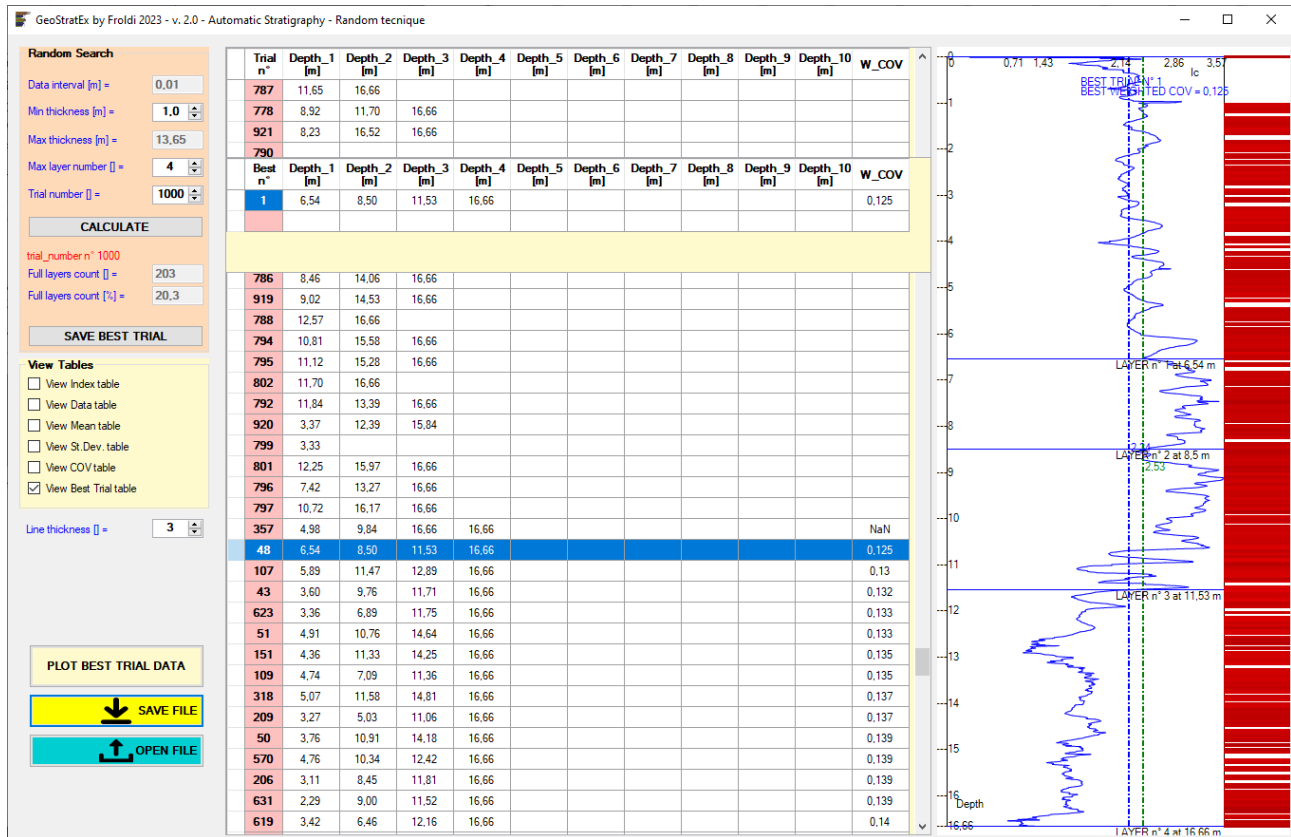
SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE

Codice elaborato: PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A

Titolo elaborato: Relazione geotecnica

pag. 48 / 60

Prova CPTu 9 – RND modello a 4 strati



PNRR - M2C4 Investimento 3.3 - RINATURAZIONE DELL'AREA DEL PO

Progetto di fattibilità tecnico economica

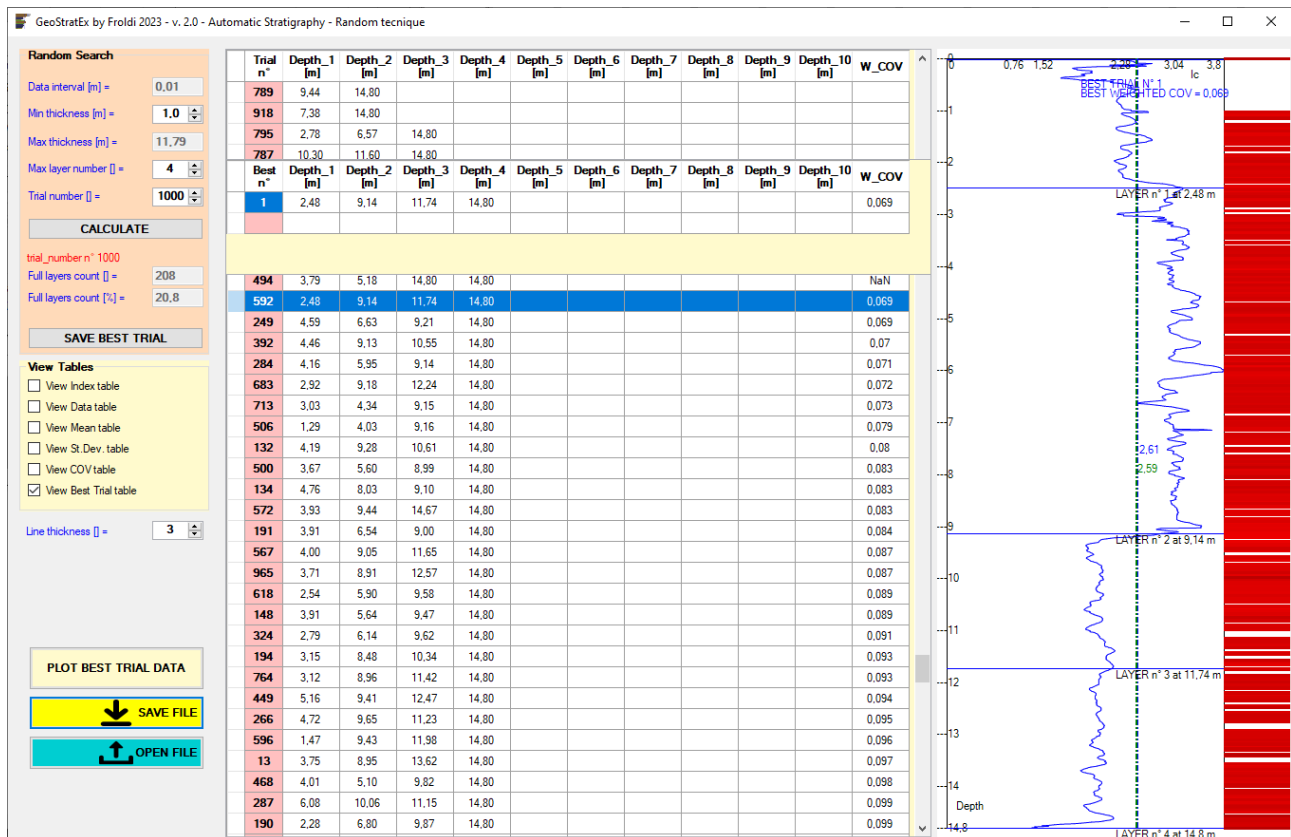
SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE

Codice elaborato: PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A

Titolo elaborato: Relazione geotecnica

pag. 49 / 60

Prova CPTu 10 – RND modello a 4 strati



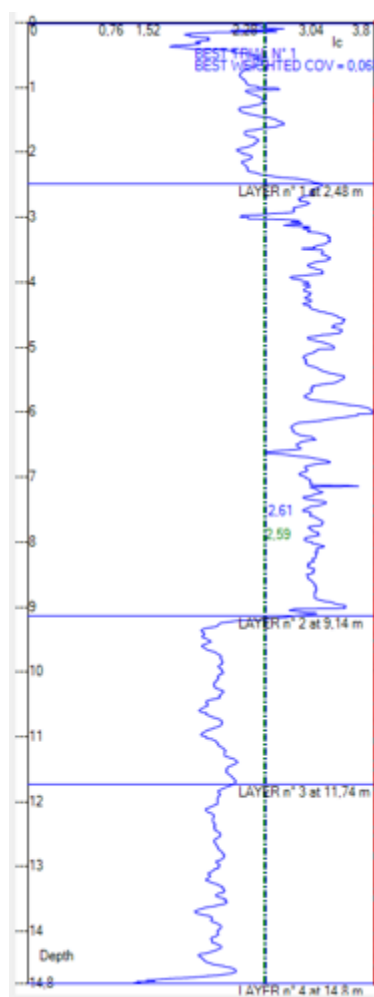
SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE

Codice elaborato: **PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A**

Titolo elaborato: **Relazione geotecnica**

pag. 50 / 60

Modello A (CPTu 10)



Livello	Litologia
1 0÷2,5 m	Da misti sabbiosi a misti limosi: da limi argillosi a argille limose
2 2,5÷9,1 m	Da misti limosi a argille: da argille limose a argille
3 9,1÷11,7 m	Sabbie: da sabbie pulite a sabbie limosi
4 11,7÷14,8 m	Sabbie: da sabbie pulite a sabbie limosi

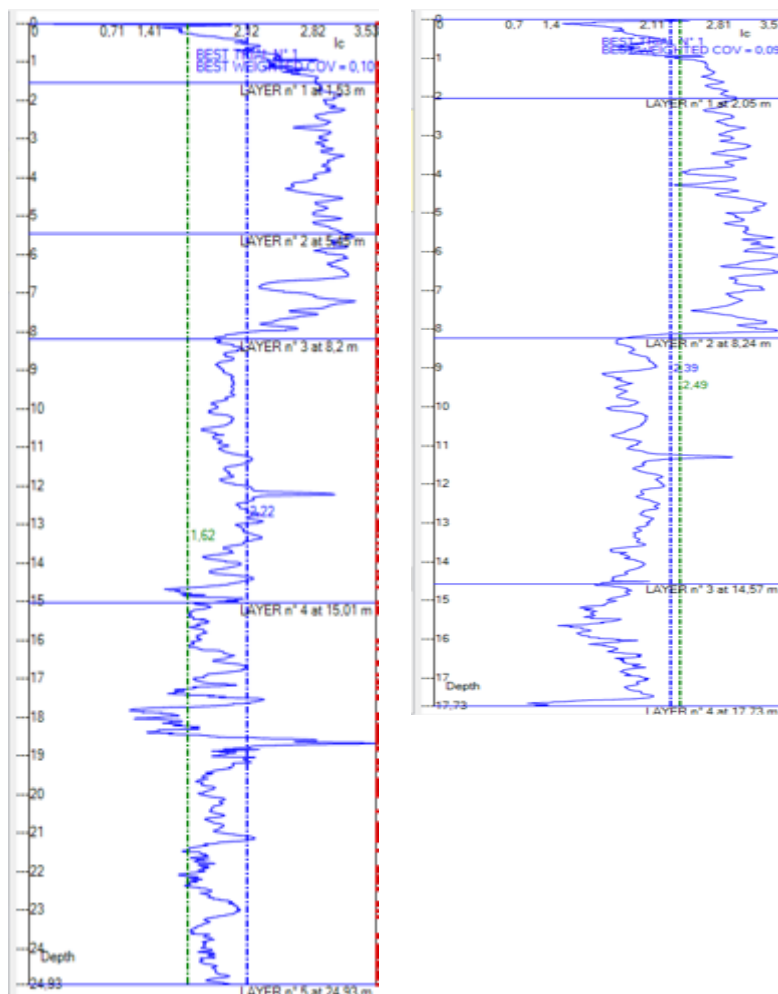
SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE

Codice elaborato: **PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A**

Titolo elaborato: **Relazione geotecnica**

pag. 51 / 60

Modello B (CPTu 3 – CPTu 4)



Livello	Litologia
1 0÷1,8 m	Da misti sabbiosi a misti limosi: da limi argillosi a argille limose
2 1,8÷8,2 m	Misti limosi: da limi argillosi a argille limose
3 8,2÷14,8 m	Sabbie: da sabbie pulite a sabbie limose
4 14,8÷24,9 m	Sabbie: da sabbie pulite a sabbie limose

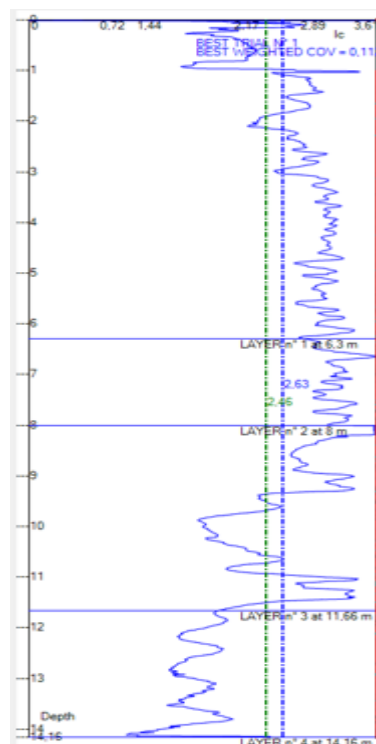
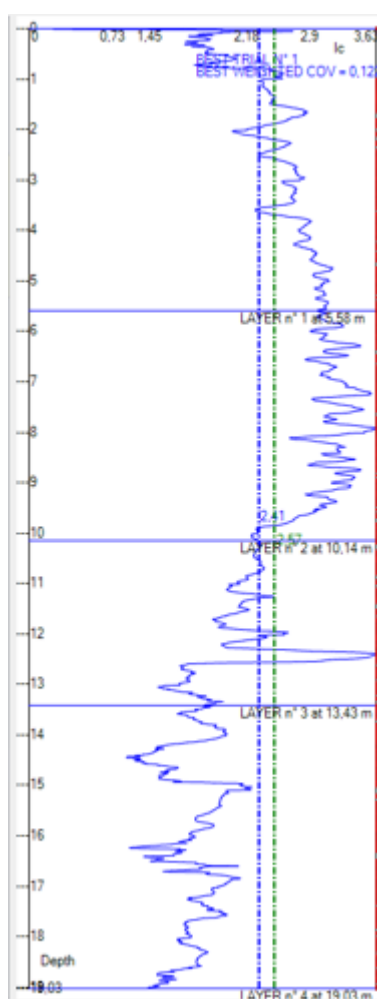
SCHEMA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE

Codice elaborato: PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A

Titolo elaborato: Relazione geotecnica

pag. 52 / 60

Modello C (CPTu 5 – CPTu 6)



Livello	Litologia
1 0÷5,9 m	Da misti sabbiosi a misti limosi: da limi argillosi a argille limose
2 5,9÷9,1 m	Da misti limosi a argille: da argille limose a argille
3 9,1÷12,5 m	Da misti sabbiosi a sabbie: da sabbie pulite a sabbie limose
4 12,5÷19 m	Sabbie: da sabbie pulite a sabbie limose

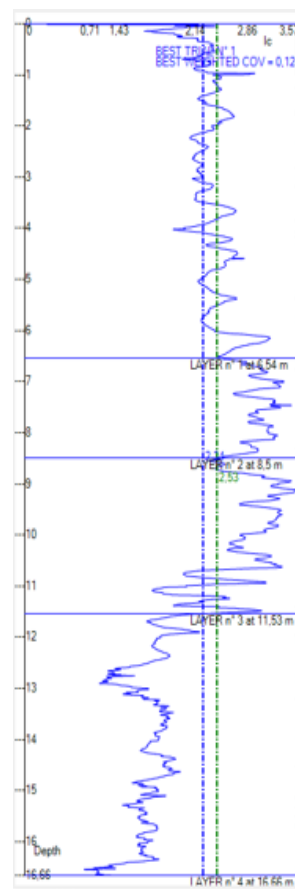
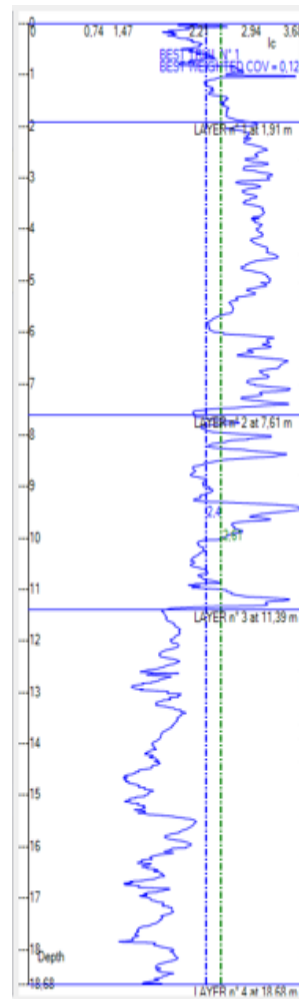
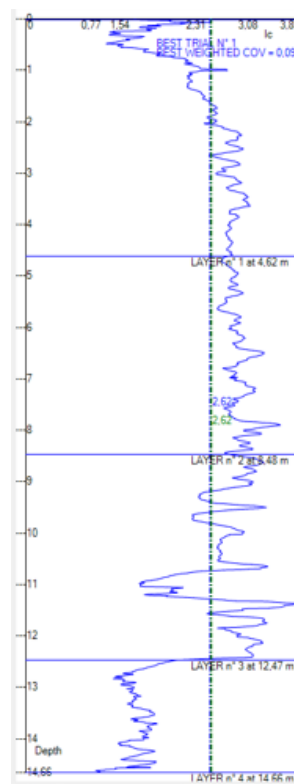
SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE

Codice elaborato: **PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A**

Titolo elaborato: **Relazione geotecnica**

pag. 53 / 60

Modello D (CPTu 7 – CPTu 8 – CPTu 9)



Livello	Litologia
1 0÷5,9 m	Da misti sabbiosi a misti limosi: da limi argillosi a argille limose
2 5,9÷8,5 m	Da misti limosi a argille: da argille limose a argille
3 8,5÷11,8 m	Da misti sabbiosi a sabbie: da sabbie pulite a sabbie limose
4 11,8÷18,7 m	Sabbie: da sabbie pulite a sabbie limose

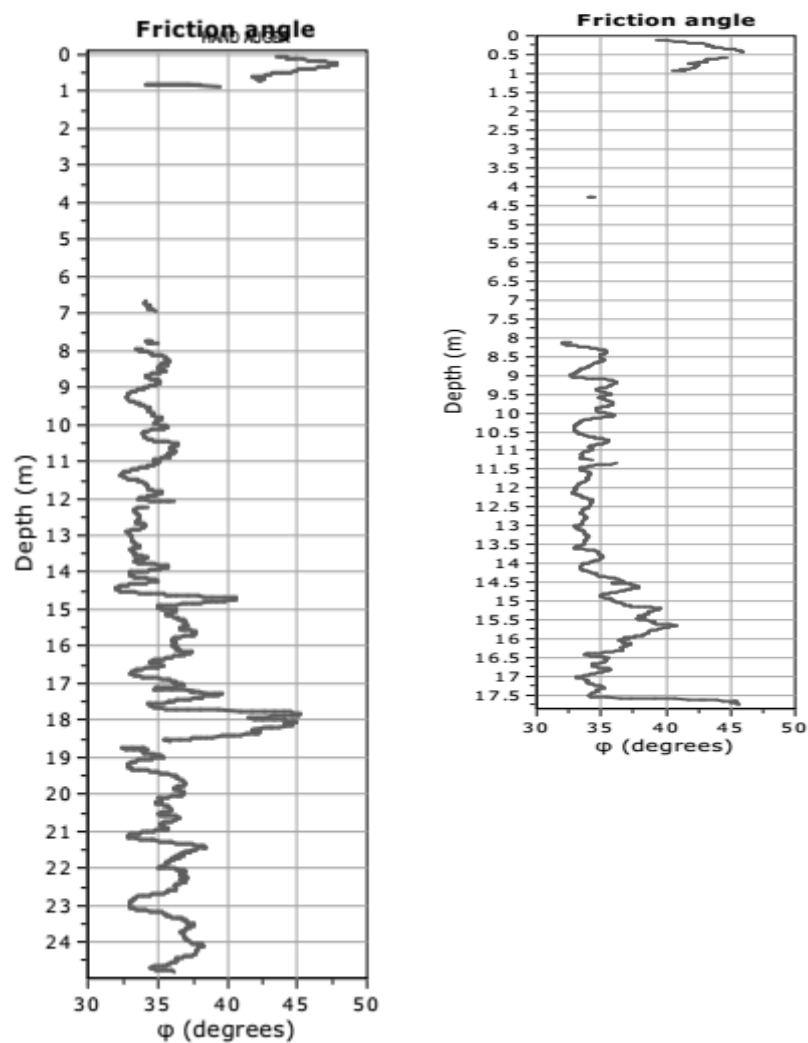
SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE

Codice elaborato: PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A

Titolo elaborato: Relazione geotecnica

pag. 54 / 60

Modello B (CPTu 3 – CPTu 4)

Confronto valori di φ' per la scelta del log di riferimento statistico – scelta: **CPT 3**

SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE

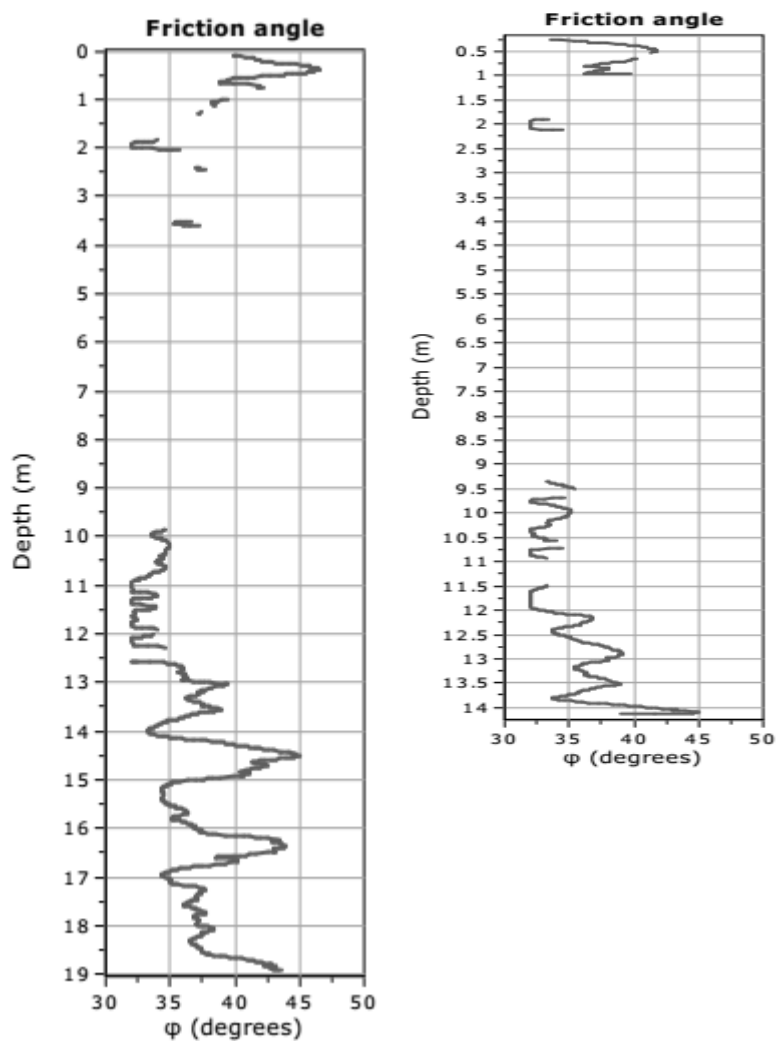
Codice elaborato: **PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A**

Titolo elaborato: **Relazione geotecnica**

pag. 55 / 60

Modello C (CPTu 5 – CPTu 6)

Confronto valori di φ' per la scelta del log di riferimento statistico – scelta: **CPT 5**



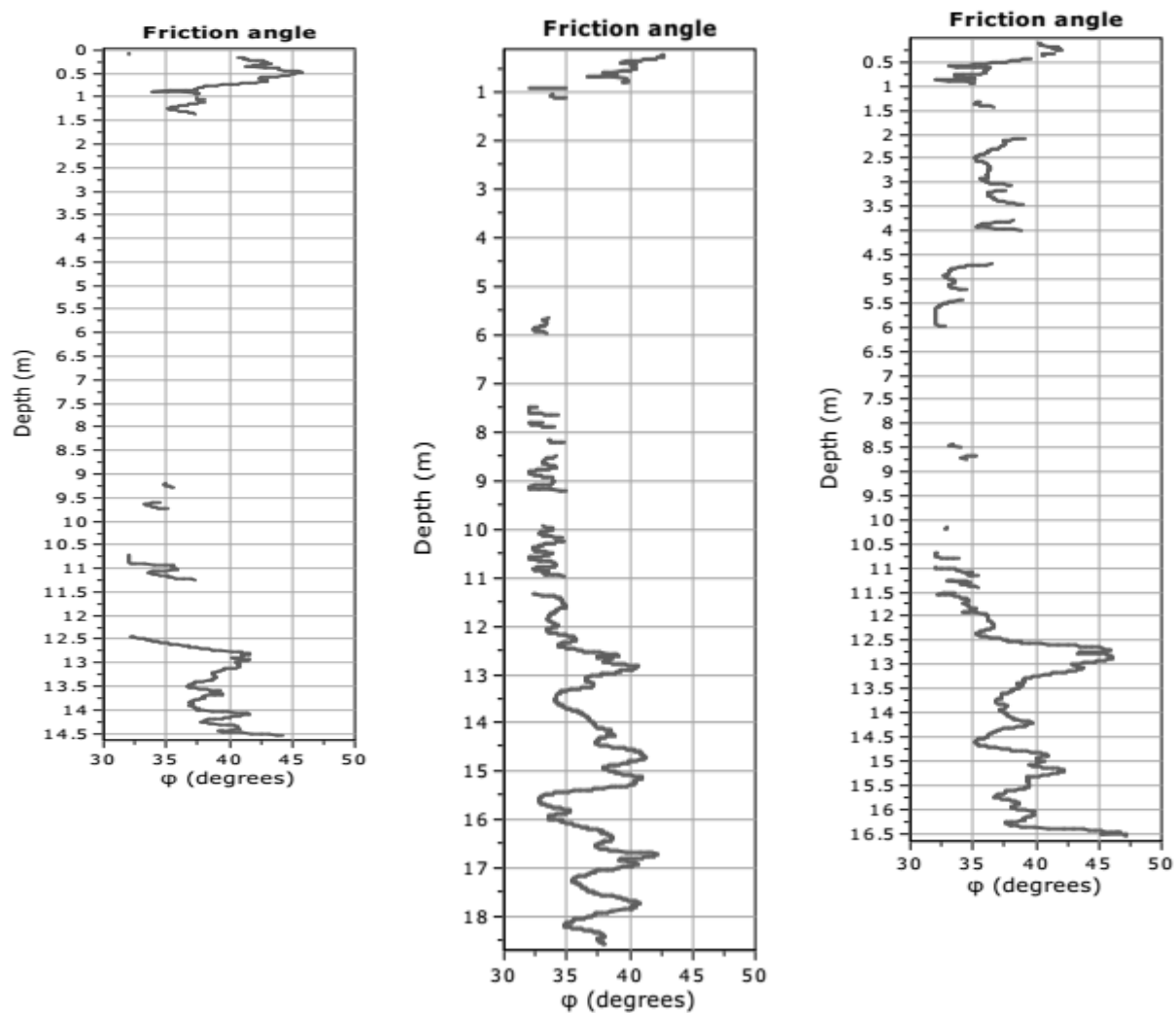
SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE

Codice elaborato: PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A

Titolo elaborato: Relazione geotecnica

pag. 56 / 60

Modello D (CPTu 7 – CPTu 8 – CPTu 9)

Confronto valori di φ' per la scelta del log di riferimento statistico – scelta: **CPT 8**

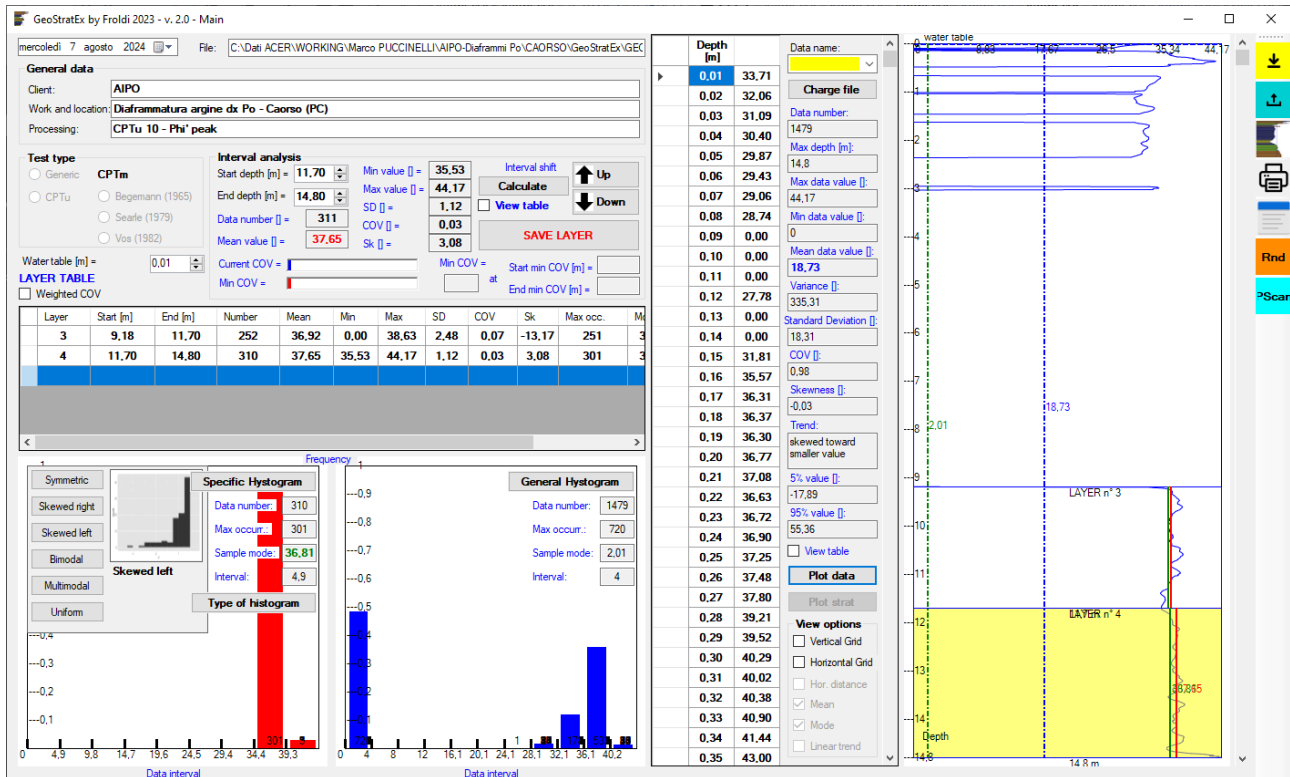
SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE

Codice elaborato: PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A

Titolo elaborato: Relazione geotecnica

pag. 57 / 60

Modello A (CPTu 10)



Layer	Start [m]	End [m]	Number	Mean	Min	Max	SD	COV	Sk	Max occ.	Mode	Type
3	9,18	11,70	252	36,92	0,00	38,63	2,48	0,07	-13,17	251	36,48	Skewed left
4	11,70	14,80	310	37,65	35,53	44,17	1,12	0,03	3,08	301	36,81	Skewed left

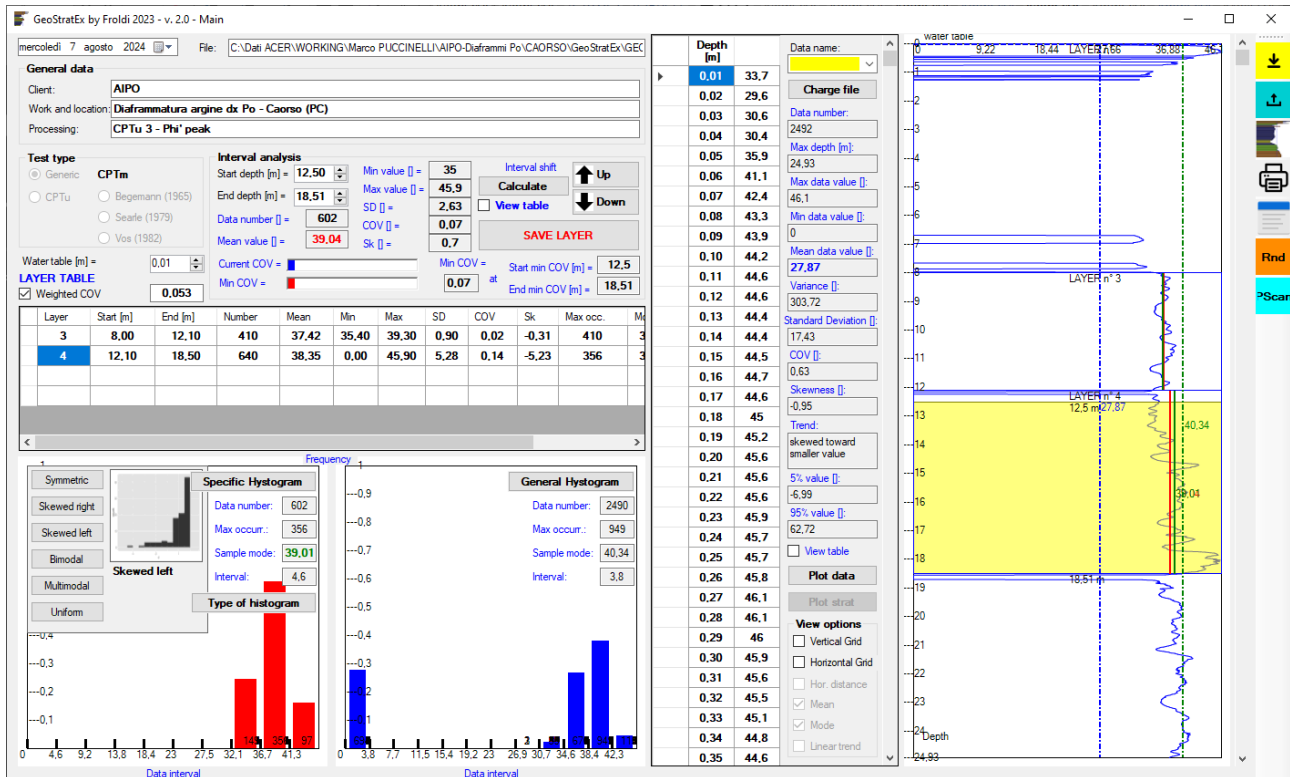
SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE

Codice elaborato: PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A

Titolo elaborato: Relazione geotecnica

pag. 58 / 60

Modello B (CPTu 3 – CPTu 4)



Layer	Start [m]	End [m]	Number	Mean	Min	Max	SD	COV	Sk	Max occ.	Mode	Type
3	8,00	12,10	410	37,42	35,40	39,30	0,90	0,02	-0,31	410	37,33	Skewed left
4	12,10	18,50	640	38,35	0,00	45,90	5,28	0,14	-5,23	356	39,01	Skewed left

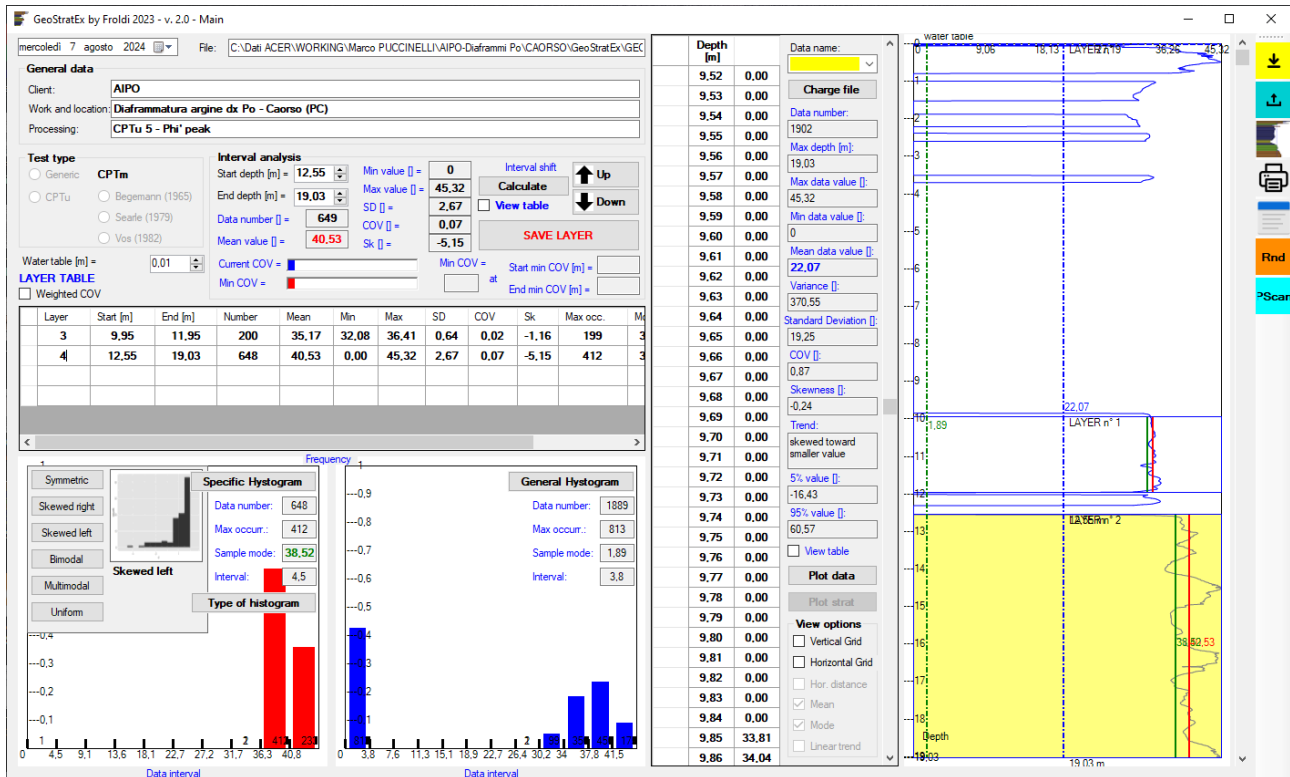
SCHEMA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE

Codice elaborato: PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A

Titolo elaborato: Relazione geotecnica

pag. 59 / 60

Modello C (CPTu 5 – CPTu 6)



Layer	Start [m]	End [m]	Number	Mean	Min	Max	SD	COV	Sk	Max occ.	Mode	Type
3	9,95	11,95	200	35,17	32,08	36,41	0,64	0,02	-1,16	199	34,39	Skewed left
4	12,55	19,03	648	40,53	0,00	45,32	2,67	0,07	-5,15	412	38,52	Skewed left

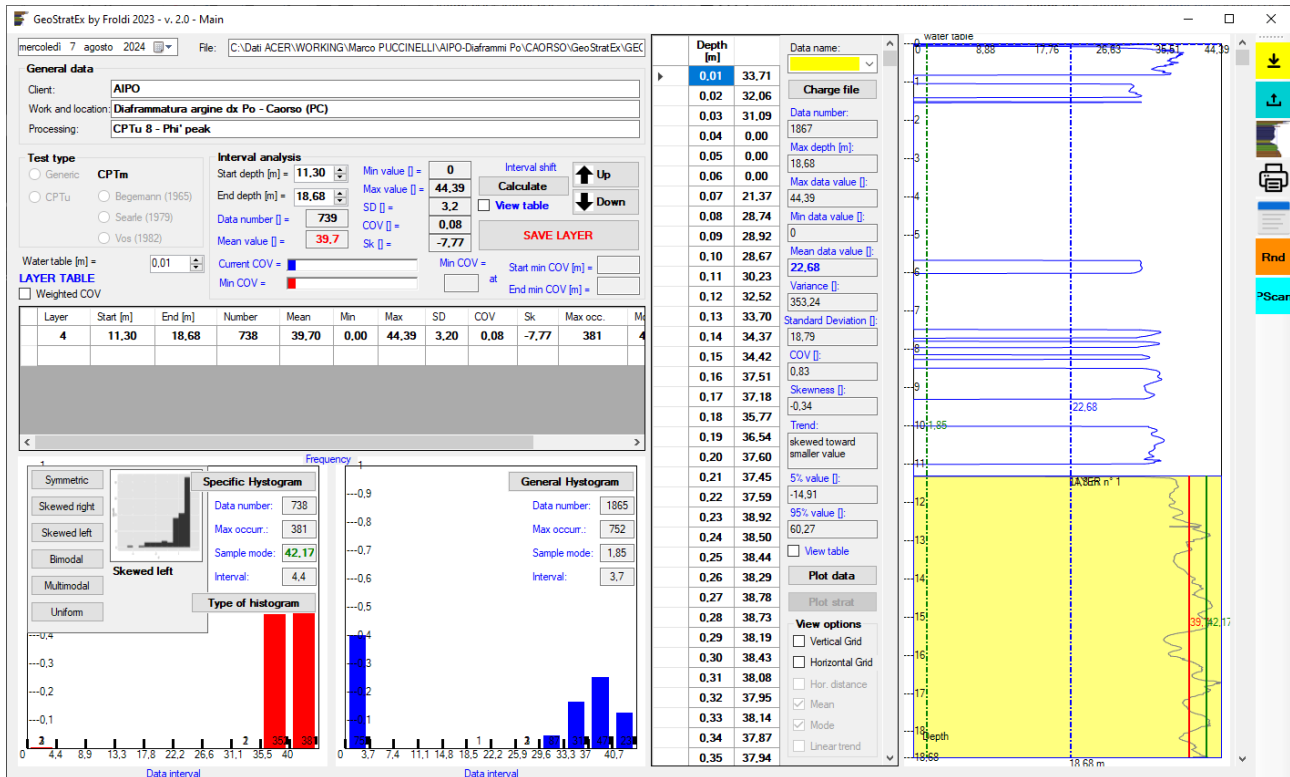
SCHEDA N. 16 CAORSO (PC) – PROGETTO DIAFRAMMATURE

Codice elaborato: PE.0.1.6.GET.GE.R.T.0.0.1.A

Titolo elaborato: Relazione geotecnica

pag. 60 / 60

Modello D (CPTu 7 – CPTu 8 – CPTu 9)



Layer	Start [m]	End [m]	Number	Mean	Min	Max	SD	COV	Sk	Max occ.	Mode	Type
3	10,00	11,00	100	34,01	0,00	36,13	4,91	0,14	-6,85	99	33,87	Skewed left
4	11,30	18,68	738	39,70	0,00	44,39	3,20	0,08	-7,77	381	42,17	Skewed left