

Autorità di Sistema Portuale del Mare Adriatico Meridionale

Porti di Bari, Brindisi, Manfredonia, Barletta, Monopoli

Ufficio di Brindisi



COMPLETAMENTO DELLA INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE
MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE
COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST

PROGETTO DEFINITIVO

RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO:

Ing. F. DI LEVERANO

Progettisti incaricati:

**ACQUA
TECNO**

ACQUATECNO S.r.l.
Via Ajaccio, 14 - ROMA
(Ing. Paolo Turbolente)

MODIMAR

MODIMAR S.r.l.
Via Monte Zebio, 40 - ROMA
(Ing. Paolo Contini)

TITOLO ELABORATO:

RELAZIONE GEOTECNICA

ELABORATO N° :

B.04 02

CODICE ELABORATO:

09-017-DR-005-2-GEO

		ELABORATO	CONTROLLATO	APPROVATO		
SIGLA						
REVISIONE	N.	DATA	DESCRIZIONE	RED.	VER.	APP.
	1	Luglio 2017	NOTA CONSIGLIO SUPERIORE LL.PP.			
	2	Ottobre 2021	MITE - DECRETO VIA DM n° 254/2021			

DATA:

Ottobre 2021

SCALA :

Autorità di Sistema Portuale del Mare Adriatico Meridionale

Porti di Bari, Brindisi, Manfredonia, Barletta, Monopoli

Ufficio di Brindisi

**LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE
PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA
RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E
COSTA MORENA EST**

PROGETTO DEFINITIVO

Relazione geotecnica

PROGETTAZIONE:



MODIMAR S.r.l.

VIA MONTE ZEBIO, 40 ROMA



ACQUA TECNO S.r.l.

VIA AJACCIO, 14 ROMA

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica					
		09	017	DR	005	2	GEO

Indice

Capitolo 1	Premesse	2
Capitolo 2	Inquadramento geologico generale	3
	2.1 Assetto geologico-stratigrafico	4
Capitolo 3	Modellazione geotecnica	8
	3.1 Successione stratigrafica.....	12
	3.2 Sabbie con noduli calcarenitici (Panchina - Formazione Gallipoli) - Unità B	15
	3.3 Limi sabbiosi e sabbie limose argillose grigio azzurre (Formazione Gallipoli) - Unità C1	16
	3.4 Argille limoso sabbiose grigio azzurre (Formazione Gallipoli) - Livello C2.....	16
Capitolo 4	Caratteristiche geotecniche dei terreni di fondazione	17
	4.1 Sezione stratigrafiche per il dimensionamento della paratia	19
	4.2 Parametri geotecnici caratteristici.....	20
Capitolo 5	Caratterizzazione dei sedimenti.....	22
	5.1 Caratterizzazione dei sedimenti.....	22
Capitolo 6	Calcolo dei cedimenti della colmata	25
	6.1 Zone di calcolo di riferimento	25
	6.2 Descrizione del codice di calcolo	26
	6.3 Modelli di calcolo.....	31
	6.4 Fasi di calcolo	33
	6.5 Risultati delle analisi.....	35
	6.6 Riepilogo dei risultati attesi	41
Capitolo 7	Tenuta idraulica della vasca.....	42
	7.1 Prove CPTU	42
	7.2 Prove edometriche.....	43
Capitolo 8	Verifiche di stabilità dell'argine nuovo canale	45
	8.1 Stratigrafia di calcolo e parametri geotecnici di modello.....	46
	8.2 Criteri di verifica	47
	8.3 calcolo e verifica della sezione di progetto	49
Capitolo 9	Verifiche di stabilità del versante in prossimità dell'area P.G.3	55
	9.1 Stratigrafia di calcolo e parametri geotecnici di modello.....	58
	9.2 Criteri di verifica	60
	9.3 calcolo e verifica della sezione di progetto	62
Capitolo 10	CONCLUSIONI.....	71

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	<u>Ufficio di BRINDISI</u> LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica					
		09	017	DR	005	2	GEO

Capitolo 1 Premesse

La presente relazione è redatta ai sensi dell'art.23 del D.Lg.vo n. 50 del 18 Aprile 2016, degli artt.24 e 26 comma1.d del DPR n.207 del 5 ottobre 2010 e ss.mm.ii. ed ai sensi delle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018) del 17/1/2018 e della relativa Circolare Applicativa (21/1/2019), affronta i seguenti aspetti:

- inquadramento geologico, geomorfologico, ed idrogeologico generale;
- descrizione delle indagini geofisiche e dei modelli interpretativi utilizzati
- Caratteristiche geotecniche dei terreni.
- Cedimenti attesi sulla colmata
- Tenuta idraulica della conterminazione della vasca

Gli aspetti relativi alle caratteristiche le caratteristiche geologiche, geomorfologiche, sismiche del terreno di intervento sono descritte più dettagliatamente nella Relazione Geologica.

Il progetto riguarda la realizzazione di una vasca di contenimento, costituita da un perimetro di paratia combinata palo-palancola e palancole, diaframma plastico di calcestruzzo (lato costa), argine con palancolato metallico (lato canale) profondi 27,00 metri dal livello del mare.

La relazione è oggetto della presente revisione a seguito della modifica geometrica della vasca, dell'aggiornamento della normativa tecnica nazionale vigente (NTC2018) e a seguito dei risultati di indagini geotecniche integrative svolte all'interno dell'area della futura vasca.

Le indagini geotecniche integrative hanno confermato l'assetto stratigrafico e le caratteristiche geomeccaniche dei terreni di fondazione rispetto a quanto assunto nella precedente versione del progetto;

Le nuove indagini hanno evidenziato inoltre come lo strato impermeabile di Argille Calabriane (unità C2) si intesti su profondità comprese tra -22.0 e -23.0 m s.l.m. confermando la bontà dell'assunzione cautelativa di fissare la quota massima di sommità dello strato impermeabile alla profondità di -25.0 m s.l.m. come la massima verificabile nel sito in cui si realizzerà la vasca.

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica				
		09	017	DR	005	2

Capitolo 2 Inquadramento geologico generale

Nel presente capitolo sono riportati i principali caratteri, geologici, geomorfologici generali dell'area di Brindisi dove è localizzato l'intervento di progetto, con particolare attenzione agli aspetti che consentono la definizione dei parametri geotecnici; si rimanda alla relazione Geologica per maggiori approfondimenti.

Il porto di Brindisi è posto tra l'altopiano delle Murge e la penisola salentina ed è caratterizzata da una serie di "horst" e "graben", di varie dimensioni, generalmente orientati in direzione appenninica, nord ovest - sud est e legati alla tettonica distensiva sopra descritta.

La differenza degli orientamenti strutturali tra la zona delle Murge e la penisola salentina ha fatto ipotizzare una rotazione della zona salentina di circa 25° in direzione oraria, con una certa componente trascorrente e conseguente apertura di una fascia compresa tra Brindisi e Taranto che avrebbe permesso la deposizione di sedimenti argillosi (figura 2.1)

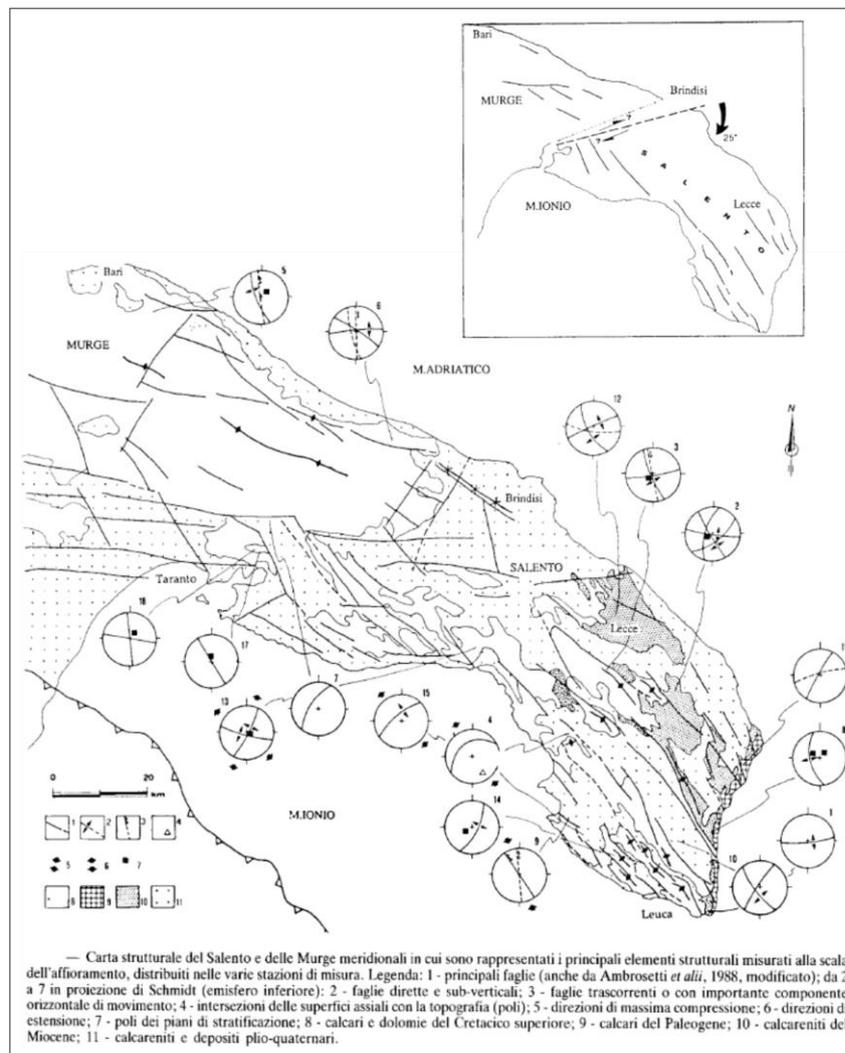


figura 2.1 - carta geologico strutturale Puglia (da: Tozzi, 1993)

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica					
		09	017	DR	005	2	GEO

Dal punto di vista stratigrafico, l'area in esame consiste, in massima parte, di una serie carbonatico-dolomitica mesozoica di circa 6000 metri di spessore, poggiate sul basamento paleozoico indisturbato. Sopra il potente complesso calcareo mesozoico, vi sono i depositi del ciclo sedimentario plio-pleistocenico della Fossa Bradanica coperti, in trasgressione, da depositi bioclastici terrazzati di ambiente litorale e continentali, olocenici ed attuali (figura 2.2).

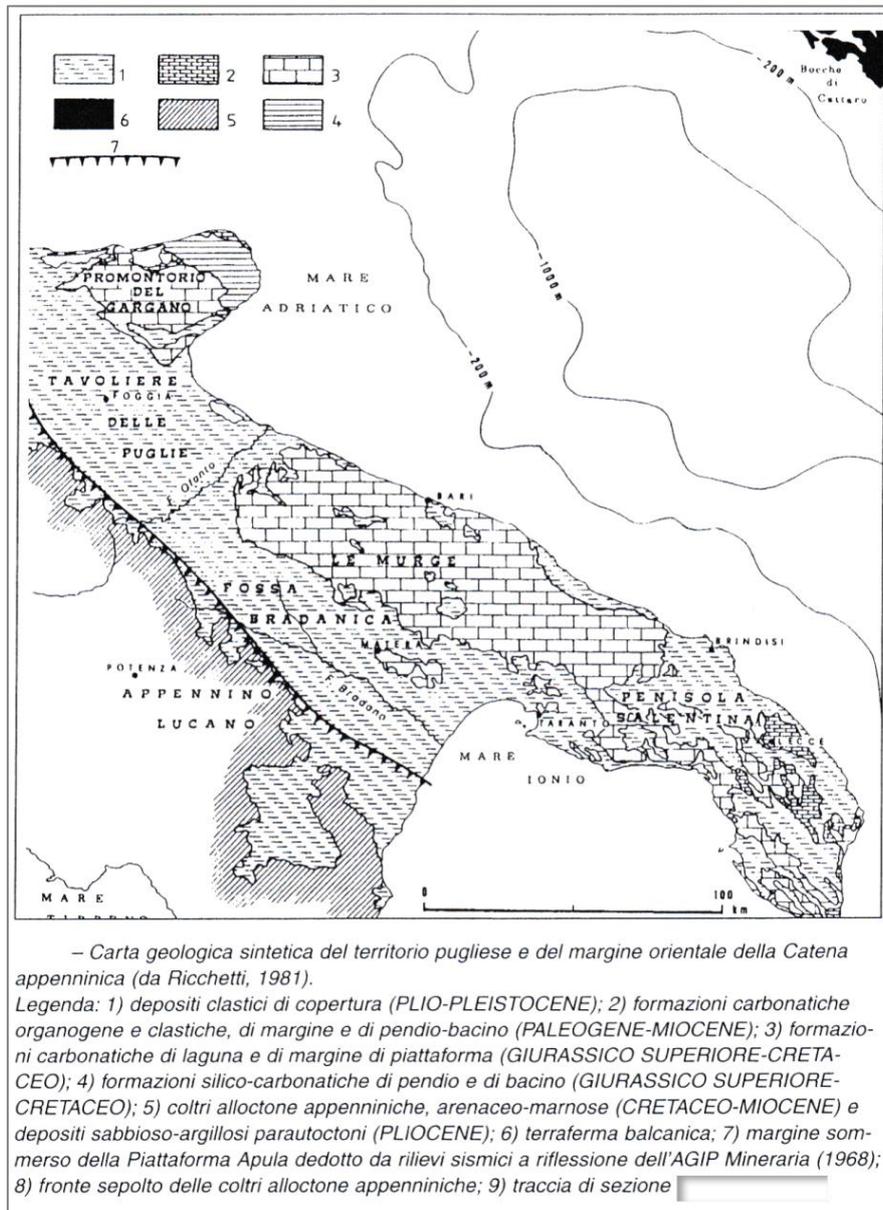


figura 2.2 - carta geologica generale Puglia (da: guida geologica Puglia e Monte Vulture

2.1 Assetto geologico-stratigrafico

Dal punto di vista geologico, la zona di Brindisi è stata interessata, a partire dal Mesozoico ed in particolare dal Giurassico (220-160 Ma) dalla presenza di un mare epicontinentale sul quale si instaurò un basso fondale, costellato di piccoli bacini evaporitici.

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica					
		09	017	DR	005	2	GEO

I terreni deposti in questo ambiente sono costituiti da calcari e calcari dolomitici che danno vita all'impalcatura geologica della penisola salentina e sono il risultato dell'evoluzione della piattaforma carbonatica apula.

Durante la sedimentazione vi furono numerose oscillazioni del livello marino con cicli regressivi e trasgressivi e brevi emersioni, testimoniate da lacune stratigrafiche e tipici depositi continentali (terre rosse argillose e bauxiti).

In trasgressione sulle formazioni carbonatiche cretacee, si sovrappongono sedimenti marini pliocenici e quaternari, spesso rappresentati da tufi (Calcari di Gravina e Depositi Marini Terrazzati); si tratta di depositi marini spesso caratterizzati da un'alternanza di gradini e terrazzi digradanti verso mare, testimoni di antiche linee di costa e di superfici di abrasione.

Infine, lungo alcuni tratti di costa, si hanno depositi continentali di natura alluvionale, fluvio lacustri e palustri, composti di sabbie, sabbie argille sabbiose e limi e depositi dunari.

In sintesi, le formazioni affioranti all'interno della provincia di Brindisi, facendo riferimento alle "Note alla Carta Geologica delle Murge e del Salento" di Ciaranfi et alii (1992), procedendo dal basso verso l'alto, sono distinti in due macro gruppi: Depositi Marini, più antichi e Depositi Continentali, più recenti, così suddivisi:

- DEPOSITI MARINI
 - Calcari d'Altamura (Cretaceo sup.)
 - Calcareni di Gravina (Pliocene sup. – Pleistocene inf.)
 - Argille subappenniniche (Pleistocene inf.)
 - Depositi marini terrazzati (Pleistocene medio – sup.)
- DEPOSITI CONTINENTALI
 - Depositi alluvionali ed eluvio-colluviali (Olocene)

In particolare, nell'area in esame, gli affioramenti sono costituiti esclusivamente da:

- Depositi Marini Terrazzati (Q1s e Q1c) (formazione di Gallipoli)
- Depositi Alluvionali (S e de), come indicato nella Carta Geologica d'Italia F° 204 – Lecce (figura 2.3).

Nei depositi marini terrazzati, con spessore locale di alcune decine di metri, è compreso un basamento marnoso argilloso, limo argilloso e sabbio limoso, di età pleistocenica.

Le argille marnose sono di colore grigio azzurrognolo, generalmente plastiche e poco stratificate, con percentuali variabili di quarzo a spigoli vivi.

Verso l'alto, la componente marnoso argillosa diminuisce e si passa gradualmente a limi argillosi e sabbiosi, fino a vere e proprie sabbie grigio - giallastre, aventi ancora un certo contenuto di argilla.

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica				
		09	017	DR	005	2

Sopra questo banco più fine si ritrovano sabbie argillose e limose di colore giallo rossastro, con intercalati banchi arenacei e calcarenitici ben cementati, **tipo "Panchina"**, con inclusione di ciottoli calcarei e calcarenitici.

Le sabbie sono costituite prevalentemente da frammenti di quarzo con grana da media a fine e si presentano stratificate e talora debolmente cementate in strati centimetrici.

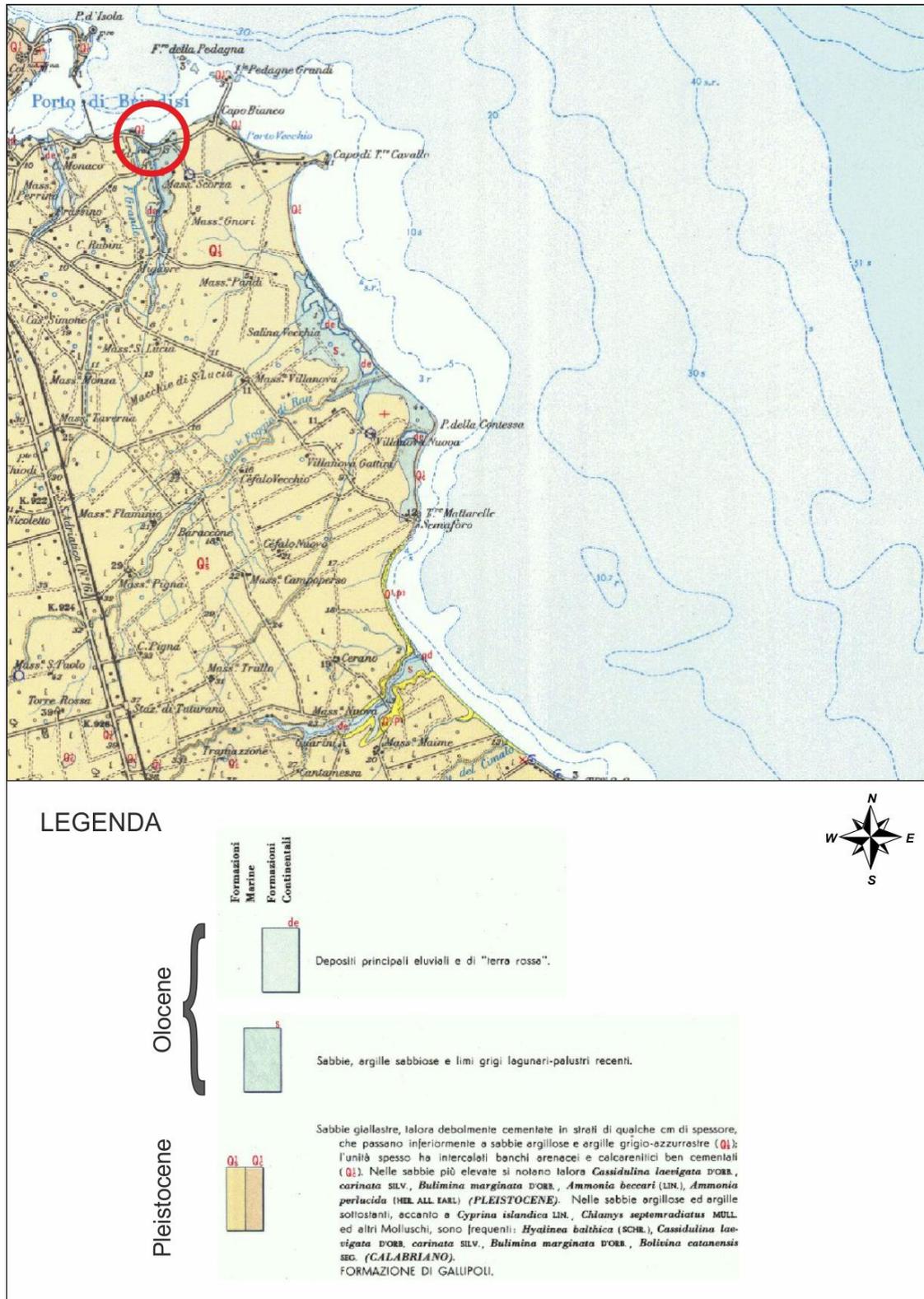


figura 2.3 - stralcio F°204 Lecce Carta Geologica d'Italia f.s.

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	<u>Ufficio di BRINDISI</u> LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica					
		09	017	DR	005	2	GEO

In ultimo, la formazione di Gallipoli, è composta da miscele di residui organici, sabbie e ciottoli, prodotti dall'erosione costiera dovuta all'azione del mare ed all'erosione delle valli dei diversi corsi d'acqua che sfociano lungo la costa.

I sondaggi eseguiti nelle aree limitrofe hanno attraversato i litotipi sopra descritti, relativi alla formazione di Gallipoli ed in alcuni casi hanno intercettato, il substrato calcareo mesozoico:

- sabbie con concrezioni calcarenitiche;
- limi sabbiosi e sabbie limose grigio azzurre;
- argille limoso sabbiose entrambi appartenenti all'unità litologica delle argille grigio azzurre di base;

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica					
		09	017	DR	005	2	GEO

Capitolo 3 Modellazione geotecnica

Il modello litostratigrafico del sito ed il modello geotecnico sono stati ricostruiti mediante l'analisi comparata dei risultati delle indagini geognostiche di dettaglio eseguite in siti limitrofi e confermate dalle indagini integrative (2019) con le informazioni desunte dalla campagna geofisica, eseguita dalla soc. Geoprosys (2015) nell'area dove sorgerà la vasca, per conto della ex Autorità Portuale di Brindisi.

In particolare, durante l'indagine geofisica sono stati eseguiti 24 rilievi sismici marini di cui quattro lunghi 1100 m, orientati in direzione NO-SE, con interasse di 50 metri (figura 3.1).

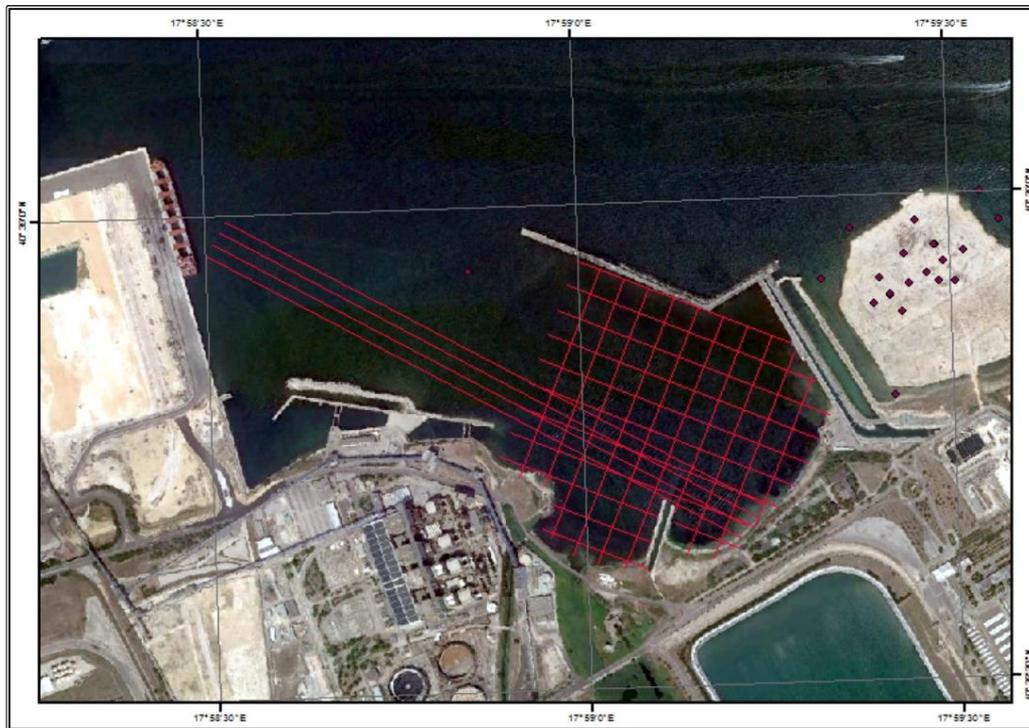


figura 3.1 - tracce rilievi sismici Geoprosys 2015 (da: google earth)

In generale, in gran parte dell'area, si è rilevata una scarsa penetrazione del segnale sismico a causa dei materiali che occupano la porzione più superficiale del fondo marino, costituito da sedimenti medio fini, compatti; dove invece questi sono risultati più sciolti, la penetrazione del segnale sismico è risultata migliore.

Le indagini in mare hanno permesso comunque di individuare le "Unità sismiche" correlabili a litotipi geologici noti nell'area. Questi sono stati sintetizzati in 5 sezioni stratigrafiche dedotte dai rilievi geofisici riportate in figura 3.2.

Le sezioni mostrano tre unità: **l'unità A (depositi marini recenti)**, riconducibile ad una coltre di sedimenti medio-fini (sabbie fini variamente limose ed argillose) dense o molto dense. Questi terreni hanno spessori variabili, da 2 metri a circa 6 metri; questo strato è assente in prossimità dell'opera di scarico della industria Polimeri molto probabilmente a causa di effetti idrodinamici indotti da essa.

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI	Relazione geotecnica				
	LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	09	017	DR	005	2

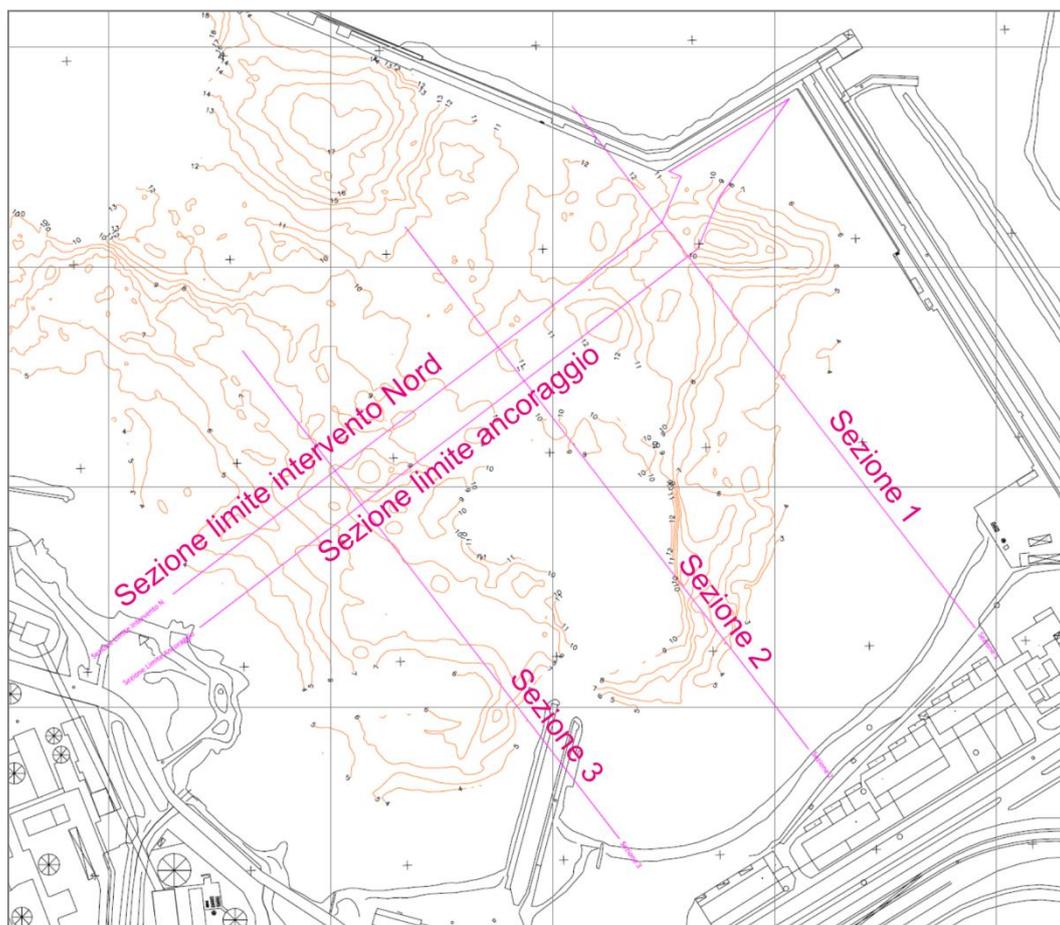


figura 3.2 - tracce sezioni sismiche Geoprosys 2015 f.s. e definizione del tetto "della panchina"

L'unità B (panchina) è assimilabile ad un deposito marino sabbioso grossolano, denso, a tratti caotico e cementato; la potenza è anche in questo caso variabile da 1-2 metri sino a circa 12 metri, con valori medi intorno ai 5-6 metri; anche l'unità B è assente di fronte al canale di scarico Polimeri.

L'unità C (facies limoso argillosa di Gallipoli) è alla base della serie stratigrafica rilevata dalla geofisica; data la scarsa penetrazione del segnale, tale unità sembra essere riconducibile ad un substrato argilloso.

In generale queste unità litostratigrafiche hanno una giacitura sub orizzontale, con una leggerissima inclinazione verso NE, con leggere variazioni negli spessori; di seguito vengono descritte, in dettaglio, le sezioni litostratigrafiche ricostruite dalle indagini geofisiche.

La sezione 1 riguarda il lato nord orientale dell'opera e mostra le prime due unità, dove è visibile lo spessore della prima (depositi marini recenti) variabile tra i 3 – 5 metri, sovrastante la seconda unità (panchina) (figura 3.3)

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica				
		09	017	DR	005	2

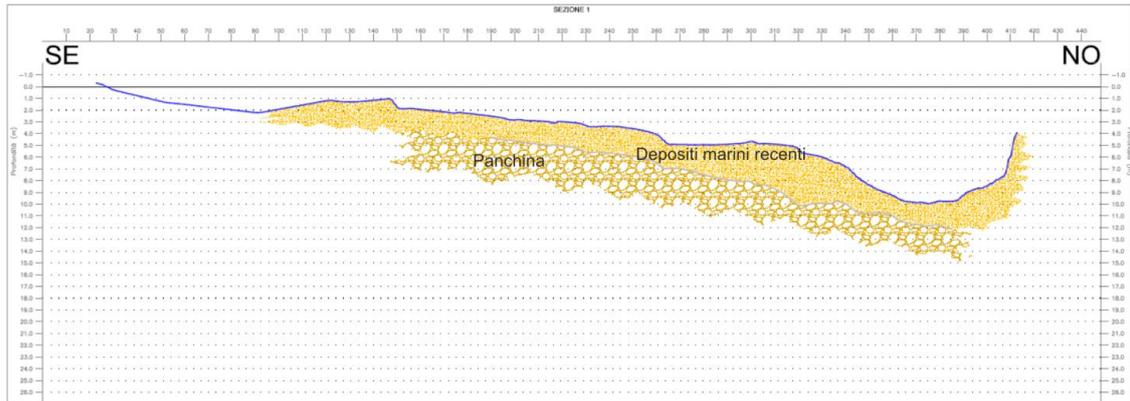


figura 3.3 -- sezione sismica 1

La sezione 2, nella zona centrale, evidenzia una copertura di depositi marini recenti, di potenza tra i 3 – 4 metri, che si assottiglia fino a scomparire nella depressione morfologica antistante lo scarico Polimeri e sovrasta la panchina e che ha una potenza media di 3 metri la quale raggiunge i 6 metri verso la costa. Sul lato NO è stata rilevata alla base l'unità argillosa di Gallipoli (figura 3.4).

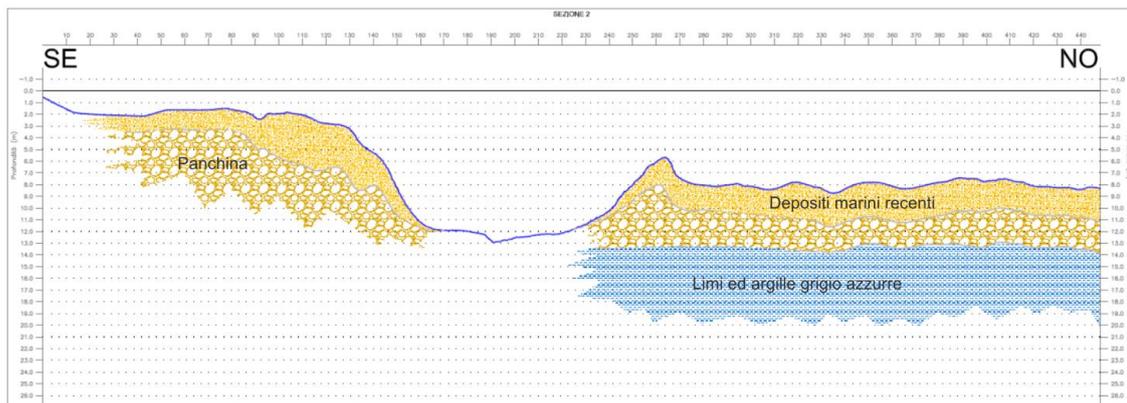


figura 3.4 - sezione sismica 2

La sezione 3, relativa alla zona occidentale, mostra una coltre di depositi marini recenti, di potenza costante intorno ai 4-5 metri, sovrastante la panchina la quale ha una potenza media di 3 metri in aumento fino a 8,5 metri al largo. La giacitura di entrambe i depositi è sub orizzontale e sovrasta i livelli argillo limosi (figura 3.5).

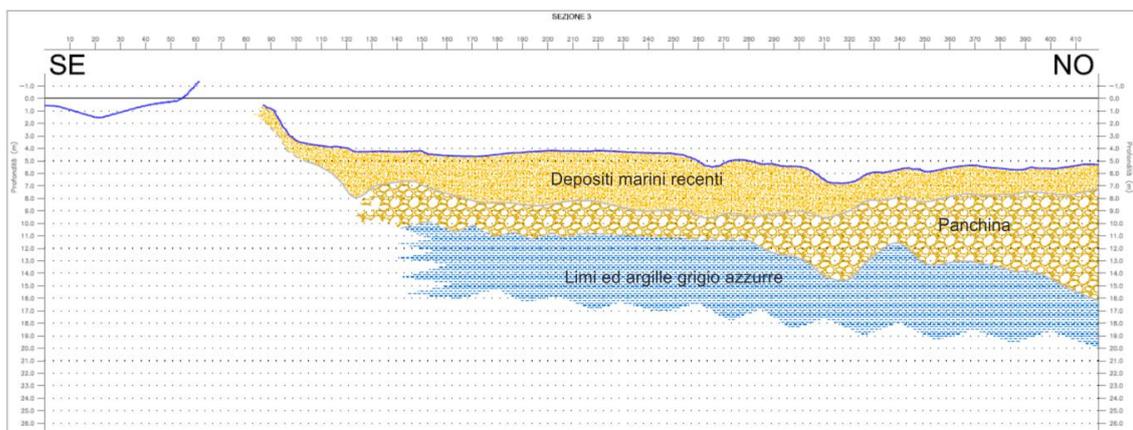


figura 3.5 - sezione sismica 3

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica				
		09	017	DR	005	2

Il limite nord dell'opera è rappresentato dalla coltre sedimentaria marina recente di potenza variabile tra i 2 m sul lato SO fino e 5 metri, sovrastante la panchina la quale ha una potenza media di 3 metri, in aumento verso la costa sino a 5 metri; le due unità sovrastano il substrato argilloso limoso; tutti gli strati hanno una blanda inclinazione verso NE ().

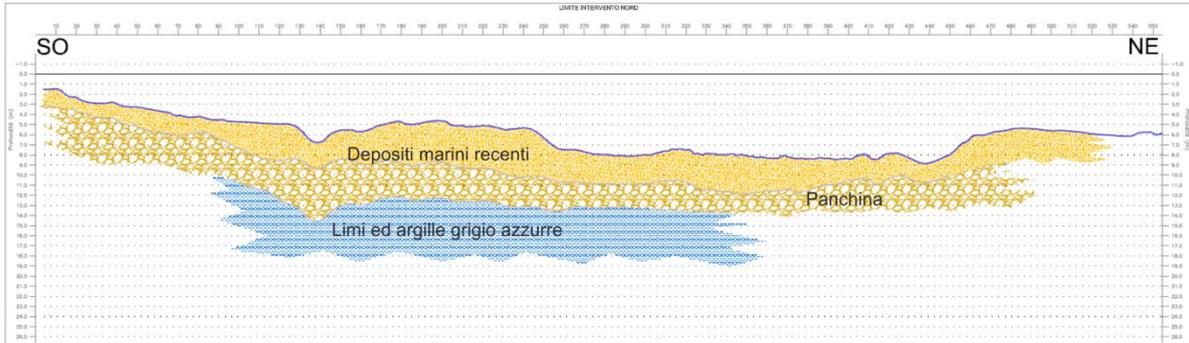


figura 3.6 - sezione sismica lato nord

Le indagini geognostiche integrative, eseguite dalla soc. Cesub (2019) nell'area dove sorgerà la vasca, per conto dell'Autorità di Sistema Portuale, non hanno modificato l'assetto stratigrafico e le caratteristiche geomeccaniche dei terreni di fondazione, confermando sostanzialmente i risultati precedentemente ottenuti. Le indagini, svolte soprattutto per una maggiore individuazione dell'unità C (facies limoso argillosa di Gallipoli) hanno evidenziato inoltre come lo strato impermeabile di Argille Calabriane (unità C2) si intesti su profondità comprese tra -22.0 e -23.0 m s.l.m. confermando l'assunzione cautelativa di fissare la quota massima di sommità dello strato impermeabile alla profondità di -25.0 m s.l.m. come la massima verificabile nel sito in cui si realizzerà la vasca. Hanno inoltre mostrato una tendenza alla riduzione dello spessore dell'unità B (panchina) con l'avvicinamento verso la foce del canale policentrico nord.

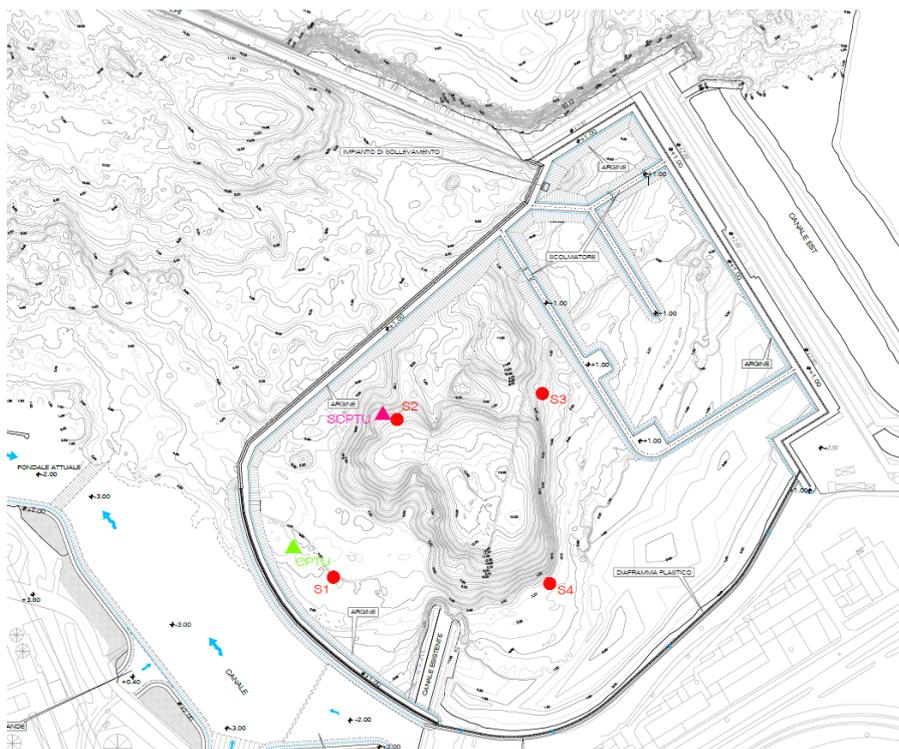


figura 3.7 – indagini geognostiche integrative eseguite da Cesub S.r.l. (2019)

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica					
		09	017	DR	005	2	GEO

3.1 Successione stratigrafica

La successione delle unità stratigrafiche dei terreni in sito, desunta sia dalle indagini geofisiche che dai numerosi sondaggi geotecnici eseguiti nelle zone limitrofe, è rappresentata dai litotipi di seguito descritti, a partire dall'alto:

- Depositi marini recenti (**unità A**)
- Sabbie con noduli calcarenitici
(Formazione Gallipoli - Unità superiore - **Unità B - Panchina**)
- Limi sabbiosi e sabbie limose grigio azzurre
(Formazione di Gallipoli - Unità inferiore - **Unità C1 - Limi Calabriani**)
- Argille limoso sabbiose grigio azzurre
(Formazione di Gallipoli - Unità inferiore, parte basale - **Unità C2 - Argille Calabriane**)

Come notato precedentemente, la campagna geofisica ha permesso di individuare con accuratezza solo gli strati più superficiali del terreno, a causa della scarsa penetrazione del segnale sismico nei materiali costituiti da sedimenti medio fini e compatti; infatti il tetto dell'unità C2, relative alle argille azzurre non è stata individuato.

Le indagini geognostiche, eseguite nel passato nelle aree limitrofe e quelle integrative del 2019 (Cesub), hanno permesso di definire la quota del tetto delle argille azzurre (Unità C2) e le caratteristiche geotecniche delle varie unità litologiche; tale indagini hanno riguardato (figura 3.8):

- i lavori di banchinamento in località Capo Bianco (Relazione geologica e geotecnica redatta dal Prof. Vincenzo Cotecchia) posta a circa 1 km di distanza dal sito in esame (28 sondaggi con prove SPT ed indagini di laboratorio) - Autorità Portuale di Brindisi (2004) - figura 3.9 - 3.11
- la realizzazione del terminale LNG in adiacenza all'area in esame -Brindisi LNG (2003).

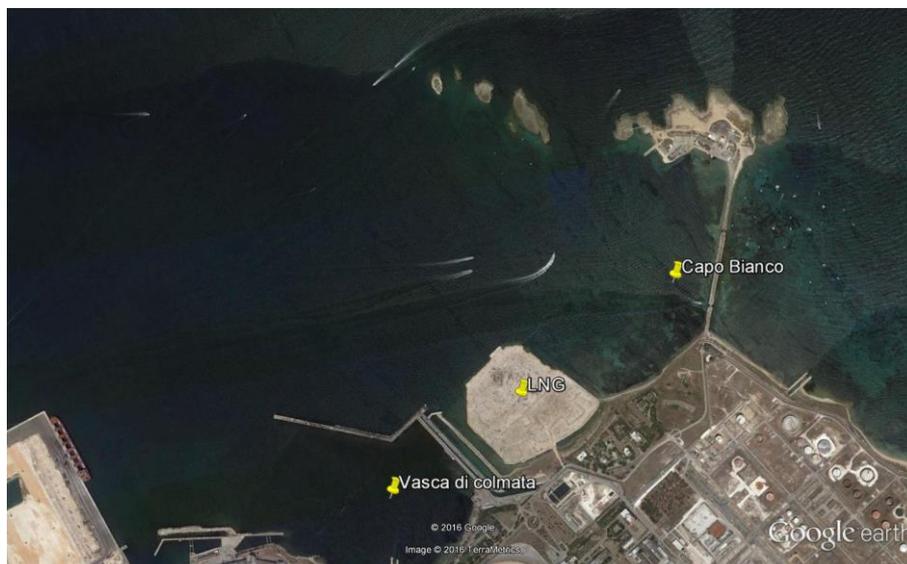


figura 3.8 - Localizzazione indagini geognostiche pregresse (LNG e Capo Bianco) e opera da realizzare ((Vasca di colmata) - (fonte : google Earth)

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica				
		09	017	DR	005	2

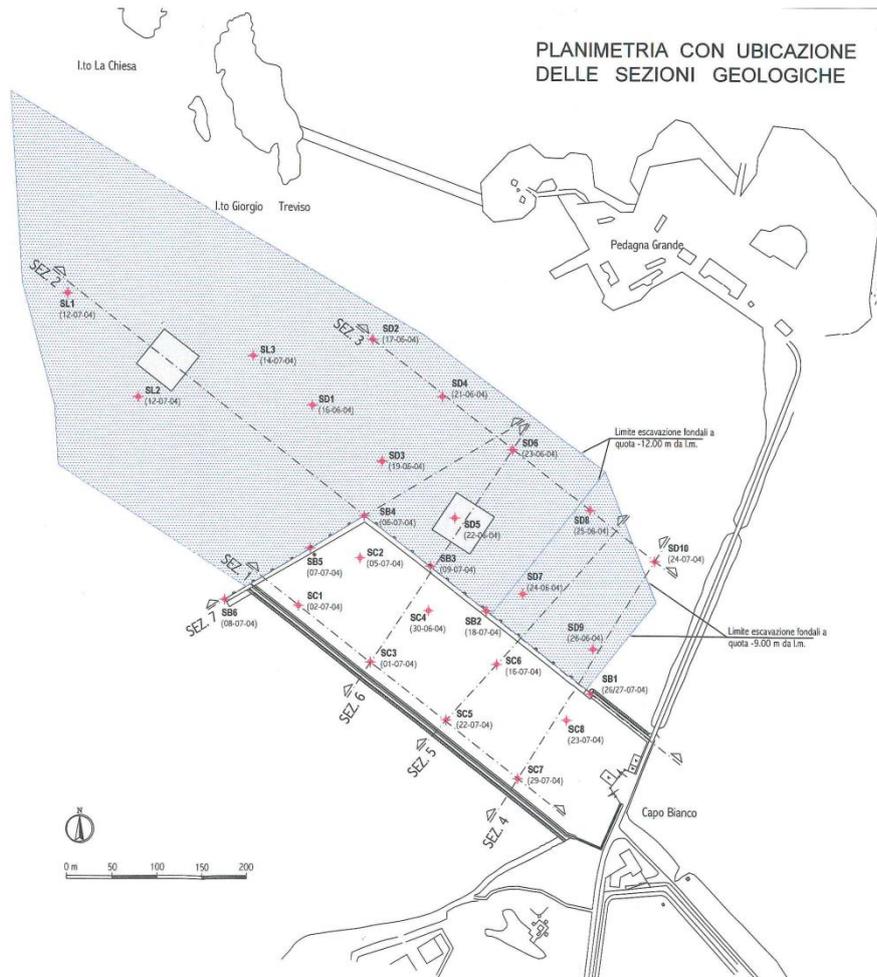


figura 3.9 - Ubicazione sezioni stratigrafiche - Capo Bianco - prof. Cotecchia (2004)

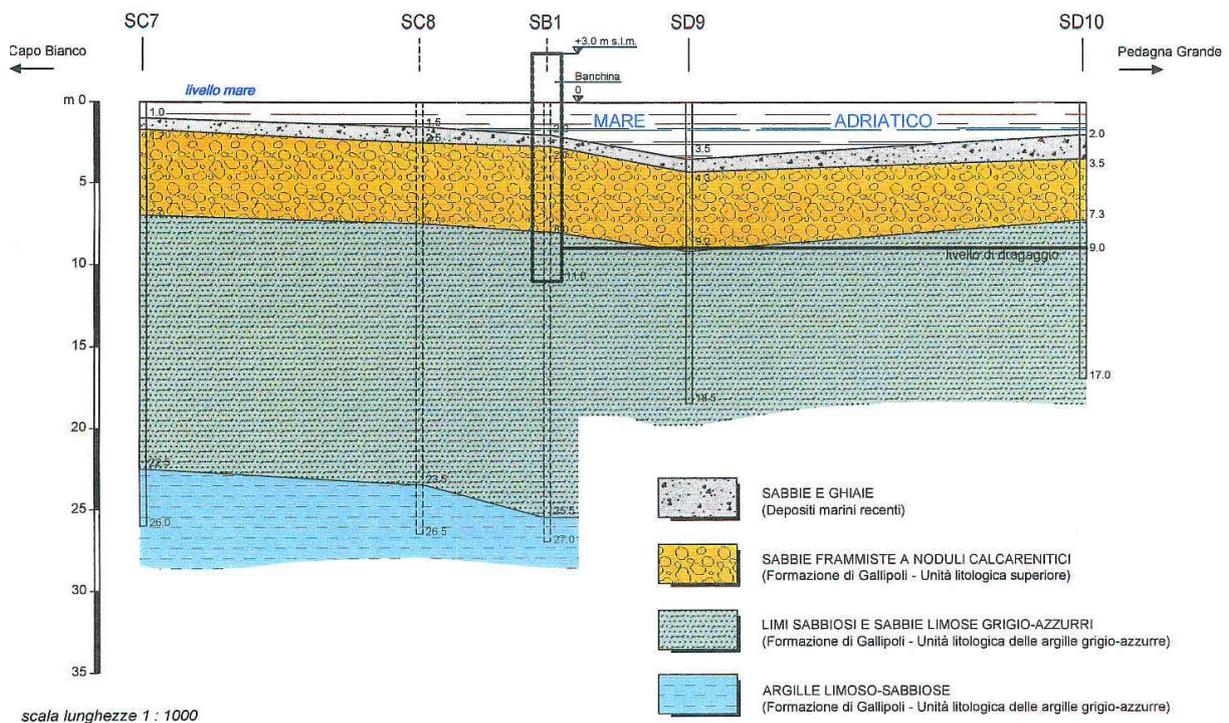


figura 3.10 - Sezione stratigrafica n.4 - Capo Bianco - prof. Cotecchia - 2004

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica				
		09	017	DR	005	2

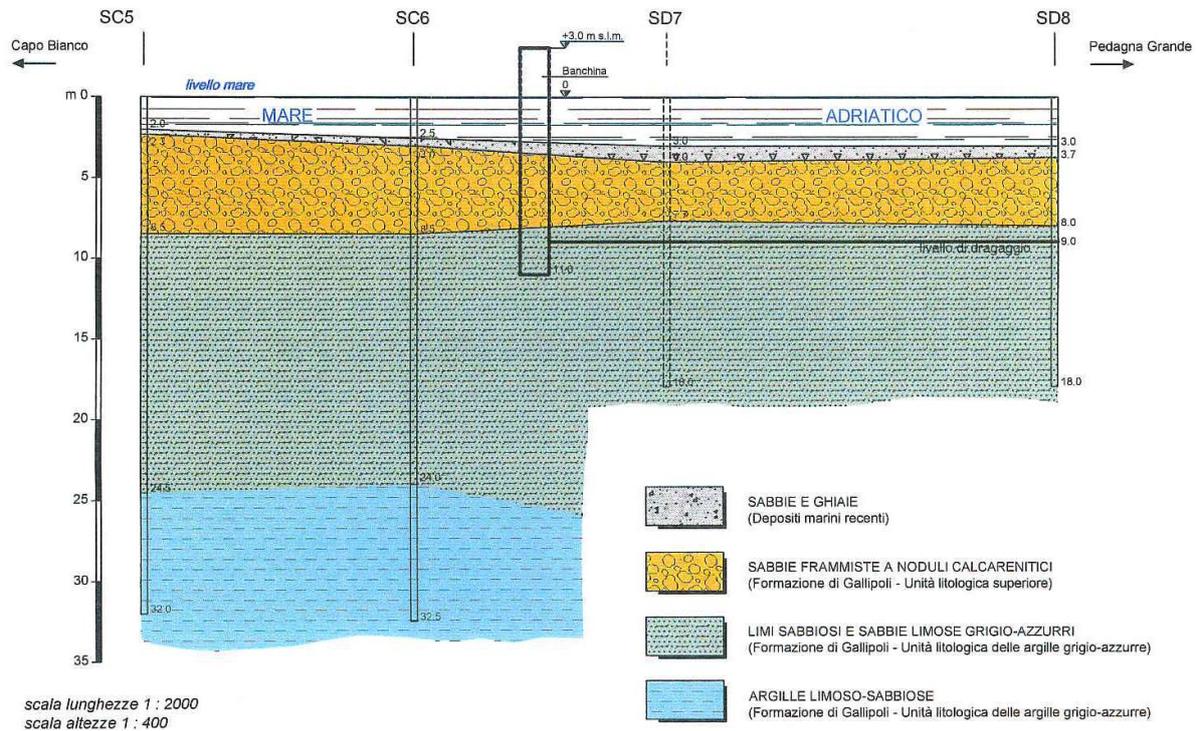


figura 3.11 - - Sezione stratigrafica n.5 - Capo Bianco - prof. Cotecchia - 2004

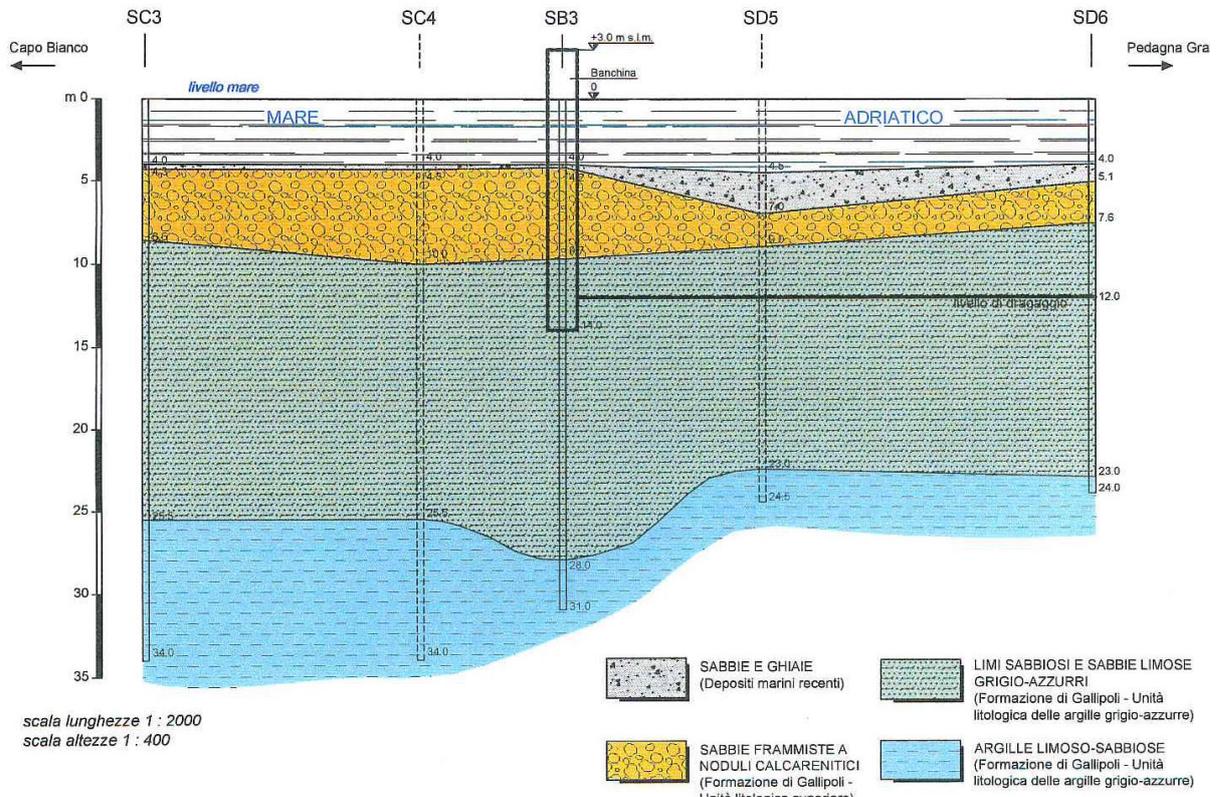


figura 3.12 - - Sezione stratigrafica n.6 - Capo Bianco - prof. Cotecchia - 2004

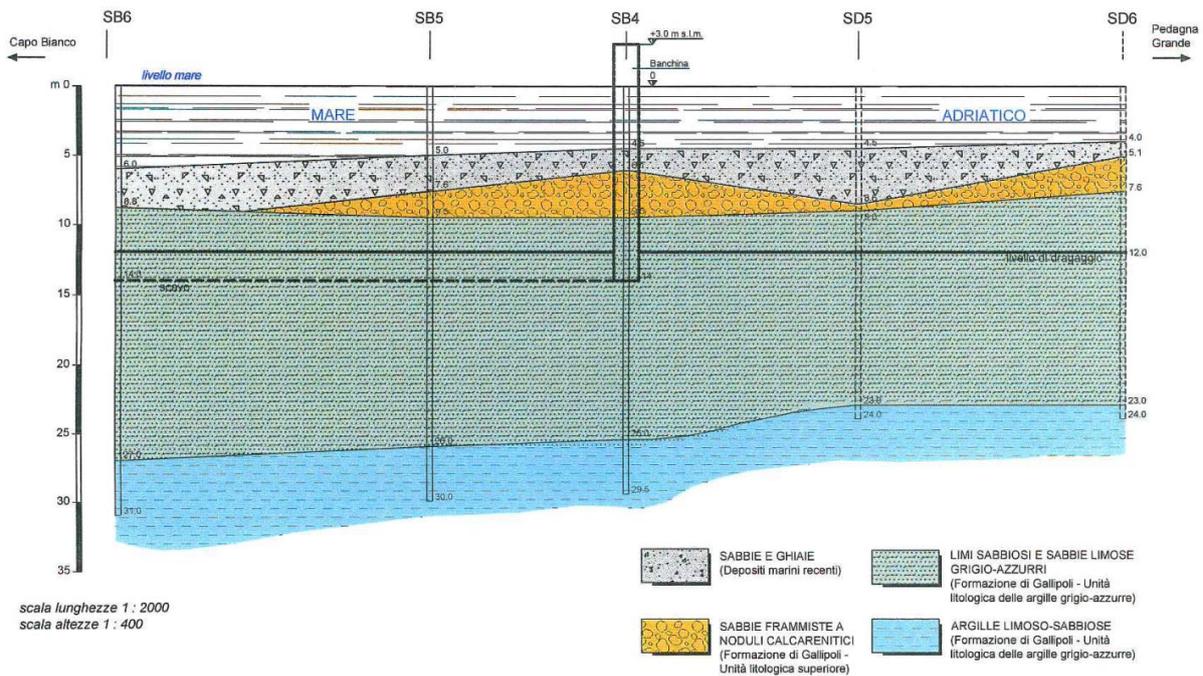


figura 3.13 -- Sezione stratigrafica n.7 - Capo Bianco - prof. Cotecchia – 2004

3.1.1 Depositi marini recenti (Unità A)

Le litologie sono costituite da alternanze di sabbie, sabbie limose e sabbie ghiaiose, con spessore variabile e possibili inclusi di materia organica in superficie.

La potenza di questo livello, nel tratto di mare in oggetto, è compresa tra i 1-7 metri, come rilevato dall'indagine geofisica, anche se non si escludono possibili variazioni locali.

I parametri geotecnici medi di questo livello sono riportati in tabella 3.1:

tabella 3.1 - parametri geotecnici Unità A

Unità A – Sabbie, sabbie limose e ghiaiose	
Spessore medio	2-5 m
Angolo di attrito interno	$\varphi'_{\kappa} = 26-30^{\circ}$
Coesione drenata	$c'_{\kappa} = 0$ kPa
Peso di volume naturale	$\gamma = 1,9-2,0$ kN/m ³

3.2 Sabbie con noduli calcarenitici (Panchina - Formazione Gallipoli) - Unità B

Sabbie miste a sabbie limose, giallastre, con frequenti noduli o livelli cementati di calcareniti. Le sabbie possono includere anche dei ciottoli ghiaiosi arrotondati, di natura sempre calcarenitica.

La potenza di questo livello è abbastanza variabile, con uno spessore medio di circa 5 metri, che tende ad assottigliarsi in corrispondenza della foce del canale policentrico nord.

La consistenza di questo livello sembra essere minore in mare che sulla terraferma, a causa della diversa efficacia dei processi di litificazione e fenomeni di alterazione.

I parametri geotecnici medi di questo livello sono riportati

tabella 3.2:

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica				
		09	017	DR	005	2

tabella 3.2 -- parametri geotecnici livello B

Unità B – Sabbie limose con livelli cementati	
Spessore medio	5 m
Angolo di attrito interno	$\varphi'_{\kappa} = 38-41^{\circ}$
Coesione drenata	$c'_{\kappa} = 0$ kPa
Peso di volume naturale	$\gamma = 2,0-2,1$ kN/m ³

3.3 Limi sabbiosi e sabbie limose argillose grigio azzurre (Formazione Gallipoli) - Unità C1

Limi sabbiosi e sabbie limose nella parte superiore che in profondità passano a limi argillosi e che contengono strati sottili di argilla e strati di limo lievemente cementato.

Questo terreno ha un colore grigio azzurro, presenta frammenti di conchiglie; costituisce una facies di transizione, all'interno della formazione di Gallipoli, tra la facies superficiale sabbiosa calcarenitica e quella basale tipicamente argillosa. La potenza di questo livello è abbastanza variabile (tra i 9 ed i 15 metri), con uno spessore medio di circa 12 metri; il tetto dell'unità C è stato rilevato dalle indagini sismiche.

I parametri geotecnici medi di questo livello sono riportati in tabella 3.3:

tabella 3.3 - parametri geotecnici Unità C1

Unità C1 – Limi sabbiosi e sabbie limose argillose	
Spessore medio	12 m
Angolo di attrito interno	$\varphi'_{\kappa} = 25-26^{\circ}$
Coesione drenata	$c'_{\kappa} = 15-30$ kPa
Peso di volume naturale	$\gamma = 2,0$ kN/m ³

3.4 Argille limoso sabbiose grigio azzurre (Formazione Gallipoli) - Livello C2

Alla base della successione litostratigrafica e geotecnica sono presenti delle argille limoso sabbiose, grigio azzurre, rinvenute ad una profondità media di circa 20-25 metri dal livello medio marino.

Questo terreno ha un colore grigio azzurro ed una componente sabbioso limosa che diminuisce gradatamente verso il basso, all'aumentare del grado di sovraconsolidazione.

Il terreno costituisce la facies basale della formazione di Gallipoli ed ha una potenza elevata, come testimoniato dai sondaggi più profondi della zona industriale, laddove raggiunge i 40 metri. Di seguito vengono riportati i parametri geotecnici medi in tabella 3.4:

tabella 3.4 - parametri geotecnici Unità C2

Unità C2 – Argille limoso sabbiose grigio azzurre	
Spessore medio	> 30 m
Angolo di attrito interno	$\varphi'_{\kappa} = 20-26^{\circ}$
Coesione drenata	$c'_{\kappa} = 25-40$ kPa
Peso di volume naturale	$\gamma = 2,0-2,1$ kN/m ³

Dal punto di vista idrogeologico, i due livelli a matrice sabbiosa sono permeabili, mentre i due livelli più fini, in particolare le argille di base, sono dotati di permeabilità nulla o molto bassa (limi).

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	<u>Ufficio di BRINDISI</u> LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica					
		09	017	DR	005	2	GEO

Queste argille costituiscono l'acquicluda di separazione con la falda profonda, contenuta nei calcari mesozoici è segnalata, sulla terra ferma, a circa 60 metri dal piano di campagna.

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica				
		09	017	DR	005	2

Capitolo 4 Caratteristiche geotecniche dei terreni di fondazione

Nei paragrafi seguenti sono riportati i parametri geotecnici caratteristici dei terreni assunti per il dimensionamento e la verifica delle opere di conterminamento della vasca di colmata (costituite da paratie di acciaio e da diaframma plastico) insieme alle sezioni stratigrafiche di calcolo maggiormente gravose. L'ubicazione planimetrica delle opere e le relative sezioni tipologiche sono riportate nelle figure seguenti

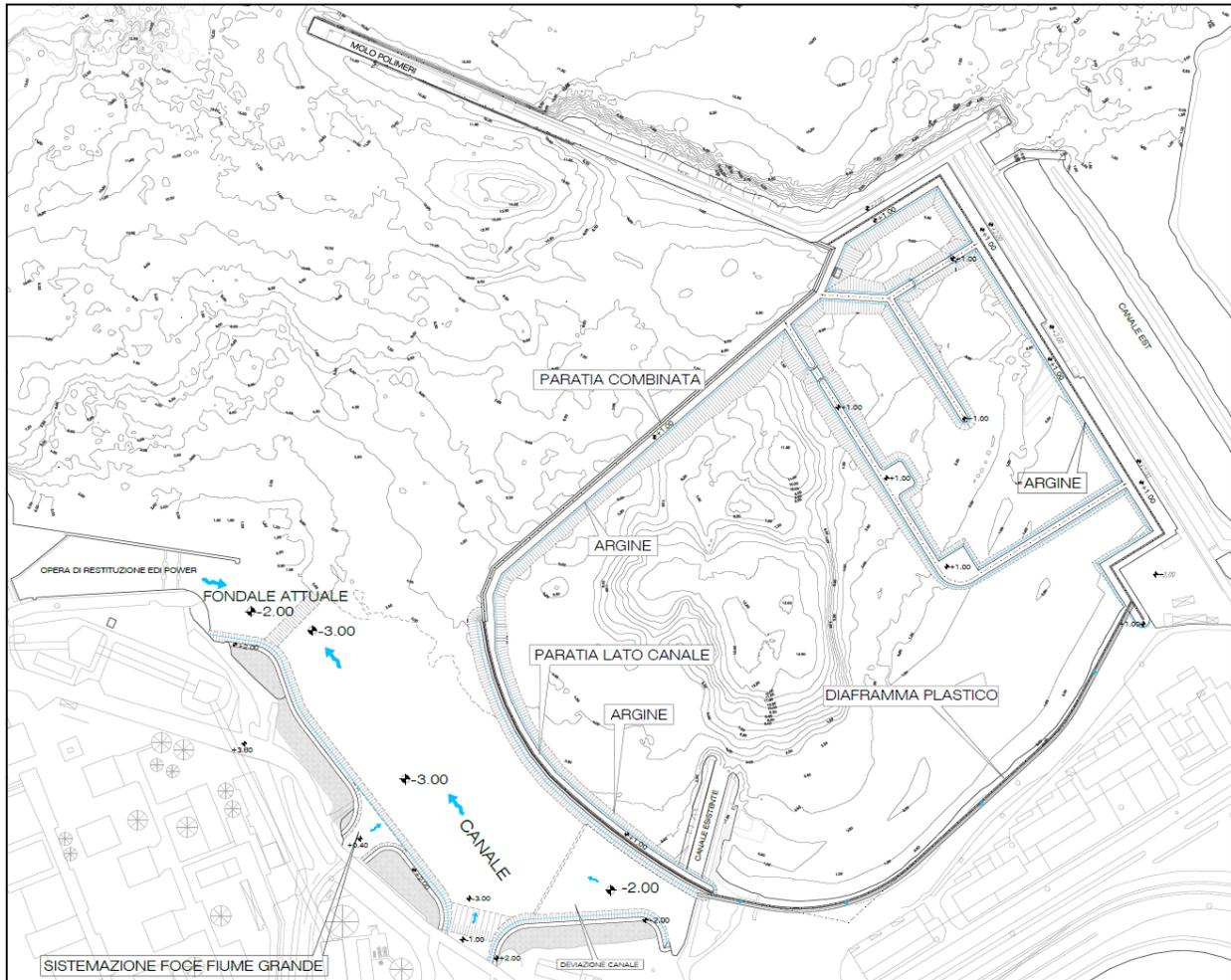


figura 4.1 - Nuova vasca di colmata con indicazione delle paratie di conterminamento

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica				
		09 017 DR 005 2 GEO				

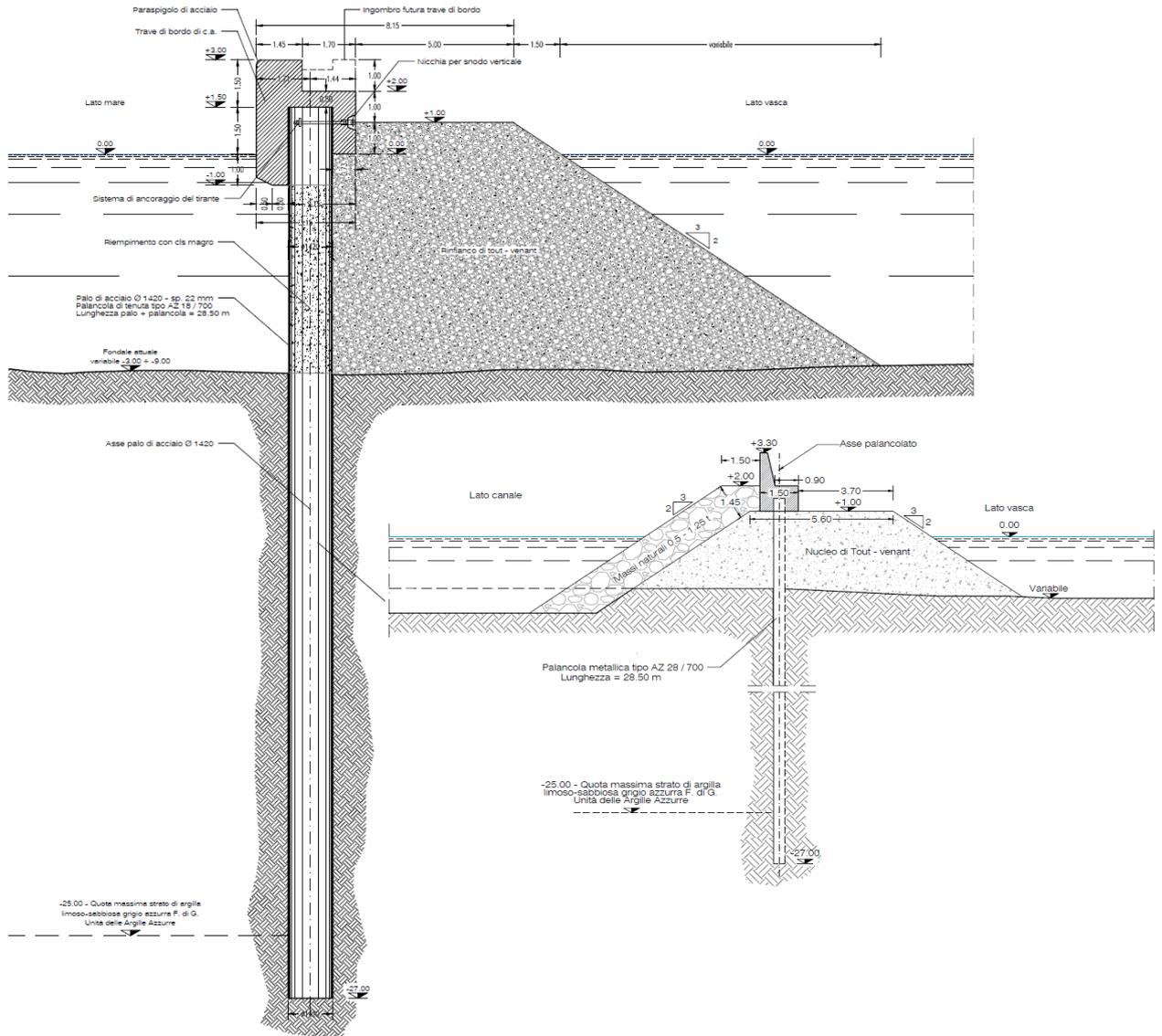


figura 4.2 - Sezione tipo - paratia metallica combinata lato Nord con indicazione delle Argille Azzurre e argine con paratia metallica lato canale - lato Ovest

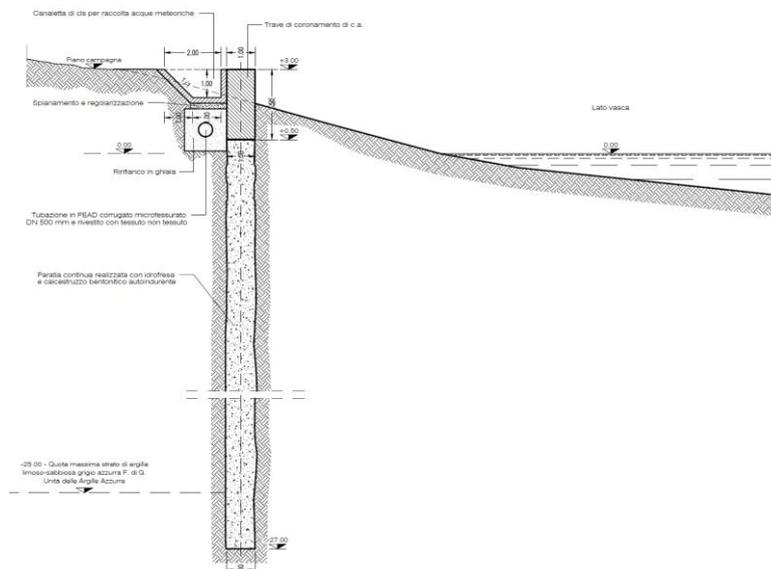


figura 4.3 - Sezione tipo - paratia semiplastica lungo la costa - lato Sud con indicazione delle Argille Azzurre

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica				
		09	017	DR	005	2

4.1 Sezione stratigrafiche per il dimensionamento della paratia

Nelle tabelle seguenti sono riportate le successioni stratigrafie dei terreni, assumendo nell'ambito di ciascuna tipologia di opere le situazioni più cautelative sia ai fini del loro dimensionamento geotecnico e strutturale che per quello di tipo ambientale dovendo garantire una permeabilità della vasca verso l'esterno equivalente a quella di un materiale di spessore pari a 1.00 m e con un coefficiente di permeabilità (k) di 10^{-9} m/s; il tetto dello strato relativo alle argille Azzurre (Calabriane), avendo un coefficiente di permeabilità stimato inferiore a 10^{-9} m/s, è stato indicato in tutta la vasca a quota -25.00 m s.l.m. (la maggiore profondità prevista nel suo range di oscillazione).

Lo spessore dello strato superficiale, relativo a ciascuna tipologia di opera, è stato desunto dalle prospezioni geofisiche eseguite nel 2015 dalla Geoprosys e dalle indagini integrative eseguite nel 2019 dalla Cesub.

Vasca - paratia combinata di acciaio - lato nord			
Formazione	Quota sommità m s.l.m.	Quota fondo m s.l.m.	Spessore (m)
Rilevato in Tout Venat o sabbia e limo	+1.00/+3.00	-9.00	10.00/12.00
Superficiale - Unità "A"	-9.00	-11.00	2.00
"Panchina" - Unità "B"	-11.00	-16.00	5.00
Limi Calabriani - Unità "C1"	-16.00	-25.00	9.00
Argille Calabriane - Unità "C2"	-25.00	-	-

Vasca - lato canale			
Formazione	Quota sommità m s.l.m.	Quota fondo m s.l.m.	Spessore (m)
Rilevato in Tout Venat o sabbia e limo	+1.00/+3.00	- 3.00	4.00/6.00
Superficiale - Unità "A"	-3.00	-5.00	2.00
"Panchina" - Unità "B"	-5.00	-6.00	1.00
Limi Calabriani - Unità "C1"	-6.00	-25.00	19.00
Argille Calabriane - Unità "C2"	-25.00	-	-

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI	Relazione geotecnica				
	LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	09	017	DR	005	2

Vasca - lato linea di costa			
Formazione	Quota sommità m s.l.m.	Quota fondo m s.l.m.	Spessore (m)
Rilevato in Tout Venat o sabbia e limo	+1.00/+3.00	+0.00	4.00/6.00
Superficiale - Unità "A"	0.0	-6.50	6.50
"Panchina" - Unità "B"	-6.50	-7.50	1.00
Limi Calabriani - Unità "C1"	-7.50	-25.00	17.50
Argille Calabriane - Unità "C2"	-25.00	-	-

4.2 Parametri geotecnici caratteristici

Nella tabella 4.1 vengono sinteticamente riportati i parametri geotecnici di modello utilizzati per le varie unità geotecniche

tabella 4.1 - Parametri geotecnici caratteristici

Formazione	Tipo terreno	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	E_{vc} (kPa)	E_{ur} (kPa)	ν
Riempimento Tout-venant	Sabbia/TV	19	0	28/45	7000	21000	0.35
Superficiale Unità "A"	Sabbia limosa	21	0	28	5000	15000	0.35
"Panchina" Unità "B"	Sabbia grossolana cementata	21	0	38	58000	92800	0.30
Limi Calabriani Unità "C1"	Limo compatto	20	17	26	58000	92800	0.30
Argille Calabriane Unità "C2"	Argilla compatta	20	25	25	R = 12000 n = 0.6	40000	0.30

Il valore del modulo elastico del Tout Venant è stato assunto a quello del materiale di riempimento della vasca per tener conto della deformazione nella sua fase di posa in opera.

Il valore dei moduli operativi E_{vc} dipendono dal livello deformativo atteso per l'opera e nel caso in esame sono ricavati a partire dall'interpretazione delle eseguite nell'aree limitrofe.

In particolare nel caso delle formazioni Argilla Calabriane è stato assunto un andamento del modulo elastico di primo carico E_{vc} crescente con la profondità secondo la seguente espressione generale:

$$E_{vc} = R \cdot (p' / p_a)^n \quad \text{modulo in compressione vergine (primo carico).}$$

dove:

$p_a = 100$ kPa - pressione di riferimento (pressione atmosferica 100 kPa);

$p' = (\sigma'_v + \sigma'_h)/2$ - pressione media alla generica profondità;

R - modulo elastico corrispondente a $p' = 100$ kPa;

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica					
		09	017	DR	005	2	GEO

n - coefficiente di forma della legge compreso tra 0 e 1 (n = 0, legge costante con la profondità, n = 1 legge variabile linearmente).

Il valore del modulo di scarico-ricarico (E_{ur}) è compreso tra 1.5 ÷ 3 volte quello di primo carico.

Per le verifiche geotecniche relative alle paratie di acciaio e di calcestruzzo, si rimanda alla relazione di "Calcoli delle strutture e degli Impianti"

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI	Relazione geotecnica				
	LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	09	017	DR	005	2

Capitolo 5 Caratterizzazione dei sedimenti

5.1 Caratterizzazione dei sedimenti

Sui sedimenti in posto (quindi ancora da dragare) sono state svolte diffuse analisi granulometriche su circa 760 campioni.

Le analisi confermano che i sedimenti sono assimilabili, granulometricamente, a sabbie fini limose.

L'analisi delle curve granulometriche permette di stimare i seguenti valori medi:

$$D_{50} = 0.25 \text{ mm}$$

ed un contenuto di materiali fini

$$FC = 16\%$$

Tali parametri risultano molto utili per stimare l'intervallo dell'indice dei vuoti entro il quale può variare questo parametro del materiale sedimentato.

Cubrinovski e Ishihara (2002) indicano che, sperimentalmente, si è potuto apprezzare che l'ampiezza dell'intervallo ($e_{max} - e_{min}$) varia in funzione del diametro D_{50} e del contenuto di materiale fine FC secondo l'andamento riportato nella seguente figura, ovvero secondo la relazione

$$e_{max} - e_{min} = 0.23 + \frac{0.06}{D_{50}} \quad 1)$$

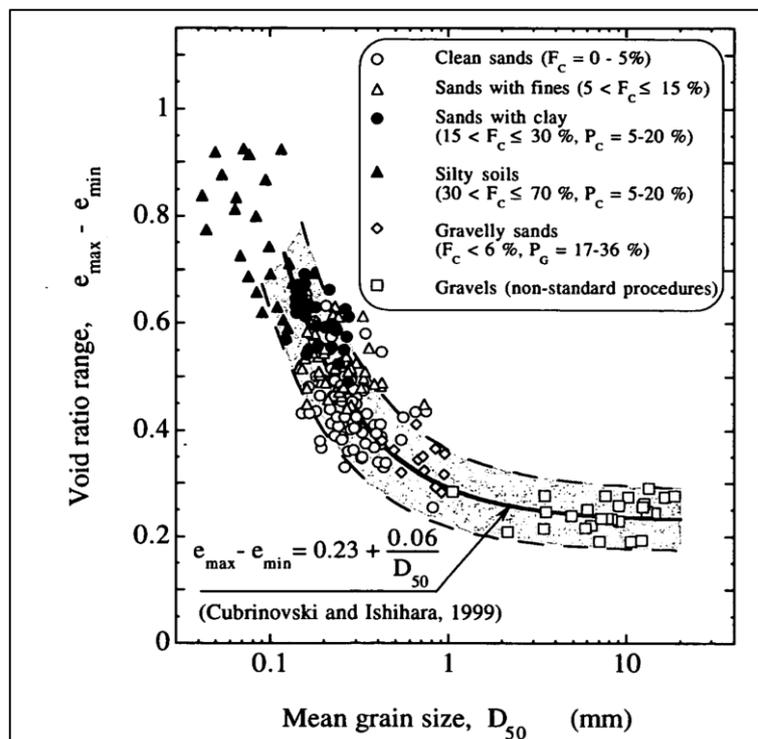


Figura 4. Ampiezza dell'intervallo ($e_{max} - e_{min}$) in funzione del diametro D_{50} (Cubrinovski e Ishihara 2002)

I due autori sopra citati notano inoltre che i due valori di indice dei vuoti massimo (e_{max}) e minimo (e_{min}) sono correlabili attraverso le funzioni riportate in figura seguente. In particolare per sabbie con argille

$$e_{max} = 0.44 + 1.21 e_{min}$$

2)

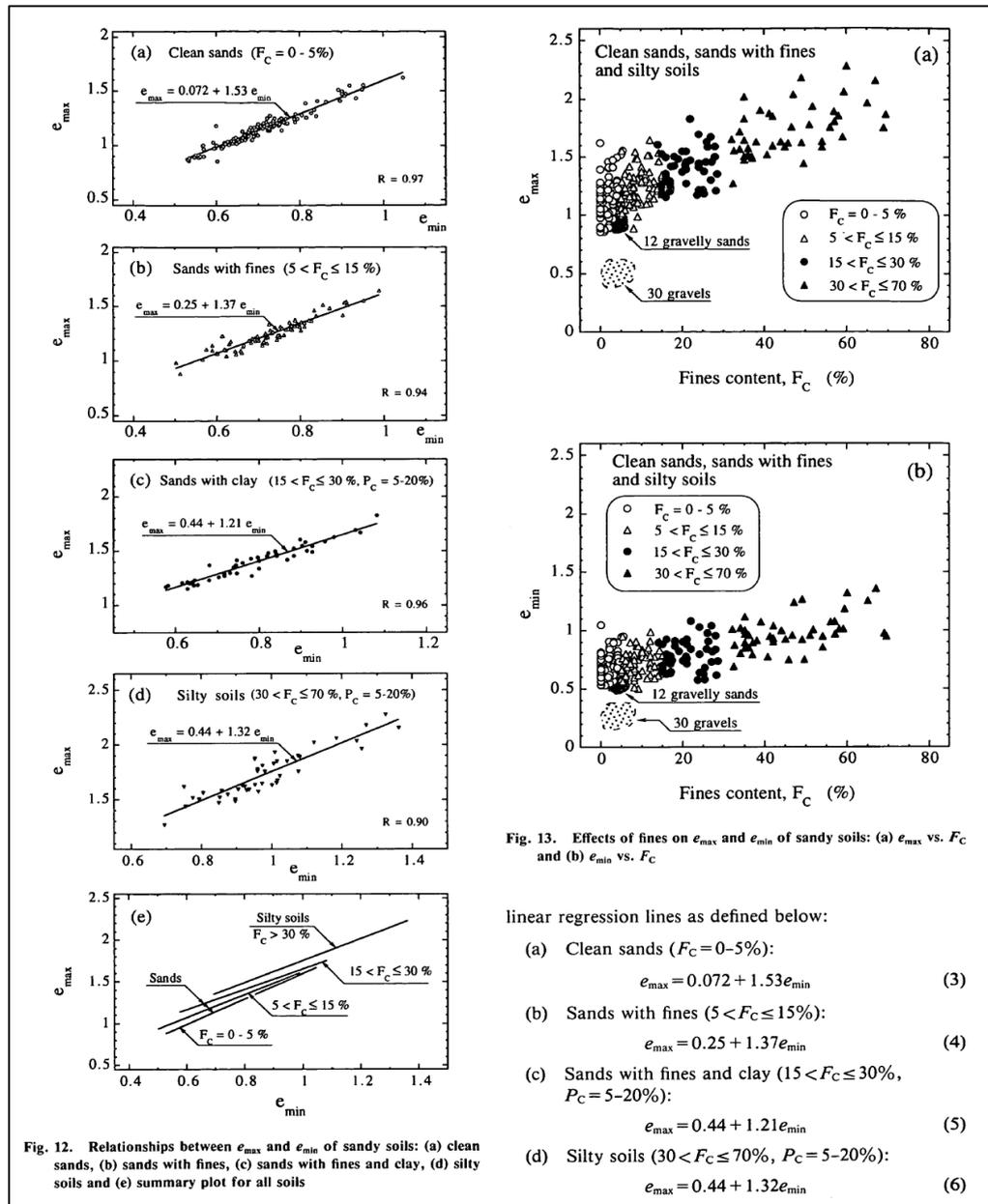


Figura 5. Rapporto e_{max}/e_{min} in funzione del contenuto di fine F_c (Cubrinovski e Ishihara 2002)

Combinando le relazioni 1 e 2 si possono definire l'indice dei vuoti massimo e minimo per i sedimenti in esame (vedasi tabella seguente).

D ₅₀	F _c	$e_{max} - e_{min}$	e_{min}	e_{max}
mm	%	-	-	-
0.25	16	0.47	0.14	0.61

Tabella 2. Indice dei vuoti massimo e minimo per i sedimenti

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica				
		09	017	DR	005	2

Successivamente al dragaggio i sedimenti saranno conferiti mediante draga idraulica autocaricante all'interno della vasca di colmata. E' pertanto ragionevole assumere che l'indice dei vuoti iniziale dei sedimenti sia molto prossimo all'indice dei vuoti massimo.

$$e_0 = 95\% \times e_{max} = 0.58$$

Noti l'indice dei vuoti "e" ed i limiti di indice dei vuoti massimo e minimo "e_{max}" ed "e_{min}" è possibile definire la densità relativa del materiale come

$$D_r = \frac{e_{max} - e_0}{e_{max} - e_{min}}$$

questo parametro risulta fondamentale per la stima dell'angolo di attrito dei sedimenti. Ricordando infatti quanto proposto da Schmertmann (1977) in funzione della densità relativa e della granulometria si trova:

$$\varphi' = 28 + 0.14 \cdot D_R \quad \text{valida per sabbia fine uniforme}$$

$$\varphi' = 31.5 + 0.115 \cdot D_R \quad \text{valida per sabbia fine ben gradata e sabbia media uniforme}$$

$$\varphi' = 34.5 + 0.10 \cdot D_R \quad \text{valida per sabbia media ben gradata e sabbia grossa uniforme}$$

$$\varphi' = 38 + 0.08 \cdot D_R \quad \text{valida per sabbia e ghiaia poco limosa e ghiaietto uniforme}$$

Pertanto, utilizzando la prima di queste relazioni si può stimare una densità relativa ed angolo di attrito "iniziali"

Dr ₀	φ ₀
-	(°)
0.07	28.9

L'indice dei vuoti consente inoltre di stimare il peso per unità di volume del materiale dal momento che è facile dimostrare che per un mezzo bifase acqua-terreno si trova

$$\gamma_{sat} = \gamma_s(1 - n) + n\gamma_w$$

in cui n è la porosità del terreno γ_{sat} è il peso di volume saturo del sedimento, γ_s è peso di volume della frazione solida e γ_w è il peso di volume dell'acqua.

Si ricorda la relazione tra la porosità e l'indice dei pori

$$n = \frac{e}{1 - e}$$

Pertanto il peso di volume saturo del materiale appena depositato è pari a

$$\gamma_{sat} = 19.4 \text{ kN/m}^3$$

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI	Relazione geotecnica				
	LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	09	017	DR	005	2

Capitolo 6 Calcolo dei cedimenti della colmata

Il calcolo dei cedimenti della colmata è stato effettuato in condizioni monodimensionali, ovvero sono stati valutati i cedimenti di colonne di materiale di base 1 m x 1 m, utilizzando un modello agli elementi finiti. La modellazione monodimensionale è giustificata dalla profondità limitata della vasca rispetto alle dimensioni in pianta.

In totale sono stati stimati i cedimenti in tre zone della colmata, al fine di valutare separatamente l'effetto della variazione dell'altezza della pila di sedimenti e del cedimento dei terreni di fondazione.

6.1 Zone di calcolo di riferimento

Sono state esaminate tre zone di calcolo, ubicate come in figura.

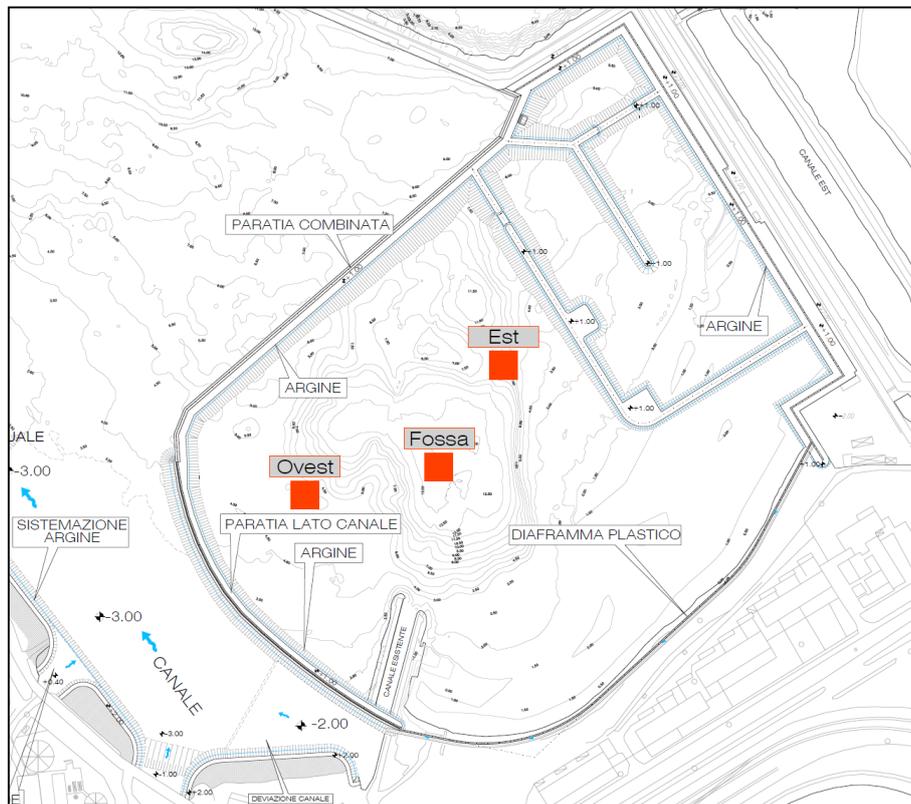


Figura 6. Zone di calcolo

Si sottolinea che per quanto riguarda le stratigrafie, in accordo con la ricostruzione geologica si è operato come segue:

- Per la colonna “**Fossa**” è stata utilizzata la stratigrafia di **sezione 2**;
- Per la colonna “**Ovest**” è stata utilizzata la stratigrafia di **sezione 3**;
- Per la colonna “**Est**” è stata utilizzata la stratigrafia di **sezione 1**;

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	<u>Ufficio di BRINDISI</u> LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica					
		09	017	DR	005	2	GEO

In particolare le stratigrafie di calcolo utilizzate sono sintetizzabili come segue:

Colonna “Fossa”:

da -13.0 m s.l.m. alla massima profondità di interesse

Limi Argillosi

Colonna “Ovest”:

da -4.5 m s.l.m. a -8.0 m s.l.m.

Depositi Marini

da -8.0 m s.l.m. a -12.0 m s.l.m.

Panchina

da -13.0 m s.l.m. alla massima profondità di interesse

Limi Argillosi

Colonna “Est”:

da -3.0 m s.l.m. a -7.5 m s.l.m.

Depositi Marini

da -7.5 m s.l.m. alla massima profondità di interesse

Panchina

6.2 Descrizione del codice di calcolo

Per analizzare la validità e l'efficacia delle soluzioni di progetto, è stato costruito un modello numerico agli Elementi Finiti (FEM) che ha consentito di simulare le fasi di costruzione e l'evoluzione dei cedimenti nel tempo.

Nel seguito saranno accennate le modalità di costruzione del modello e le procedure seguite al fine di sviluppare le analisi numeriche. È necessario altresì premettere che la modellazione parte da una semplificazione geometrica derivante anche da uno studio di sensibilità sul modello, che consente di ottenere dei risultati comunque accurati e di contenere allo stesso tempo i tempi di calcolo entro valori ragionevoli.

È da sottolineare, infine, che i modelli costruiti fanno riferimento a situazioni piane e che quindi le deformazioni calcolate sono da considerarsi un estremo superiore delle reali deformazioni che si stima avvengano in sito non essendo stato considerato l'effetto tridimensionale del problema. Tale effetto, infatti, minimizza fortemente le deformazioni calcolate numericamente tanto più quanto maggiore è la vicinanza con angoli o situazioni geometriche spiccatamente tridimensionali.

Per sviluppare un'analisi significativa è stato necessario utilizzare un software, specificatamente dedicato alle applicazioni geotecniche, che consente l'analisi di modelli bidimensionali. Il software in questione è il PLAXIS nella sua versione 2012 che è un codice di calcolo agli elementi finiti che permette di simulare situazioni reali riconducibili a condizioni di deformazione piane (plain strain).

Un'analisi agli elementi finiti, presuppone la preventiva creazione (fase di input) di una modellazione geometrica bidimensionale nel piano x-y composta da punti, linee ed altri componenti. Nel caso in esame sono stati utilizzati elementi triangolari a 15 nodi per modellare gli strati di terreno e gli altri materiali del modello (elementi di volume – clusters). Il triangolo a 15 nodi fornisce un'interpolazione del quarto ordine per gli spostamenti e l'integrazione numerica adopera dodici punti di Gauss (stress points) su cui viene calcolato lo stato tensionale e deformativo. Il triangolo a 15 nodi risulta perciò essere un elemento molto accurato e fornisce

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica				
		09	017	DR	005	2

ottimi risultati anche quando impiegato in problemi estremamente complessi. L'uso degli elementi triangolari a 15 nodi comporta peraltro l'impiego sia di una grande quantità di memoria sia tempi di calcolo relativamente elevati.

Un elemento a 15 nodi può essere considerato come la composizione di quattro elementi a 6 nodi, poiché il numero totale di nodi e punti d'integrazione è uguale. Un elemento a 15 nodi è tuttavia più affidabile di quattro elementi a 6 nodi.

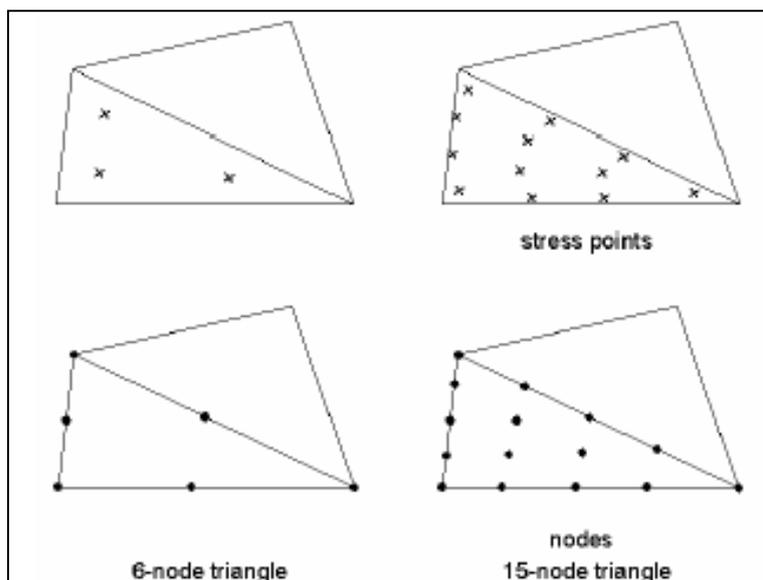


Figura 7: Elementi da 6 e da 15 nodi.

6.2.1 Il metodo F.E.M. per l'analisi delle deformazioni

Come accennato, la creazione di un modello geometrico composto di punti, linee e clusters è il punto di partenza per l'analisi numerica; oltre a questi componenti di base si possono assegnare al modello oggetti strutturali o condizioni speciali in modo da simulare ogni tipo di opera quale: rivestimenti di galleria, setti, piastre, geosintetici, dreni, tiranti, oggetti tesi a simulare l'interazione terreno-struttura o sollecitazioni esterne quali forze distribuite o concentrate. Il modello geometrico deve comprendere con analogia approssimazione oltre alla situazione iniziale, anche quelle situazioni che si verificano nelle varie fasi di calcolo (ad esempio per simulare le diverse fasi di costruzione).

Quando il modello geometrico completo è stato definito e tutte le componenti della geometria hanno le loro proprietà iniziali, può essere generata la mesh agli elementi finiti che si identifica con il modello FEM utilizzato.

Una volta definita la geometria, e quindi determinate le basi per la generazione delle mesh di calcolo, possono essere introdotti tutti gli ulteriori elementi presenti nel modello (elementi strutturali).

Una volta costruita la geometria, definiti ed assegnati i materiali a tutti i clusters di terreno, definiti ed assegnati i valori agli elementi beam presenti e posizionato il livello della falda corrispondente a quello di progetto, si è pronti per eseguire il calcolo delle tensioni in – situ e delle pressioni interstiziali iniziali.

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica					
		09	017	DR	005	2	GEO

Il momento immediatamente successivo è quello della definizione delle diverse fasi di scavo e attivazione dei vari elementi componenti il problema in esame. Questo si realizza nel modulo di calcolo che precede la fase del calcolo vero e proprio.

6.2.2 Cenni Sui Modelli Costituttivi Dei Terreni: Il Modello Hardening Soil e sul modello Soft Soil Creep

Già da alcuni anni il programma Plaxis, rende disponibile agli utenti un modello costitutivo denominato Hardening Soil, (HS) che consente di cogliere e riprodurre i principali aspetti del comportamento tenso-deformativi dei materiali naturali, con conseguenti vantaggi nella simulazione di problemi di natura geotecnica, soprattutto quelli di scavo.

Come per la maggioranza degli altri modelli costituttivi nel modello HSS il terreno è assimilato ad un mezzo poroso continuo, in modo da poter condurre analisi accoppiate. La caratteristica principale del legame costitutivo è la presenza di una superficie di snervamento chiusa (vedasi Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.) a cui è associata una legge di incrudimento isotropo regolata dalle deformazioni volumetriche plastiche (con legge flusso associato) e distorsionali plastiche (con legge di flusso non associato).

Le principali caratteristiche del modello HSS sono:

- differente legame costitutivo per percorsi tensionali di primo carico (verso l'esterno della superficie di snervamento) e di scarico-ricarico (all'interno della superficie di snervamento);
- sviluppo di deformazioni plastiche sia per aumento delle tensioni deviatoriche, con legge di flusso non associata, sia per aumento delle tensioni sferiche, con legge di flusso associata;
- criterio di rottura di tipo Mohr-Coulomb;

il modulo di rigidità secante E_{50} per percorsi tensionali di primo carico (verso l'esterno della superficie di snervamento) è funzione della tensione di confinamento applicata e della resistenza del materiale (Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.):

$$E_{50} = E_{50ref} \left[\frac{(c' \cos \varphi' - \sigma'_{min} \sin \varphi')}{(c' \cos \varphi' + p_{ref} \sin \varphi')} \right]^m$$

dove:

$p_{ref} = 100$ kPa è la pressione di riferimento,

σ'_{min} è la tensione efficace principale minore,

E_{50ref} è il modulo di rigidità secante alla pressione di riferimento ($\sigma'_{min} = p_{ref}$),

m è un coefficiente esponenziale che regola la dipendenza della rigidità dallo stato tensionale,

E_{50} è il modulo di rigidità secante (al 50% della rottura) riferito alla tensione σ'_{min} ;

il modulo di rigidità E_{ur} , che caratterizza i percorsi tensionali interni alla superficie di snervamento è funzione della tensione di confinamento applicata e della resistenza del materiale:

$$E_{ur} = E_{urref} \left[\frac{(c' \cos \varphi' - \sigma'_{min} \sin \varphi')}{(c' \cos \varphi' + p_{ref} \sin \varphi')} \right]^m ;$$

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica				
		09	017	DR	005	2

$$E_{ur} = E_{urref} \cdot k_{-1}$$

Dove:

- $p_{ref} = 100 \text{ kPa}$ è la pressione di riferimento,
- σ'_{min} è la tensione efficace principale minore,
- E_{urref} è il modulo di rigidezza secante alla pressione di riferimento ($\sigma'_{min} = p_{ref}$),
- m è un coefficiente esponenziale che regola la dipendenza della rigidezza dallo stato tensionale,
- E_{ur} è il modulo di rigidezza secante alla tensione σ'_{min} ;

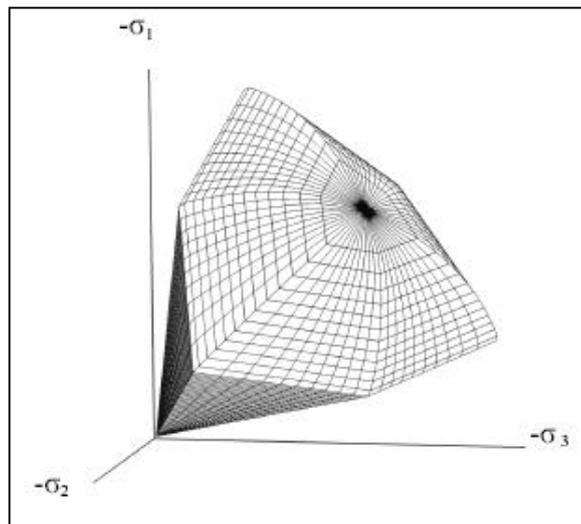


Figura 8 Superficie di snervamento chiusa (Hardening Soil model).

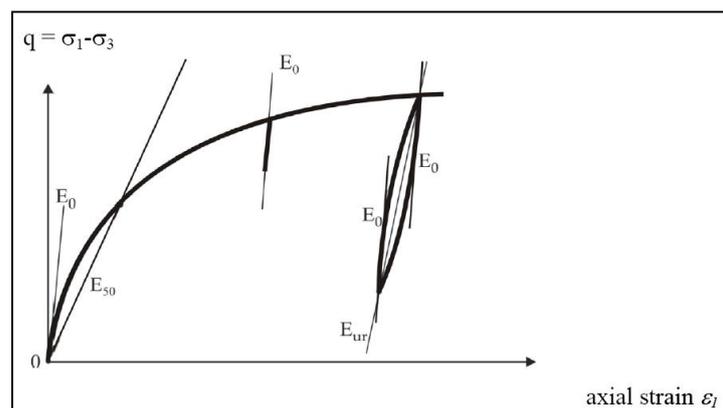


Figura 9 Definizione di E_0 , E_{50} e E_{ur} nel modello costitutivo "HS".

Il modello soft soil creep consente di descrivere bene il comportamento di terreni ad elevata compressibilità. Come dimostrato dalla letteratura scientifica, il modello Hardening Soil non riesce a riprodurre correttamente il comportamento deformativo di terreni con rapporto tra modulo edometrico alla pressione di riferimento E_{oedref} e il modulo tangente E_{50ref} inferiori a 0.5 ($E_{oedref}/E_{50ref} < 0.5$).

Per questo motivo è più pratico e corretto, quando si vogliono modellare terreni ad alta compressibilità, il Soft Soil Model, le cui caratteristiche principali sono:

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica				
		09	017	DR	005	2

- dipendenza logartmica della rigidità dallo stato tensionale;
- distinzione tra fase di primo carico e fase di scarico ricarico;
- memoria della tensione di preconsolidazione;
- superficie di rottura tipo Mohr Coulomb.

I parametri principali del modello sono essenzialmente:

- λ^* la rigidità in fase di primo carico
- κ^* la rigidità in fase di scarico ricarico

dipendenti dalla tensione sferica del materiale come esposto in figura seguente.

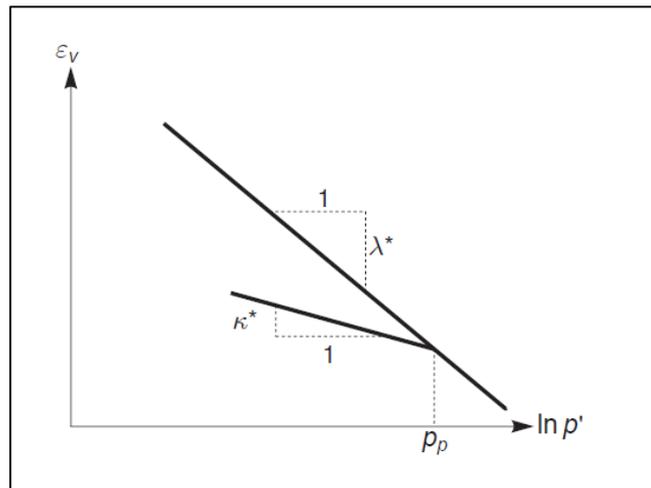


Figura 10 - dipendenza della rigidità dallo stato tensionale per il modello Soft Soil Creep

la funzione di snervamento è definita come

$$f = \bar{f} - p_p$$

in cui \bar{f} è una funzione dello stato tensionale e p_p è la tensione di preconsolidazione

la funzione \bar{f} è definita come

$$\bar{f} = \frac{\tilde{q}}{M^2(p' + c \cot \varphi)} + p'$$

in cui \tilde{q} è definita come per il modello Hardening soil. La pressione di preconsolidazione vale invece

$$p_p = p_p^0 \exp\left(\frac{-\varepsilon_v^p}{\lambda^* - \kappa^*}\right)$$

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI	Relazione geotecnica				
	LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	09	017	DR	005	2

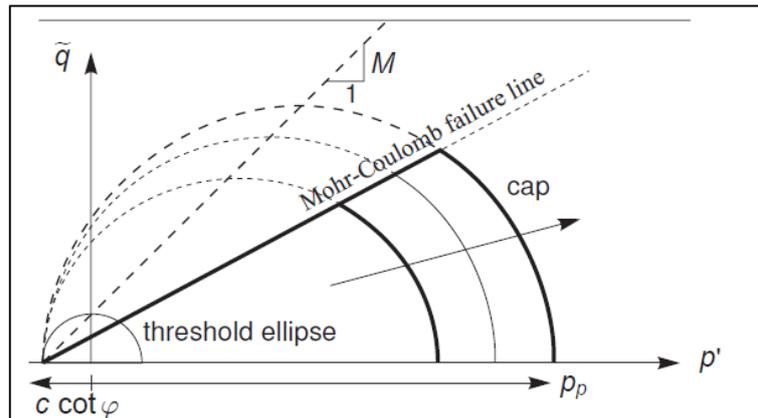


Figura 11. Superficie di snervamento modello Soft Soil

I parametri di rigidezza λ^* e κ^* sono correlabili all'indice di compressibilità (C_c) e all'indice di rigonfiamento (C_s) secondo le seguenti relazioni:

1. $\lambda^* = \frac{\lambda}{1+e}$	2. $\kappa^* = \frac{\kappa}{1+e}$
--------------------------------------	------------------------------------

Table 8.1b Relationship to internationally normalized parameters

3. $\lambda^* = \frac{C_c}{2.3(1+e)}$	4. $\kappa^* \approx \frac{2C_s}{2.3(1+e)}$
---------------------------------------	---

6.3 Modelli di calcolo

I terreni di fondazione sono stati schematizzati utilizzando un modello costitutivo "Hardening Soil" mentre i sedimenti sono stati schematizzati utilizzando il modello costitutivo Soft Soil Creep che consente di portare in conto anche le deformazioni viscosi nel tempo. Il modello Soft Soil Creep è tra l'altro equipollente per molti versi a modelli costitutivi che – nominalmente – sarebbero più adatti a descrivere il comportamento di materiali sabbiosi (ad esempio i modelli ipoplastici) . Si può dimostrare che con adeguate calibrazioni il modello Soft Soil fornisce risultati identici al modello costitutivo ipoelastico in termini di cedimenti di una colonna di materiale sottoposta al peso proprio e a carichi esterni verticali.

Si riportano di seguito le caratteristiche dei materiali utilizzati nelle analisi.

Si sottolinea che:

- il valore del coefficiente di consolidazione primaria C_c per i sedimenti è stato scelto compatibilmente alle indicazioni di normativa e tale che al termine delle analisi risultasse che, dovunque, l'indice dei vuoti "e" risultasse sempre superiore all'indice dei vuoti minimo "e_{min}"
- Il coefficiente di consolidazione secondaria C_α per il modello SSC è stato scelto utilizzando la relazione empirica che lo lega al coefficiente C_c tramite il rapporto C_α/C_c che per sabbie vale approssimativamente 0.015
- per tener conto degli effetti delle grandi deformazioni si è provveduto a rimuovere nel calcolo l'ipotesi di piccoli spostamenti, utilizzando la specifica opzione del programma di

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica				
		09	017	DR	005	2

calcolo “updated Mesh”. PLAXIS 2D infatti dispone di una formulazione lagrangiana aggiornata nella quale la discretizzazione temporale è associata al successivo aggiornamento della geometria della mesh.

- il peso per unità di volume dei sedimenti è stato mantenuto costante durante le analisi e pari a 19.4 kN/m^3 , pur se la successiva compattazione dei materiali ne induce un progressivo aumento. In una serie di analisi preliminari si è però potuto appurare che utilizzando il peso per unità di volume massimo (20.5 kN/m^3) i risultati finali variano solo del 4%, valore inferiore all'incertezza che rimane su altri parametri (come ad esempio sull'indice dei vuoti iniziale).

Property	Unit	Value	Value	Value
Material set				
Identification number		2	3	4
Identification		Depositi Marini Recenti	Panchina	Limi Calabriani
Material model		Hardening soil	Hardening soil	Hardening soil
Drainage type		Drained	Drained	Drained
Colour		 RGB 232, 234, 134	 RGB 255, 165, 56	 RGB 77, 224, 199
Comments				
General properties				
Y_{unsat}	kN/m^3		21.00	21.00
Y_{sat}	kN/m^3		21.00	21.00
Stiffness				
E_{50}^{ref}	kN/m^2		10.00E3	58.00E3
E_{oed}^{ref}	kN/m^2		10.00E3	58.00E3
E_{ur}^{ref}	kN/m^2		30.00E3	130.0E3
power (m)			0.5000	0.5000
Alternatives				
Use alternatives		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
C_c			0.03450	5.948E-3
C_s			0.01035	2.388E-3
e_{init}			0.5000	0.5000
Strength				

Figura 12. caratteristiche dei terreni di fondazione

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica				
		09	017	DR	005	2

Identification		
Material model	Soft soil creep	
Drainage type	Drained	
Colour	RGB 1, 218, 5	
Comments		
General properties		
V_{unsat}	kN/m ³	19.50
V_{sat}	kN/m ³	19.50
Advanced		
Void ratio		
Dilatancy cut-off	<input type="checkbox"/>	
e_{init}		0.6000
e_{min}		0.000
e_{max}		999.0
Stiffness		
λ^* (lambda*)		0.06793
κ^* (kappa*)		0.01359
μ^*		1.427E-3
Alternatives		
Use alternatives	<input checked="" type="checkbox"/>	
C_c		0.2500
C_s		0.02500
C_σ		5.250E-3
e_{init}		0.6000
Strength		
c_{ref}	kN/m ²	0.000
ϕ' (phi)	°	28.90
ψ (psi)	°	0.000
Advanced		
Set to default values	<input checked="" type="checkbox"/>	

Figura 13. Caratteristiche meccaniche dei sedimenti.

6.4 Fasi di calcolo

Per le diverse zone di calcolo le fasi di calcolo considerate sono :

Zona "Fossa"

0. generazione delle tensioni geostatiche iniziali;
1. fase di refluitamento 1;
2. inserimento del carico che simula l'ulteriore deposizione di materiale per recuperare i cedimenti provocati nella fase precedente.
 - $q = w_1 \times \gamma'$ in cui w_1 è il cedimento della testa della colonna calcolato al termine della fase 1 e γ' è il peso per unità di volume efficace dei sedimenti pari a 9.5 kN/m³;
3. attesa dell'inizio della fase successiva di refluitamento;
4. completamento della colmata (durata 70 giorni).

Zona "OVEST"

0. generazione delle tensioni geostatiche iniziali (quota piezometrica 0.0 m s.l.m.);
1. fase di refluitamento 1:
2. inserimento del carico che simula la ricarica per recuperare i cedimenti provocati nella fase precedente.
 - $q = w_1 \times \gamma'$ in cui w_1 è il cedimento della testa della colonna calcolato al termine della fase 1 e γ' è il peso per unità di volume efficace dei sedimenti pari a 9.5 kN/m³;

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica					
		09	017	DR	005	2	GEO

Zona "EST"

0. generazione delle tensioni geostatiche iniziali (quota piezometrica 0.0 m s.l.m.);
1. fase di refluentamento 1;
2. inserimento del carico che simula la ricarica per recuperare i cedimenti provocati nella fase precedente.
 - $q = w_1 \times \gamma'$ in cui w_1 è il cedimento della testa della colonna calcolato al termine della fase 1 e γ' è il peso per unità di volume efficace dei sedimenti pari a 9.5 kN/m^3 ;

Per ogni sezione di calcolo si provvederà inoltre a calcolare:

1. il cedimento al termine di ogni fase;
2. da 1. la variazione di volume stoccato rispetto al volume della vasca (il volume stoccabile in più è calcolabile come rapporto tra il cedimento finale e l'altezza della colonna di materiale).
3. il profilo dell'indice dei vuoti stimato lungo la colonna di sedimenti
4. il profilo dei pesi per unità di volume stimato lungo la colonna di sedimenti
5. il profilo della resistenza stimato (angolo di resistenza al taglio) lungo la colonna di sedimenti

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica					
		09	017	DR	005	2	GEO

6.5 Risultati delle analisi

6.5.1 Colonna "Fossa"

Si riportano di seguito i cedimenti della colonna al termine della fase 1 di refluitamento.

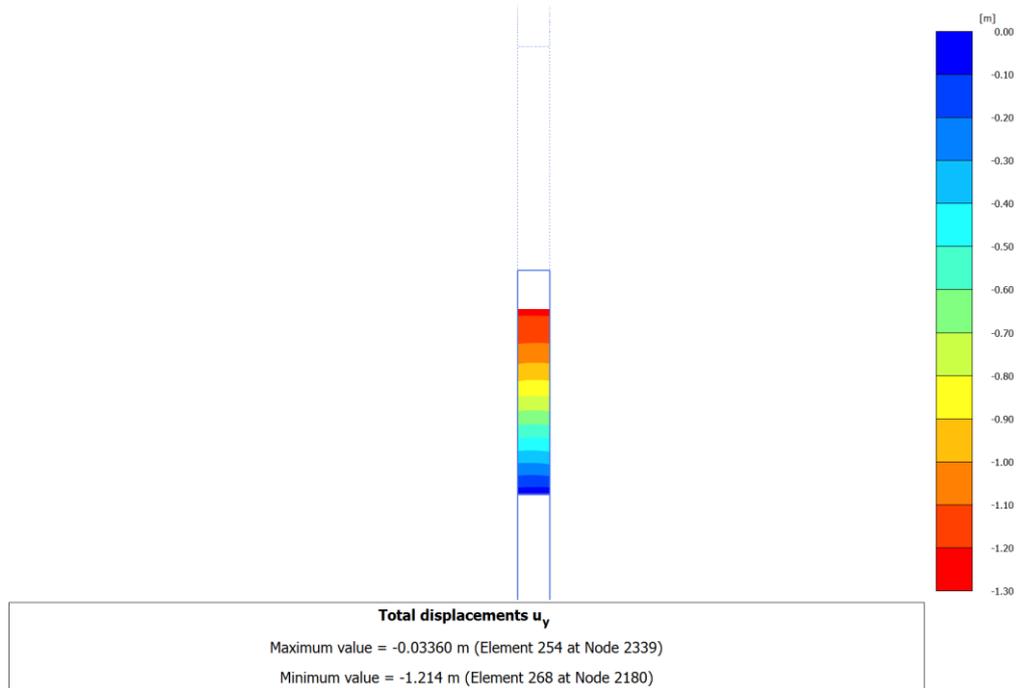


Figura 14. Cedimento colonna "Fossa" al termine della fase 1

Il cedimento in testa è pari a

$$w_1 = 1.2 \text{ m}$$

La ricarica per raggiungere la quota di progetto vale pertanto

$$q = 1.2 \times 9.5 = 11.4 \text{ kPa}$$

Si riportano di seguito i cedimenti della colonna al termine della fase 2 di refluitamento

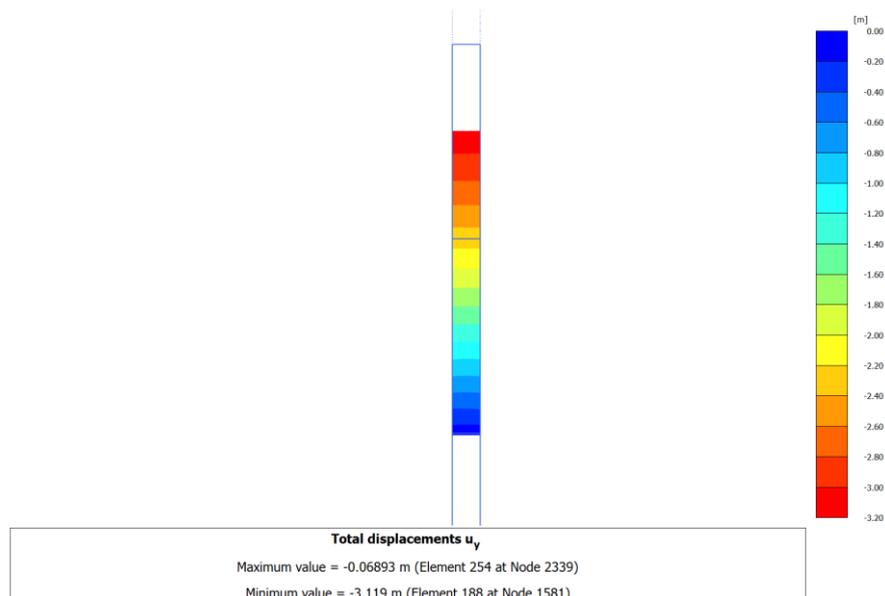


Figura 15. Cedimento colonna "Fossa" al termine della fase 2

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica				
		09	017	DR	005	2

Il cedimento finale vale

$$w_{fin} = 3.1 \text{ m}$$

Il volume ulteriormente sedimentabile nella zona, oltre al volume geometrico della vasca vale pertanto

$$\Delta V = \frac{w_{fin}}{h_{colonna}}$$

$$\Delta V = 3.1 / (13+1) = 3.1/14 = 22\%$$

Si riporta di seguito il profilo dell'indice dei vuoti al termine del riempimento e, successivamente, il profilo dell'angolo di resistenza al taglio dedotto secondo le procedure indicate al paragrafo 5.1.

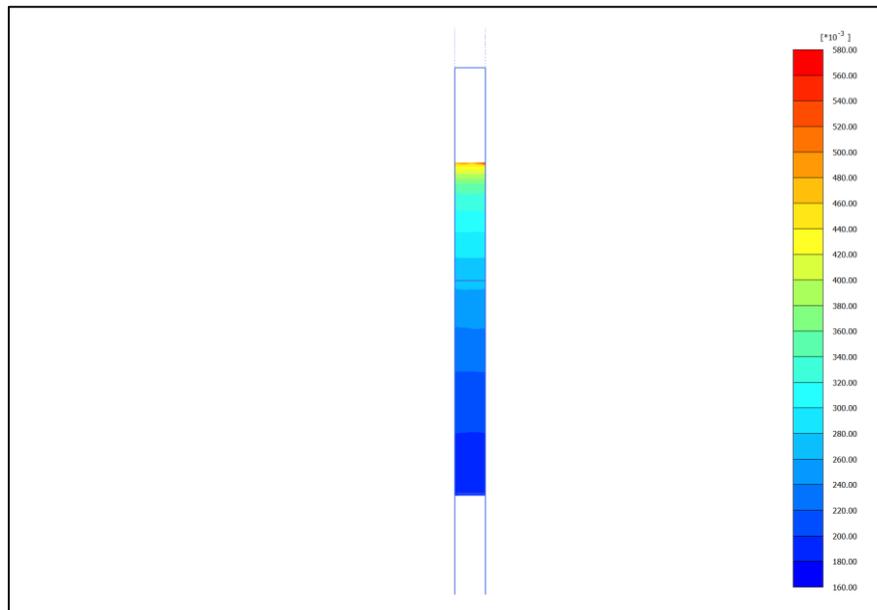


Figura 16. Profilo dell'indice dei vuoti per la colonna "Fossa"

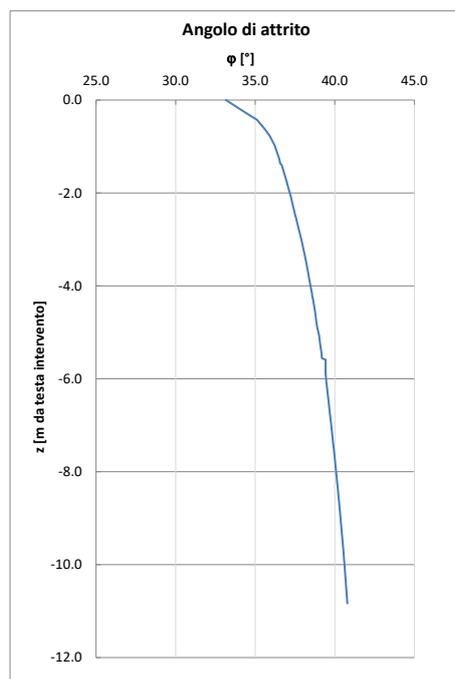


Figura 17. Angolo di resistenza al taglio, colonna "Fossa".

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica					
		09	017	DR	005	2	GEO

6.5.2 Colonna "Ovest"

Si riportano di seguito i cedimenti della colonna al termine della fase 1 di refluitamento.

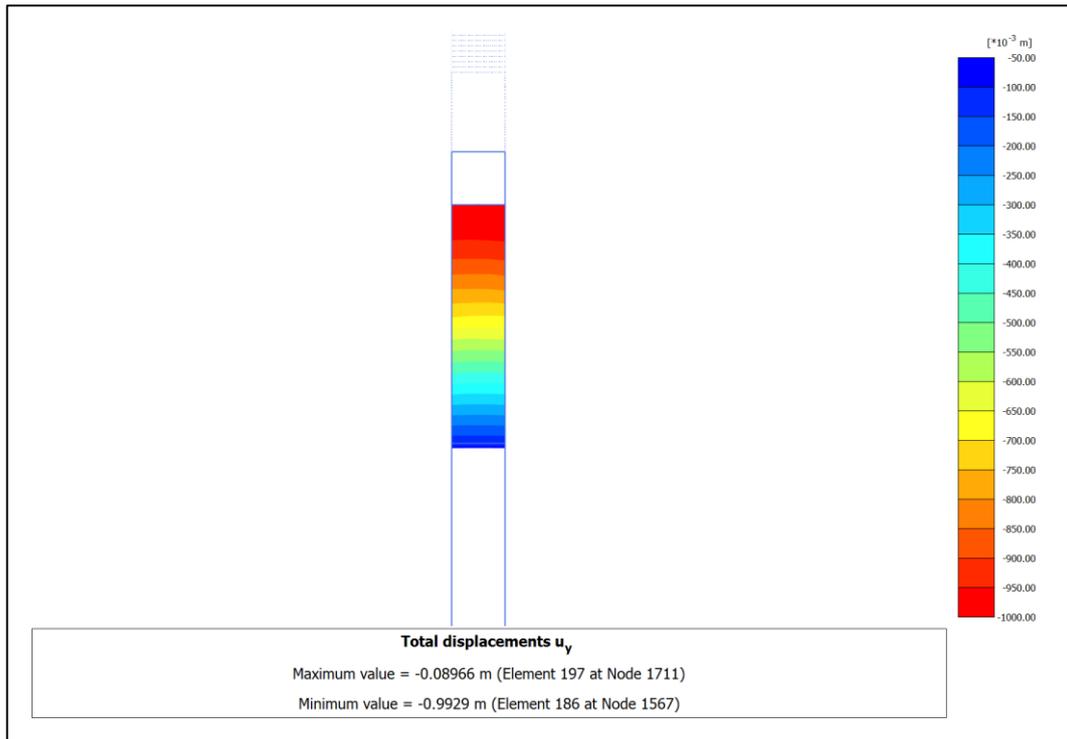


Figura 18. Cedimento colonna "Ovest" al termine della fase 1

Il cedimento in testa è pari a

$$w_1 = 1.0 \text{ m}$$

La ricarica per raggiungere la quota di progetto vale pertanto

$$q = 1.0 \times 9.5 = 9.5 \text{ kPa}$$

Si riportano di seguito i cedimenti della colonna al termine della fase 2 di refluitamento.

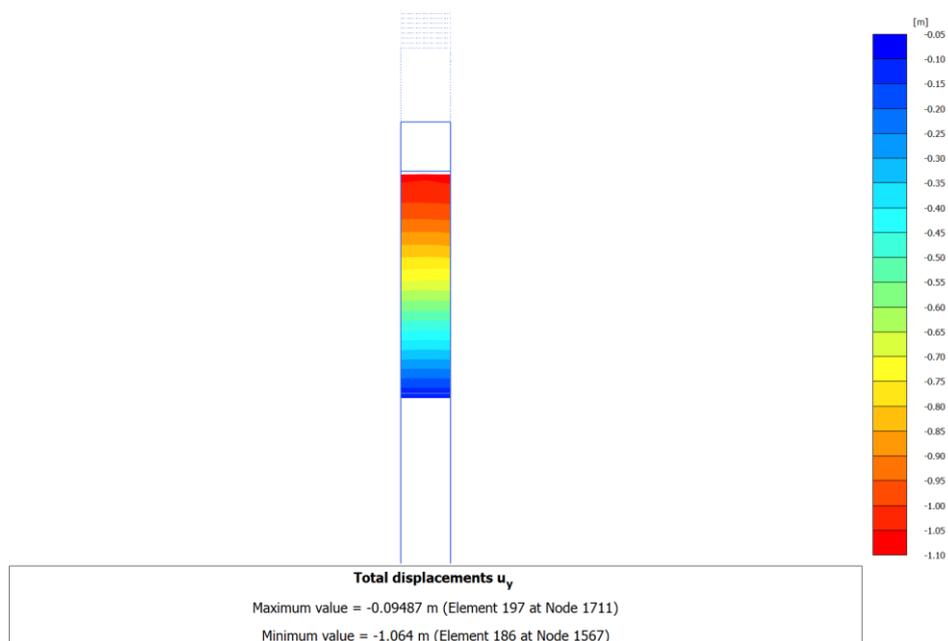


Figura 19. Cedimento colonna "Ovest" al termine della fase 2.

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica					
		09	017	DR	005	2	GEO

Il cedimento finale vale

$$w_{fin} = 1.0 \text{ m}$$

Il volume ulteriormente sedimentabile nella zona, oltre al volume geometrico della vasca vale pertanto

$$\Delta V = \frac{w_{fin}}{h_{colonna}}$$

$$\Delta V = 1.0 / (4.5+1) = 1/5.5 = 18\%$$

Si riporta di seguito il profilo dell'indice dei vuoti al termine del riempimento e, successivamente, il profilo dell'angolo di resistenza al taglio dedotto secondo le procedure indicate al paragrafo 5.1.

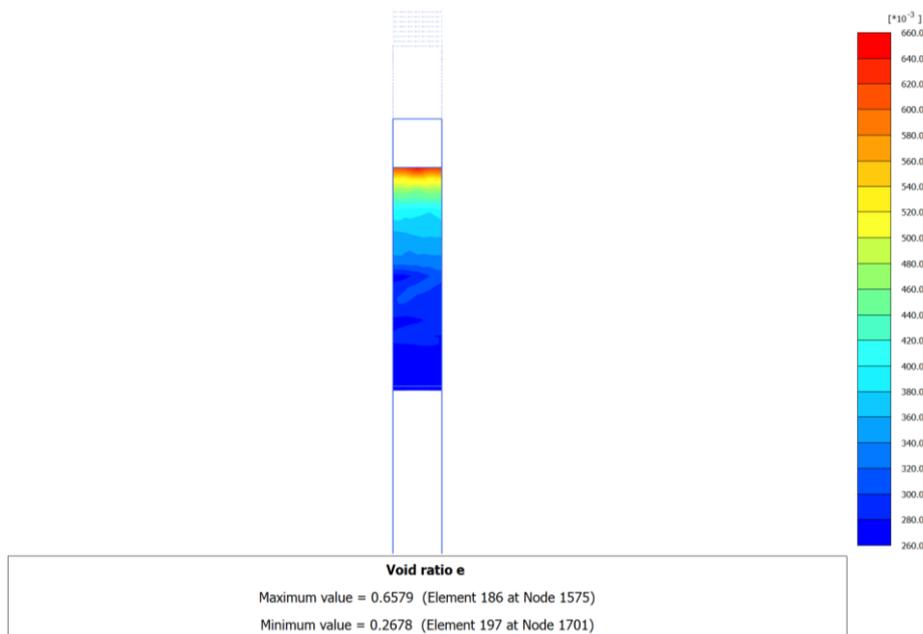


Figura 20. Profilo dell'indice dei vuoti per la colonna "Ovest"

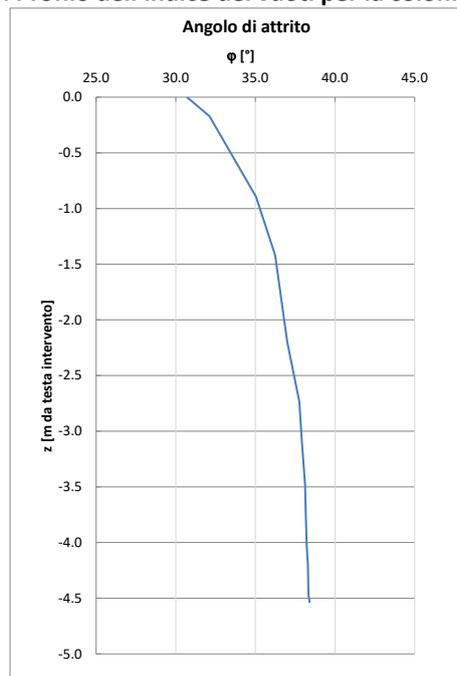


Figura 21. Angolo di resistenza al taglio, colonna "Ovest".

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica					
		09	017	DR	005	2	GEO

6.5.3 colonna "Est"

Si riportano di seguito i cedimenti della colonna al termine della fase 1 di refluentamento.

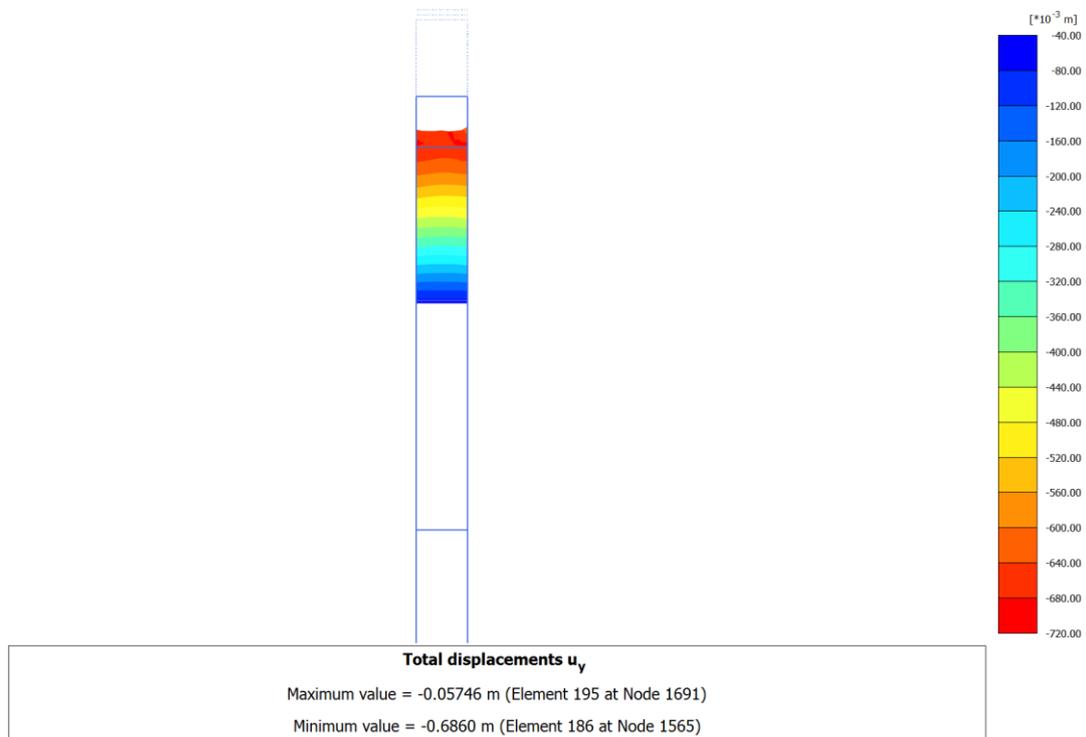


Figura 22. Cedimento colonna "Est" al termine della fase 1

Il cedimento in testa è pari a

$w_1 = 0.7$ m La ricarica per raggiungere la quota di progetto vale pertanto

$q = 0.7 \times 9.5 = 6.65$ kPa

Si riportano di seguito i cedimenti della colonna 1 al termine della fase 2 di refluentamento

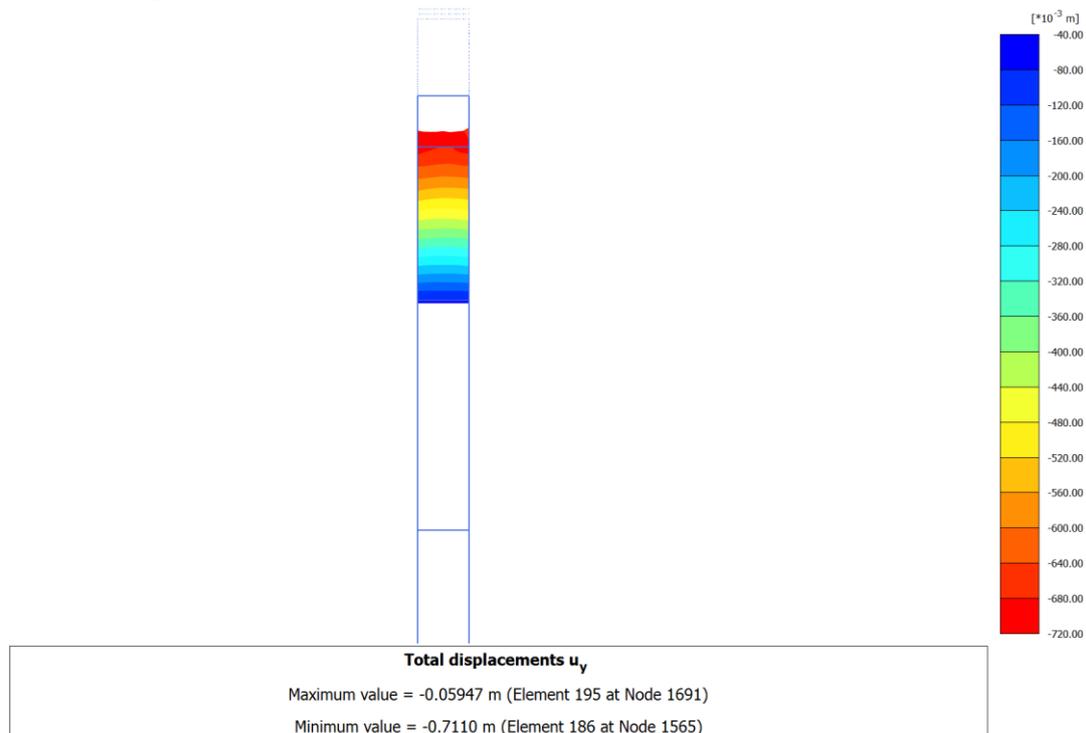


Figura 23. Cedimento colonna "Est" al termine della fase 2

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica					
		09	017	DR	005	2	GEO

Il cedimento finale vale

$$w_{fin} = 0.7 \text{ m}$$

Il volume ulteriormente sedimentabile nella zona, oltre al volume geometrico della vasca vale pertanto

$$\Delta V = \frac{w_{fin}}{h_{colonna}}$$

$$\Delta V = 0.7 / (3+1) = 0.7/4.0 = 17\%$$

Si riporta di seguito il profilo dell'indice dei vuoti al termine del riempimento e, successivamente, il profilo dell'angolo di resistenza al taglio dedotto secondo le procedure indicate al paragrafo 5.1.

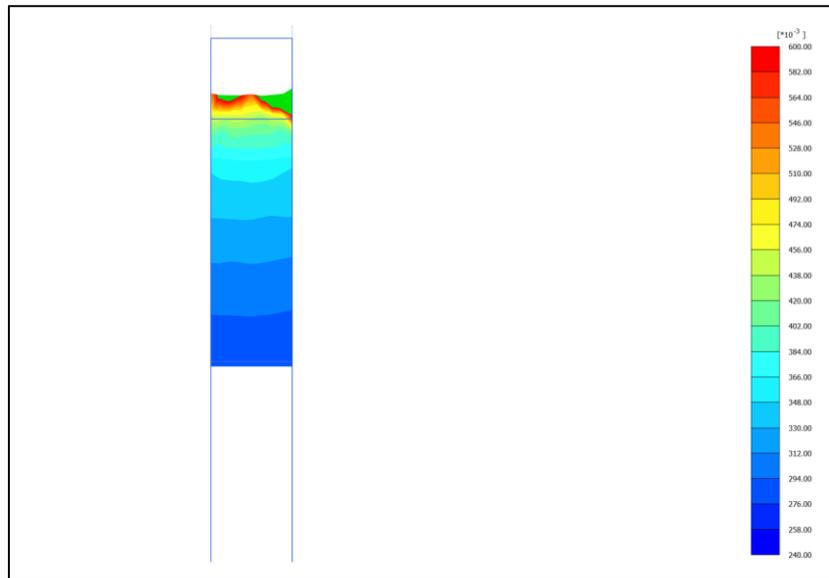


Figura 24. Profilo dell'indice dei vuoti per la colonna "Est"

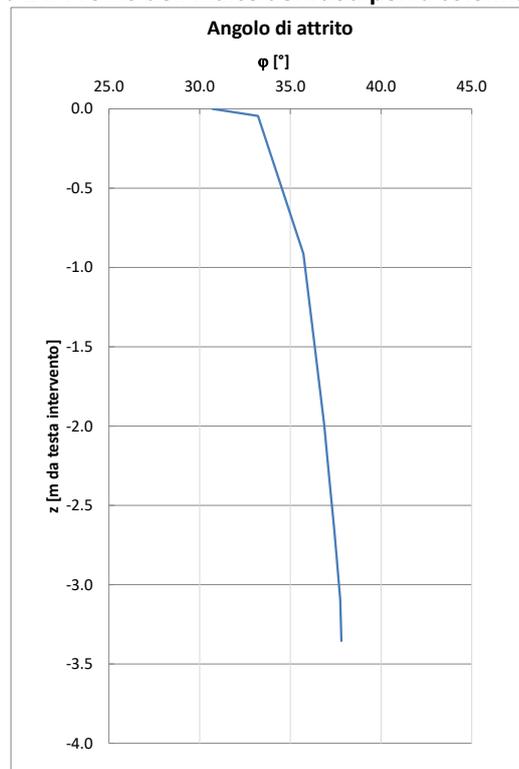


Figura 25. Peso per unità di volume dei sedimenti, colonna "Est".

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica				
		09	017	DR	005	2

6.6 Riepilogo dei risultati attesi

Nella seguente tabella si riepilogano i risultati dei calcoli le proprietà dei sedimenti al termine della realizzazione della colmata.

	w_{fin}	ΔV	$e_{max, fin}$	$e_{min, fin}$	φ_{max}	φ_{min}
	[m]	[%]	[-]	[-]	[°]	[°]
Sezione "Fossa"	3.1	22%	0.44	0.18	40.8	33.2
Sezione "Ovest"	1.0	18%	0.52	0.26	38.4	30.7
Sezione "Est"	0.7	17%	0.52	0.28	37.8	30.7

Tabella 3. Riepilogo dei risultati.

Viste le caratteristiche dei sedimenti ci si attende che all'incirca il 90% dei cedimenti si sviluppi durante il periodo di conferimento del materiale in colmata.

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica					
		09	017	DR	005	2	GEO

Capitolo 7 Tenuta idraulica della vasca

Il Ministero dell'Ambiente con decreto n. 254 del 21/06/2021 ha espresso giudizio positivo di compatibilità ambientale del progetto, con il rispetto delle condizioni ambientali di cui al parere della Commissione tecnica di verifica dell'impatto ambientale VIA e VAS n. 13 del 19 ottobre 2020. In particolare la condizione ambientale n.6 prevede che nella fase di progettazione esecutiva che: “Con riferimento alla tenuta idraulica della vasca, il Proponente dovrà analizzare i risultati delle indagini geognostiche all'interno dell'area svolte nell'ambito della progettazione esecutiva al fine della conferma dei parametri geologici e geotecnici stimati in via preliminare attraverso le indagini geologiche/geotecniche eseguite nelle aree limitrofe e dalle indagini geofisiche eseguite sull'area interessata dall'intervento. Nel caso in cui i risultati delle indagini geognostiche si discostino dai parametri stimati in via preliminare, sarà necessario valutare soluzioni alternative”.

Il presente progetto prevede che la tenuta idraulica sia laterale che inferiormente sia garantita da una paratia impermeabile che si estendendo fino alla profondità di -27.0 m s.l.m., penetrando per almeno 2.00 m nella formazione impermeabile di argille compatte Azzurre. (permeabilità equivalente ad un materiale di spessore pari a 1.00 m e con un coefficiente di permeabilità - k di 10^{-9} m/s) .

A luglio 2019 sono state eseguite delle prove geotecniche nella zona dove dovrà essere realizzata la nuova cassa di colmata tra il pontile petrolchimico e la Costa Morena Est del Porto di Brindisi.

In particolare, sono stati realizzati n.4 sondaggi geognostici; n.2 prove CPTU e prove di laboratorio su n.9 campioni indisturbati.

Al fine di determinare la permeabilità dei terreni sottostanti il fondale marino dell'area in oggetto sono state analizzate n.9 prove edometriche e le due prove CPTU.

7.1 Prove CPTU

L'elaborazione delle prove penetrometriche statiche con punta elettrica e misura delle pressioni interstiziali (CPTEU) permette sia di effettuare una classificazione dei terreni attraversati sia di ricavarne i principali parametri meccanici di resistenza e deformabilità.

La classificazione del terreno attraversato può essere infatti condotta, durante il movimento continuo di spinta, in base ai valori registrati della resistenza alla punta q_c e del cosiddetto *“friction ratio”* (rapporto di frizione) F_r , ovvero il rapporto percentuale tra resistenza laterale f_s ed alla punta q_c .

Dai risultati ottenuti è possibile stabilire che i terreni afferiscono alla categoria di terreni a grana fine a comportamento coesivo.

Inoltre, è possibile confrontare il valore della pressione neutra iniziale (u_0) con quella registrata durante la prova (u_2). Dal confronto tra la pressione interstiziale registrata durante la prova e quella idrostatica, è possibile definire la tipologia di permeabilità dello strato attraversato: se le 2 pressioni sono confrontabili lo strato è drenante, di contro, una pressione neutra in fase di

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica					
		09	017	DR	005	2	GEO

prova maggiore di quella iniziale denoterebbe la presenza di sovrappressioni interstiziali e quindi condizioni non drenate.

I grafici riportati di seguito mostrano come a partire da profondità maggiori di 15 m si possa considerare la presenza di strati non drenanti.

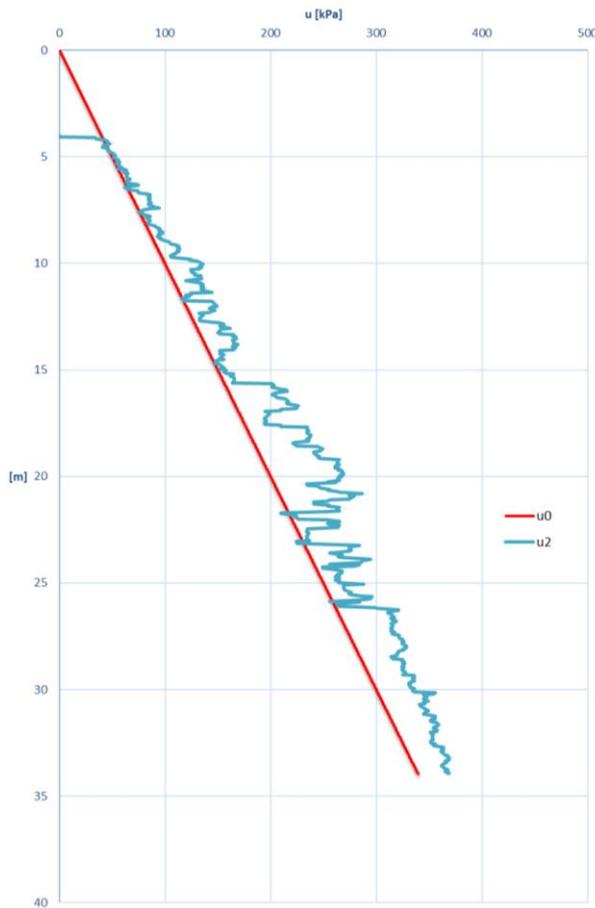


Figura 26. Confronto u0-u2 prova CPTU1

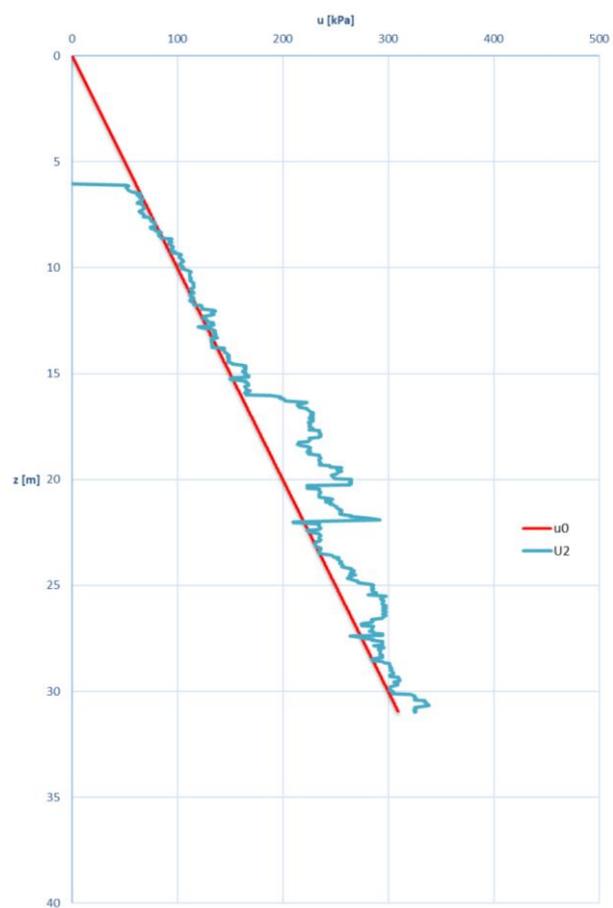


Figura 27. Confronto u0-u2 prova CPTU2

7.2 Prove edometriche

A completamento delle analisi di laboratorio sono state eseguite n.9 prove edometriche utili a determinare il modulo di deformazione edometrica e la permeabilità idraulica.

I valori di permeabilità sono stati valutati per lo step di carico pari ad una tensione efficace di 100 kPa, considerato come prossimo al carico di esercizio.

Il coefficiente di consolidazione verticale (C_v) è definito a partire dalle curve tempo-cedimento a carico costante, attraverso la costruzione del "log-time method". Una volta noto il coefficiente C_v e noto il modulo Edometrico (M) determinato per quel particolare step di carico, è possibile ricavare la permeabilità attraverso la seguente equazione:

$$k = \frac{C_v \cdot \gamma_w}{M}$$

Di seguito si riportano i valori così determinati per le n.9 prove edometriche eseguite su altrettanti campioni indisturbati.

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	<u>Ufficio di BRINDISI</u>		Relazione geotecnica					
	LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST		09	017	DR	005	2	GEO

Sondaggio	Campione	Unità	prof. (m)	P = 100 kPa	
				Ed (MPa)	k (m/s)
S1	C1	LSA	14,50	1,53	3,36E-11
S1	C2	LSA	28,00	4,11	1,08E-10
S1	C3	LSA	33,50	3,21	4,22E-11
S2	C1	LSA	18,00	8,03	1,05E-10
S2	C2	LSA	35,00	1,67	2,73E-11
S3	C1	LSA	15,30	1,32	1,44E-11
S3	C2	LSA	34,70	3,36	1,47E-10
S4	C1	LSA	18,00	9,72	7,51E-11
S4	C2	LSA	29,50	2,47	6,50E-12

Come mostrato in tabella, per profondità maggiori di 15 m risultano permeabilità con ordini di grandezza compresi tra 10^{-10} e 10^{-12} m/s e congruenti con la necessità di orizzonti stratigrafici a bassa permeabilità (inferiori a 10^{-9} m/s ipotizzati in progetto).

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica				
		09	017	DR	005	2

Capitolo 8 Verifiche di stabilità dell'argine nuovo canale

Il presente capitolo riporta le verifiche di stabilità della sistemazione dell'argine del nuovo canale. La planimetria e la sezione tipologica dell'intervento di sistemazione sono riportate nelle figure seguenti.

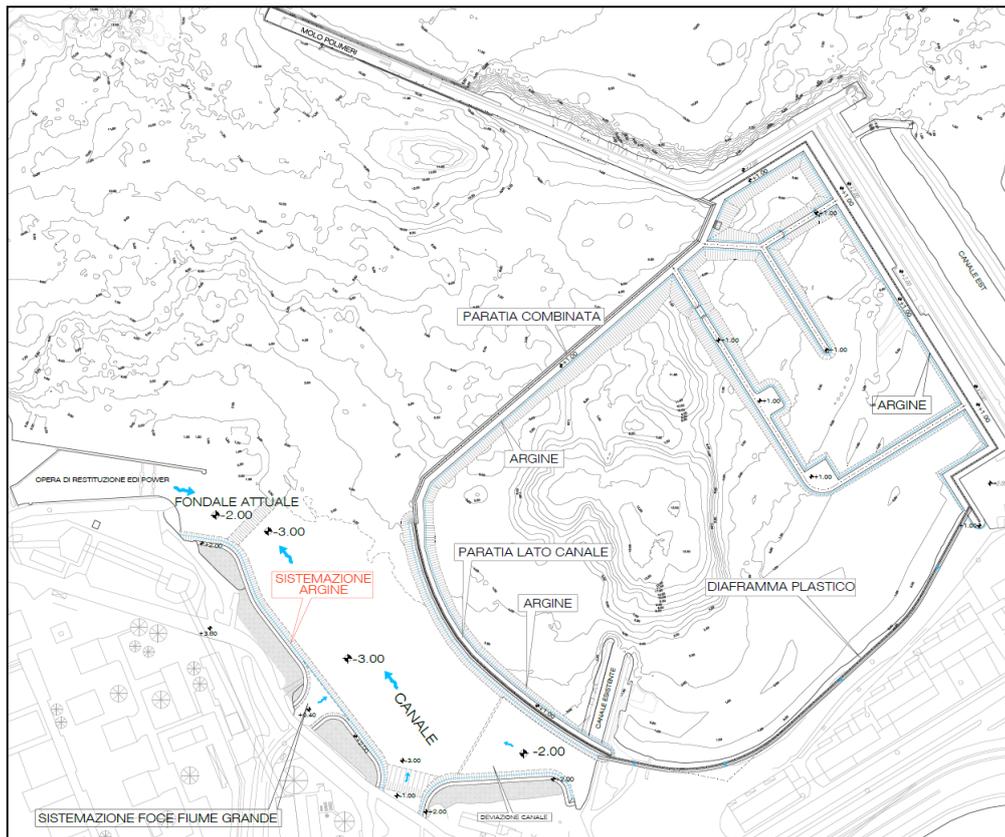


figura 8.1 – Planimetria sistemazione argine

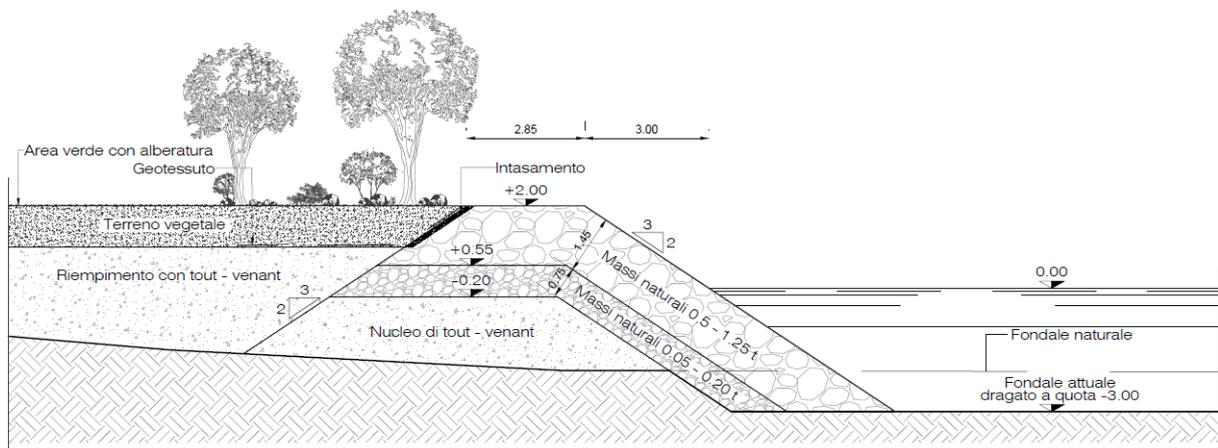


figura 8.2 – Sezione tipologica sistemazione argine

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI	Relazione geotecnica				
	LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	09	017	DR	005	2

8.1 Stratigrafia di calcolo e parametri geotecnici di modello

Di seguito si riportano in sintesi i parametri relativi alle caratteristiche stratigrafiche e geotecniche dei terreni interessati dall'opera assunti in accordo con il modello geotecnico delle opere della vasca; in particolare la stratigrafia di riferimento è quella dell'argine lato canale della vasca di colmata.

Argine			
Formazione	Quota sommità m s.l.m.	Quota fondo m s.l.m.	Spessore (m)
Superficiale - Unità "A"	-3.00	-5.00	2.00
"Panchina" - Unità "B"	-5.00	-6.00	1.00
Limi Calabriani - Unità "C1"	-6.00	-25.00	19.00
Argille Calabriane - Unità "C2"	-25.00	-	-

Massi naturali e Tout-venant (massi naturali e T-V da q.ta +2.00 m s.l.m. a q.ta fondale.):

$$\gamma = 21 \text{ kN/m}^3 \quad \phi' = 45^\circ \quad c' = 0 \text{ kPa}$$

$$v = 0.30 \quad K_a \text{ e } K_p \text{ (Met. Rankine)}$$

$$E_{vc}' = 7 \text{ Mpa} \quad E_{ur}' = 21 \text{ Mpa}$$

Strato Superficiale U. A (sabbia limosa da q. ta fondale a q.ta -5.00 m s.l.m.):

$$\gamma = 21 \text{ kN/m}^3 \quad \phi' = 28^\circ \quad c' = 0 \text{ kPa}$$

$$v = 0.35 \quad K_a \text{ e } K_p \text{ (Met. Rankine)}$$

$$E_{vc}' = 5 \text{ Mpa} \quad E_{ur}' = 15 \text{ Mpa}$$

Panchina (sabbie grossolana leggermente cementata - da q. ta -5.00 a q.ta -6.00 m s.l.m.) - Unità B:

$$\gamma = 21 \text{ kN/m}^3 \quad \phi' = 38^\circ \quad c' = 0 \text{ kPa}$$

$$v = 0.3 \quad K_a \text{ e } K_p \text{ (Met. Rankine)}$$

$$E_{vc} = 58 \text{ MPa} \quad E_{ur}' = 93 \text{ Mpa}$$

Limi Calabriani (argilla limosa compatta da q. ta -6.00 a q.ta -25.00 m s.l.m.) - Unità C1:

$$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3 \quad \phi' = 26^\circ \quad c' = 17 \text{ kPa}$$

$$v = 0.3 \quad K_a \text{ e } K_p \text{ (Met. Rankine)}$$

$$E_{vc} = 58 \text{ MPa} \quad E_{ur}' = 93 \text{ Mpa}$$

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica					
		09	017	DR	005	2	GEO

Argille Calabriani (argilla compatta da q.ta -25.00 m s.l.m.) - Unità C2:

$$\begin{aligned} \gamma &= 20 \text{ kN/m}^3 & \phi' &= 25^\circ & c' &= 25 \text{ kPa} \\ \nu &= 0.3 & K_a \text{ e } K_p & \text{(Met. Rankine)} & K_0 &= 0.398 \\ E_{vc} &= 12 \cdot (p'/p_a)^{0.5} & E_{ur}' &= 40 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

8.2 Criteri di verifica

Le verifiche di sicurezza relative agli stati limite ultimi (SLU) sono state effettuate in ottemperanza alla normativa nazionale "Norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 17/1/2018, secondo i criteri sotto riportati.

Per l'argine in massi naturali sono stati considerati i seguenti stati limite:

SLU di tipo geotecnico (GEO)

- Instabilità globale del sistema terreno-opera (A2+M2+R2)

Nelle verifiche nei confronti degli stati limite ultimi (SLU) deve essere rispettata la condizione:

$$E_d \leq R_d$$

dove E_d è il valore di progetto delle azioni o dell'effetto delle azioni e R_d è il valore di progetto della resistenza.

In condizioni statiche, i valori di progetto degli effetti delle azioni (E_d) devono essere determinati combinando il valore di azioni che si verificano simultaneamente nel modo seguente:

- *Combinazioni per situazioni persistenti e transitorie: valori di progetto delle azioni permanenti G_i e contemporanea presenza delle azioni variabili Q_j*

$$E_d = \sum_i \gamma_{G_i} G_{ik} + \gamma_{Q_k} (Q_{1k} + \sum_j \psi_{0j} Q_{jk})$$

assumendo per i coefficienti parziali γ_G e γ_Q e per i coefficienti di combinazione ψ_{0j} i valori in seguito indicati.

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI	Relazione geotecnica				
	LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	09	017	DR	005	2

Tab. 6.2.I – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni

	Effetto	Coefficiente Parziale γ_F (o γ_E)	EQU	(A1)	(A2)
Carichi permanenti G_1	Favorevole	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti $G_2^{(1)}$	Favorevole	γ_{G2}	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevole	γ_Q	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

⁽¹⁾ Per i carichi permanenti G_2 si applica quanto indicato alla Tabella 2.6.I. Per la spinta delle terre si fa riferimento ai coefficienti γ_{G1}

Tab. 6.2.II – Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

Parametro	Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale	Coefficiente parziale γ_M	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \phi'_k$	γ_ϕ	1,0	1,25
Coesione efficace	c'_k	γ_c	1,0	1,25
Resistenza non drenata	c_{uk}	γ_{cu}	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	γ_r	γ_γ	1,0	1,0

Tab. 6.8.I - Coefficienti parziali per le verifiche di sicurezza di opere di materiali sciolti e di fronti di scavo

COEFFICIENTE	R2
γ_R	1,1

Per quanto riguarda il caso in esame non sono presenti sovraccarichi accidentali.

In condizioni sismiche, i valori di progetto degli effetti delle azioni (E_d) devono essere determinati combinando il valore di azioni che si verificano simultaneamente nel modo seguente:

- combinazioni per situazioni di progetto sismiche (SLU -EQK): valori caratteristici delle azioni permanenti G_i con i valori frequenti delle azioni variabili Q_j e con il valore di progetto dell'azione sismica A_{Ed}

$$F_d = \sum_i G_{ik} + \gamma_I A_{Ed} + \sum_j \psi_{2j} Q_{jk}$$

assumendo per i coefficienti parziali γ_G e γ_Q il valore pari a 1.

Per le verifiche sismiche i coefficienti parziali A ed M sono tutti uguali a 1.

Per la presenza di acqua libera è necessario tenere in conto della sovrappressione dell'acqua dovuta all'effetto idrodinamico, avente risultante pari a:

$$E_{d,w} = \mp \frac{7}{12} k_h \gamma_w h^2$$

essendo h l'altezza del pelo libero dalla quota del fondale.

Per le verifiche di stabilità globale in condizioni sismiche sono stati applicati i seguenti coefficienti:

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica				
		09	017	DR	005	2

$$k_h = \beta_s \cdot \frac{a_{max}}{g}$$

$$k_v = \pm 0,5 \cdot k_h$$

dove

β_s = coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito;
 a_{max} = accelerazione orizzontale massima attesa al sito;
 g = accelerazione di gravità.

dove

$$\beta_s = 0.38 \text{ nelle verifiche dello stato limite ultimo (SLV)}$$

$$\gamma_R = 1.2.$$

(§ 7.11.4)

8.3 calcolo e verifica della sezione di progetto

Per i calcoli di verifica è stato utilizzato il software specialistico PARATIE PLUS di Harpaceas Srl.

Per la verifica di stabilità globale è stata applicato il metodo dell'equilibrio limite attraverso il metodo dei conci. Benché il grado di stabilità di un pendio sia legato alle deformazioni che esso manifesta, le analisi di stabilità sono basate su metodi che considerano solo l'equilibrio delle forze in gioco. Il metodo si basa sul confronto tra forze resistenti e forze agenti e sulla definizione di un fattore di sicurezza dato dal loro rapporto. Il corpo è considerato rigido, senza tener conto di deformazioni o spostamenti, la superficie di rottura è nota a priori. Il metodo richiede soltanto di determinare i criteri di resistenza del materiale lungo la superficie di rottura. I metodi dell'equilibrio limite si basano sul presupposto che è necessario che siano soddisfatte le condizioni di equilibrio e il criterio di resistenza (che determina le condizioni di collasso), ma che le condizioni di congruenza e di compatibilità degli spostamenti possano essere ignorate. Esistono diverse applicazioni di questo metodo ma tutte hanno in comune le seguenti assunzioni:

- le superfici di rottura sono delle superfici di scivolamento pre-definite, quindi l'analisi di stabilità è effettuata considerando l'equilibrio della massa di terreno individuata da tale superficie sottoposta alle forze di contorno;
- la legge costitutiva lungo la superficie di rottura è assunta rigida – perfettamente plastica mentre quella del materiale è rigida.
- la resistenza al taglio lungo la superficie di scivolamento è calcolata attraverso le equazioni della statica;
- quando il pendio non è omogeneo ed esistono condizioni di flusso difficilmente schematizzabili, si ricorre a metodi che suddividono la massa interessata in conci per ogni concio valgono le assunzioni precedenti.

In particolare è stato applicato, a favore della sicurezza, il metodo di Bishop semplificato in cui, nelle equazioni di equilibrio, vengono trascurate le forze di taglio tra i conci.

Al metodo di Bishop semplificato è stato applicato l'Approccio di progetto A2+M2+R2 con R2 = 1.1 in condizioni statiche e l'Approccio di progetto 1.0+1.0+R2 con R2 = 1.2 in condizioni sismiche (vedi i criteri di verifica indicati nel §8.2 della relazione).

Nelle figure seguenti si riportano gli esiti delle verifiche svolte per la condizione statica e per la condizione sismica, rappresentate dal valore del coefficiente di sicurezza F_s minimo riferito alla superficie di scorrimento critica ottenuto dal modello di calcolo. Il modello di calcolo considera un valore unitario del coefficiente parziale applicato alla resistenza ($R1$), per tale motivo per

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	<u>Ufficio di BRINDISI</u> LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica					
		09	017	DR	005	2	GEO

ottenere il valore del coefficiente di sicurezza secondo le NTC basta applicare il coefficiente R2 al valore di F_s ottenuto.

Nella tabella riassuntiva si riporta, per le verifiche svolte, nella prima colonna il coefficiente di sicurezza F_s sopra descritto che risulta dal modello di calcolo senza applicare il coefficiente di riduzione delle resistenze offerte, mentre nella seconda colonna si riportata il corrispondente valore del coefficiente di sicurezza ottenuto applicando alla resistenza del terreno il coefficiente R2 della Normativa vigente.

Dai risultati delle analisi, le condizioni di stabilità dell'argine risultano soddisfatte.

Tabella 8-1 - Risultati delle verifiche di tipo stabilità di insieme (GEO) agli stati limite ultimi

	F_s minimo	Rd/Ed SLU (GEO): (A2+M2+R2) SLU-EQK (GEO): (1.0+1.0+R2)
Verifica SLU (GEO) Condizione statica	1.223	1.112
Verifica SLU-EQK (GEO) Condizione sismica	1.390	1.158

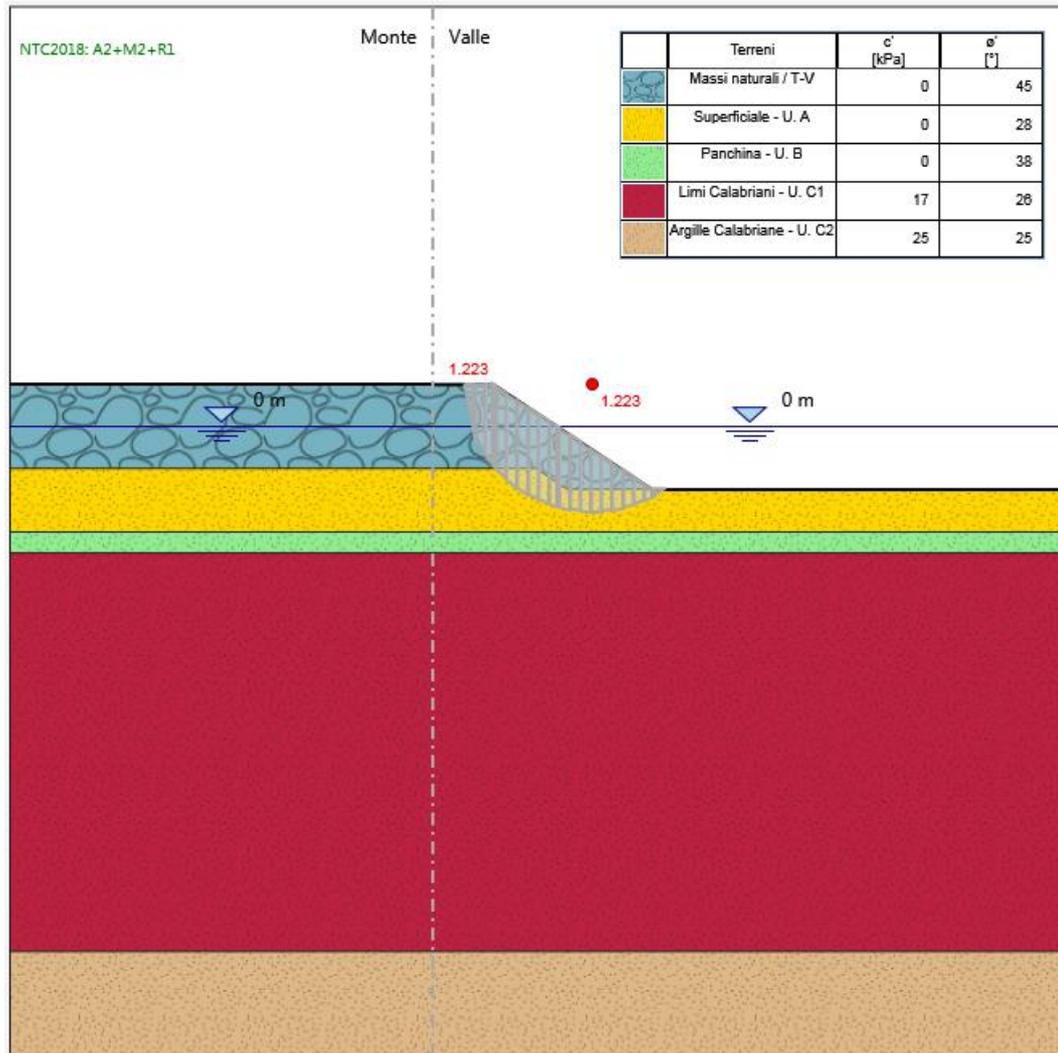


figura 8.3 –Valore del coefficiente di sicurezza minimo (F_s) ottenuto in riferimento alla superficie di scorrimento critica per la verifica di stabilità di globale in condizioni statiche

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica					
		09	017	DR	005	2	GEO

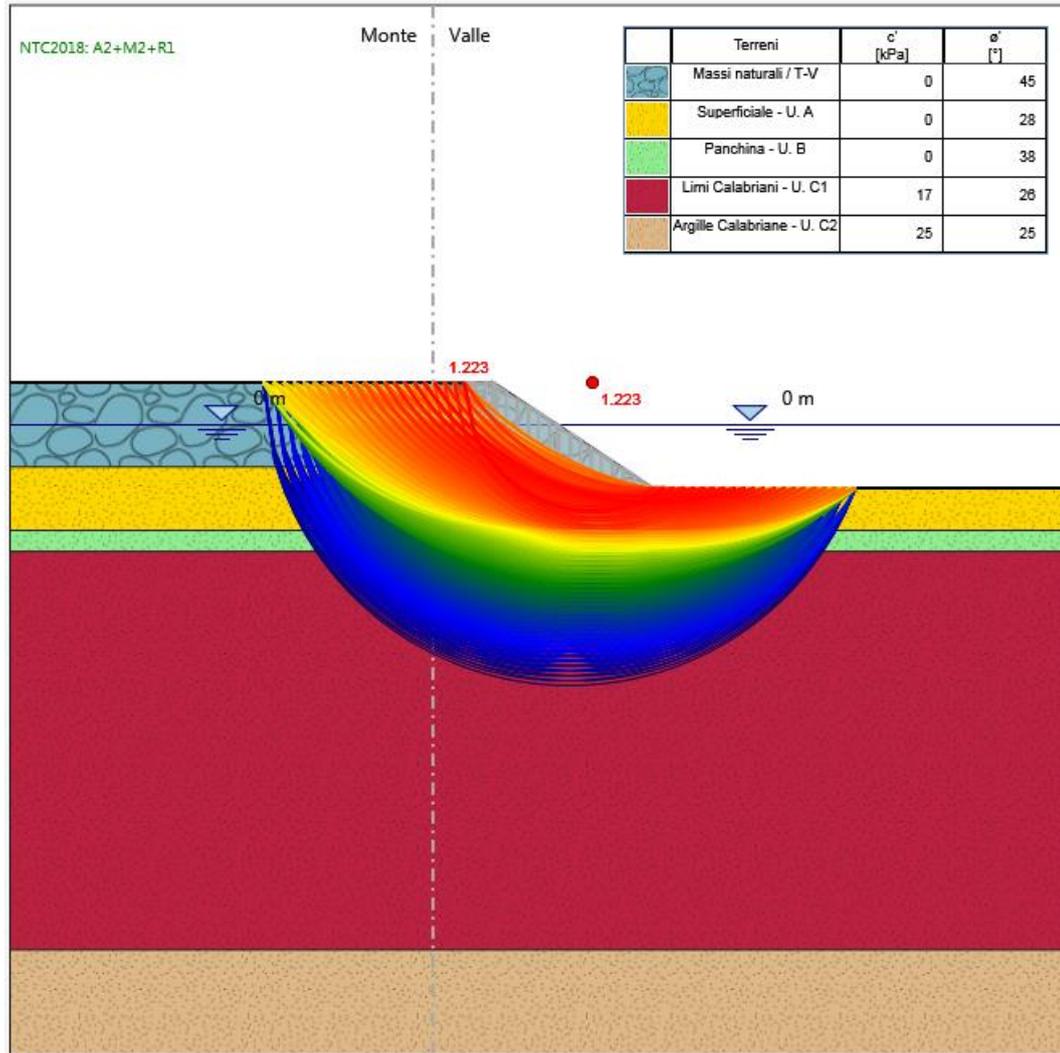


figura 8.4 –Valore del coefficiente di sicurezza minimo (F_s) ottenuto in riferimento alla superficie di scorrimento critica e superfici critiche analizzate per la verifica di stabilità di globale in condizioni statiche

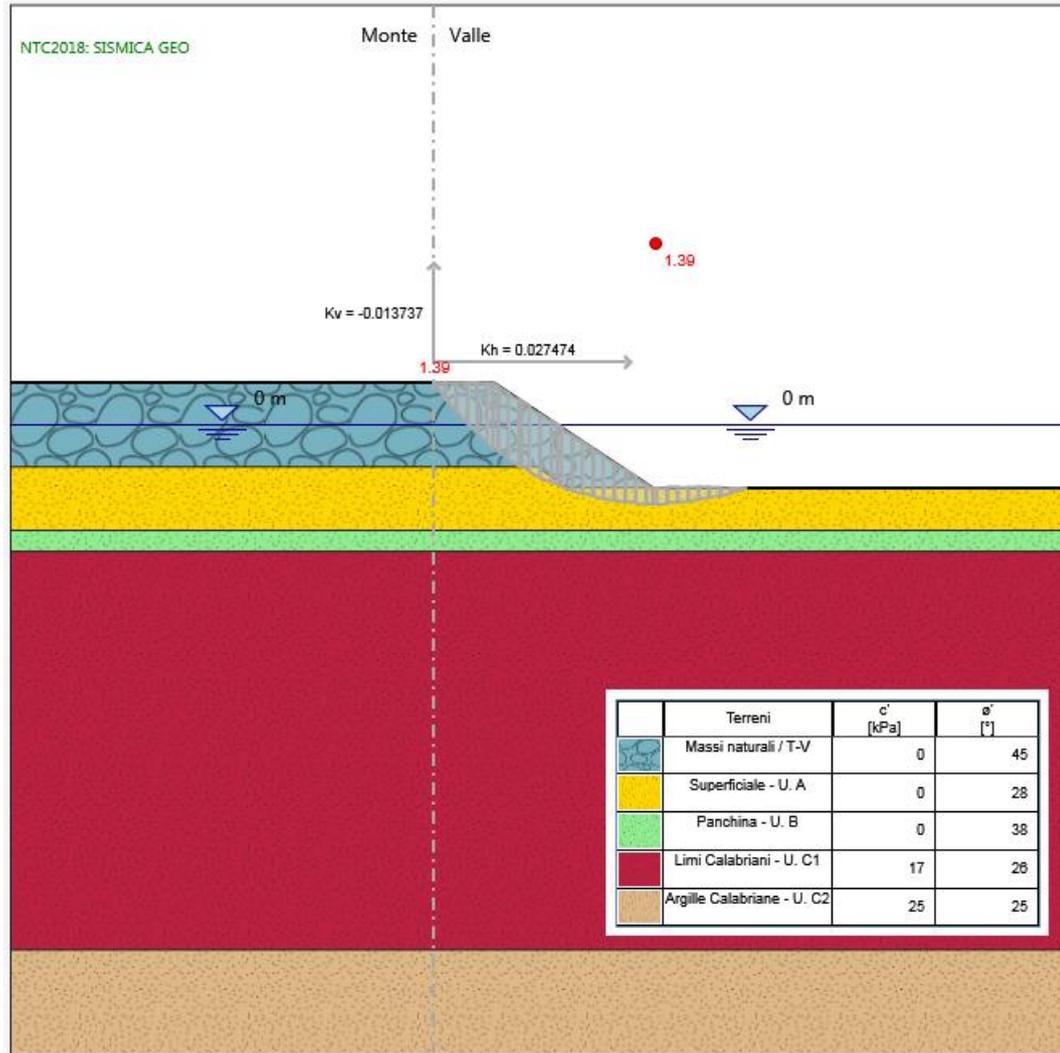


figura 8.5 –Valore del coefficiente di sicurezza minimo (F_s) ottenuto in riferimento alla superficie di scorrimento critica per la verifica di stabilità di globale in condizioni sismiche

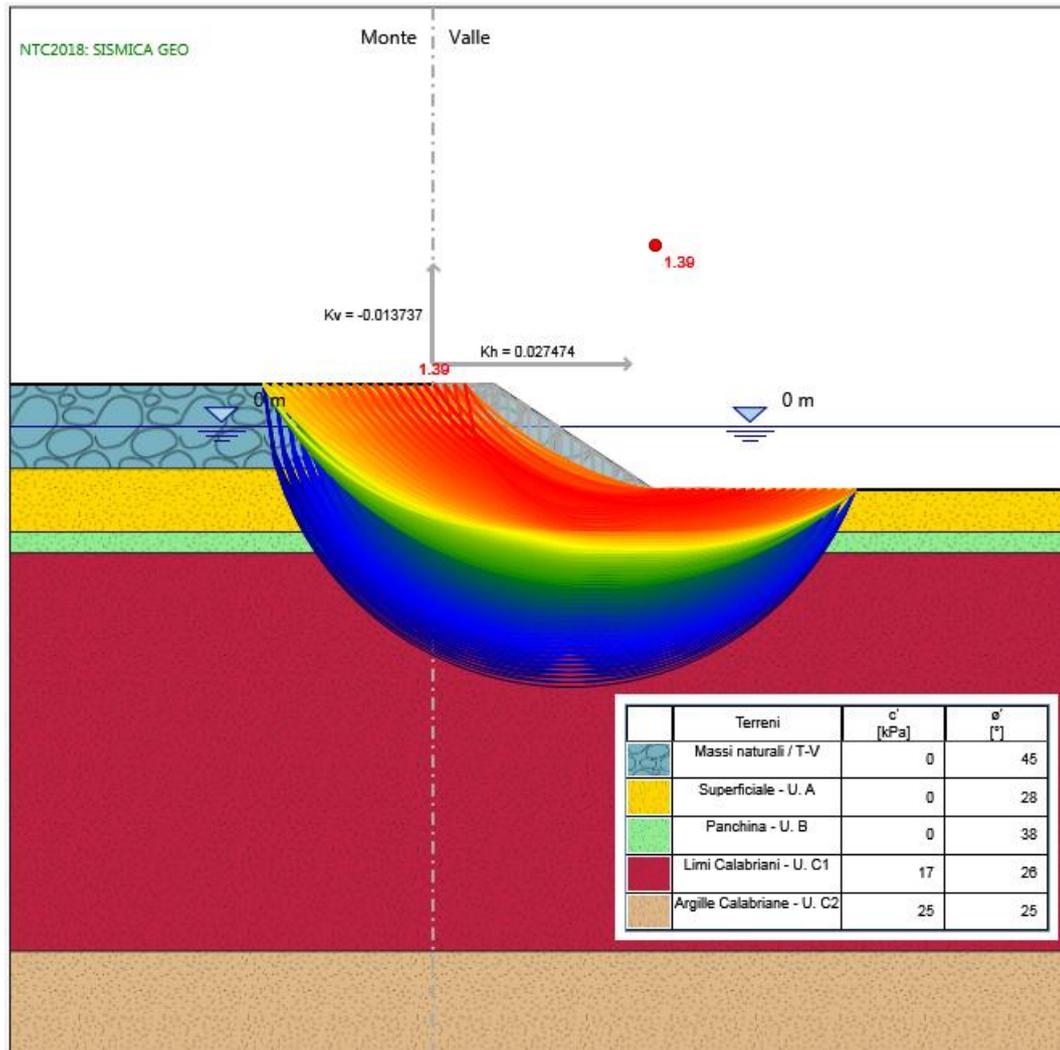


figura 8.6 –Valore del coefficiente di sicurezza minimo (F_s) ottenuto in riferimento alla superficie di scorrimento critica e superfici critiche analizzate per la verifica di stabilità di globale in condizioni sismiche

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica					
		09	017	DR	005	2	GEO

Capitolo 9 Verifiche di stabilità del versante in prossimità dell'area P.G.3

Il presente capitolo riporta le verifiche di stabilità del versante dell'area classificata dal PAI (Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Meridionale Sede Puglia – AdBP) come Area a pericolosità geomorfologica molto elevata (P.G. 3) che lambisce la nuova vasca di colmata come riportato nella figura seguente.



figura 9.1 – Zone a Pericolosità Geomorfologica elevata P.G.3 (verde) – AdB WebGIS

A seguito di una campagna di rilievo topografico (1m x 1m), eseguita nel 2009 dal Ministero dell'Ambiente con la tecnologia LIDAR, sono state elaborate n.5 sezioni trasversali rappresentative del tratto di costa interessato dall'intervento. Le sezioni interessate dalla presente verifica di stabilità sono le sezioni n°3, n°4 e n°5, di cui si riporta nella figura seguente l'ubicazione planimetrica e la sezione di rilievo.

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica				
		09	017	DR	005	2

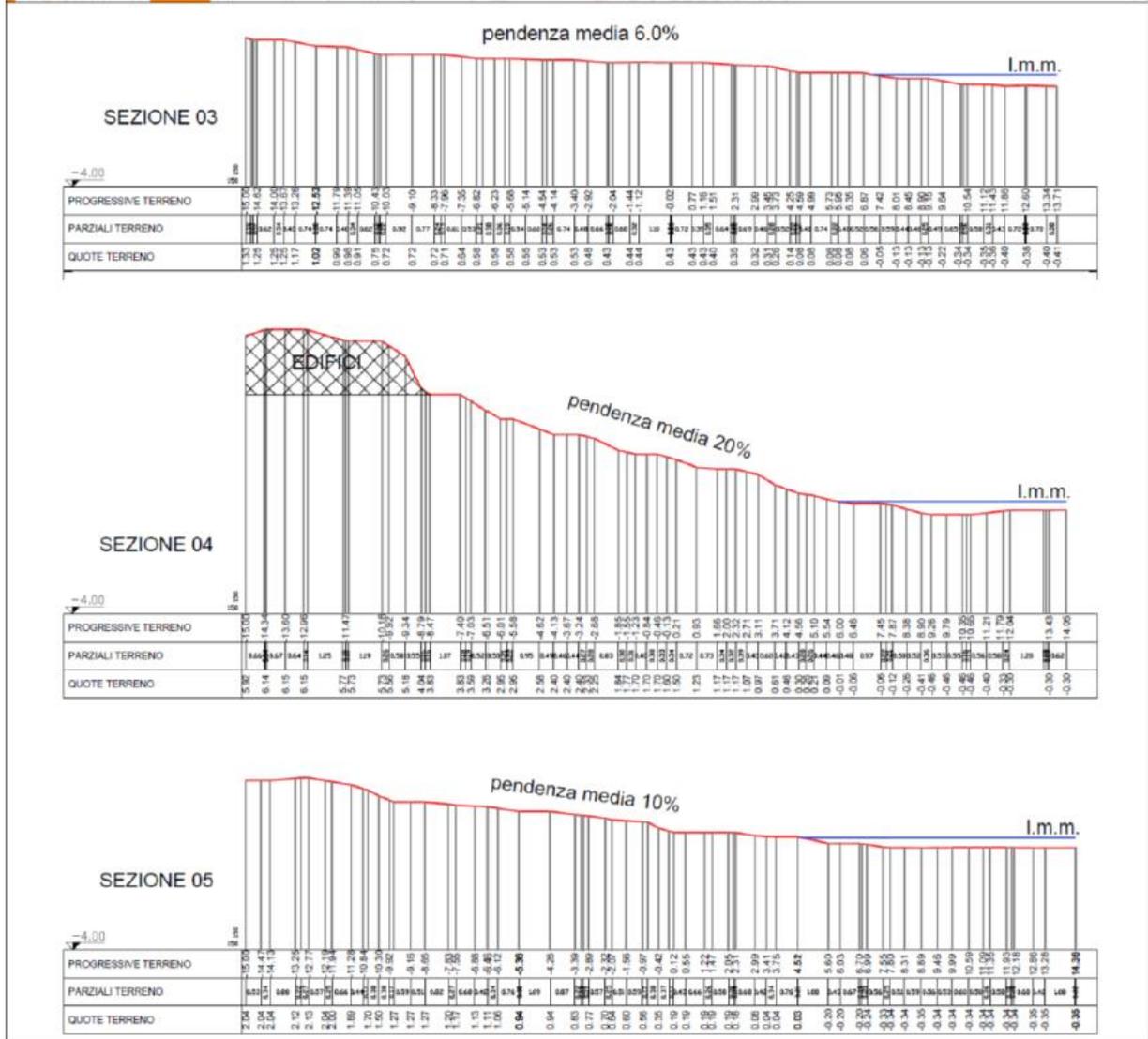
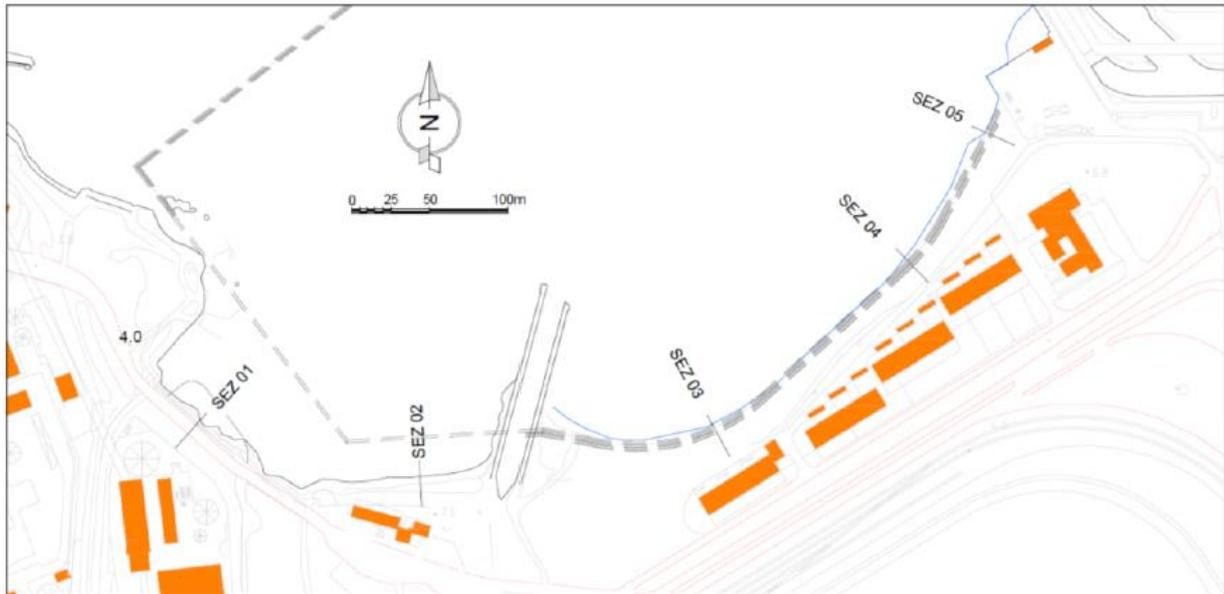


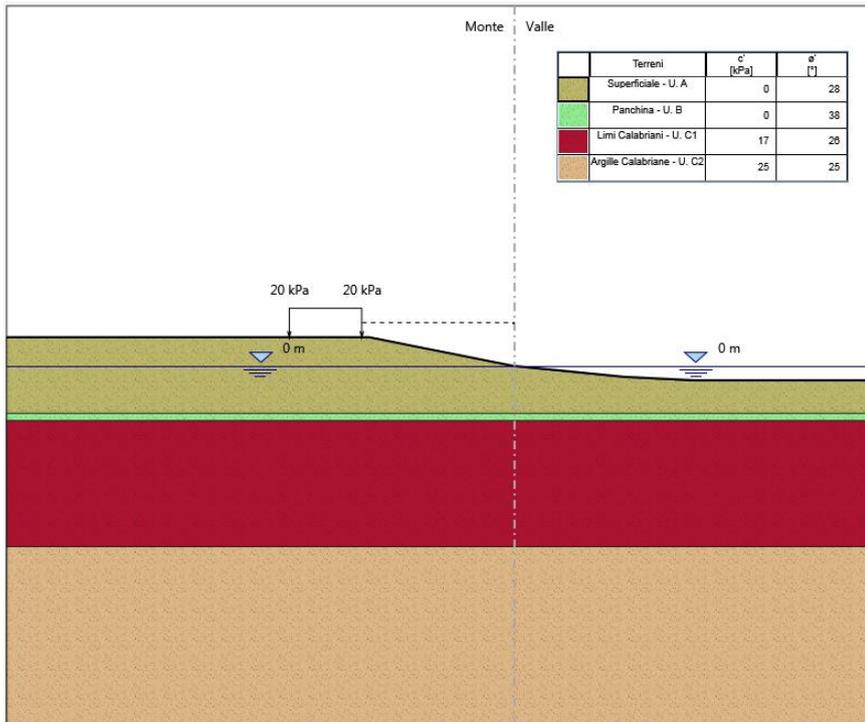
figura 9.2 – Sezione trasversali da 3 a 5 afferenti al tratto di costa di progetto - fonte: Ministero dell'Ambiente - progetto LIDAR

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica				
		09	017	DR	005	2

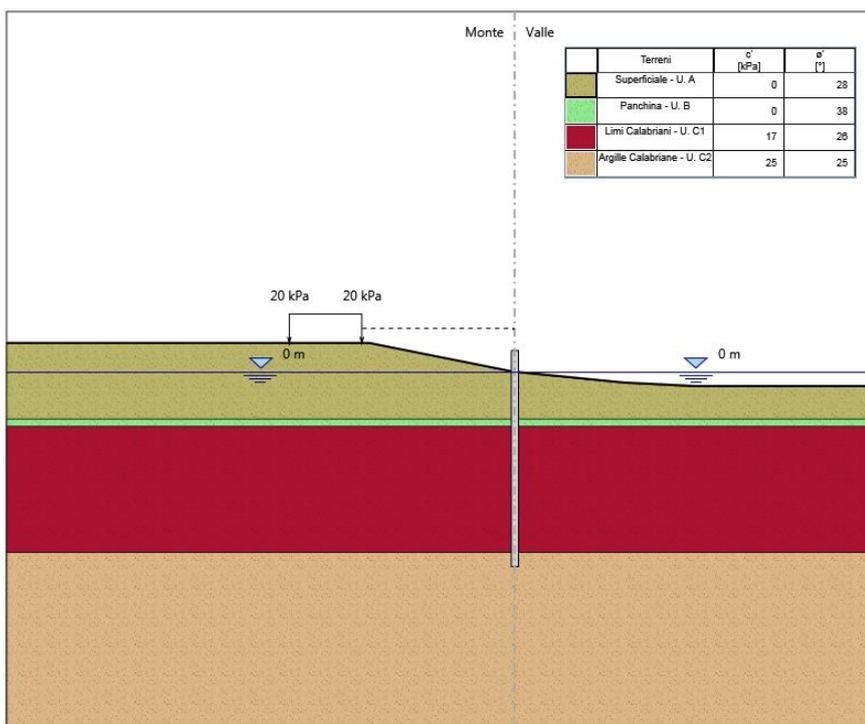
Le sezioni riportate mostrano una pendenza del versante variabile tra il 6% e il 20%; a scopo cautelativo si è assunta la sezione 04 come sezione di verifica del versante in quanto è quella che presenta la massima pendenza del versante del 20% e include la presenza di edifici (abitazioni terra cielo monopiano disabitate) che sono stati simulati a scopo cautelativo come un sovraccarico variabile uniformemente distribuito pari a 20 kN/m².

Le verifiche sono state condotte confrontando le seguenti fasi realizzative:

- **Stato attuale:** le verifiche di stabilità sono condotte sul profilo attuale del versante.

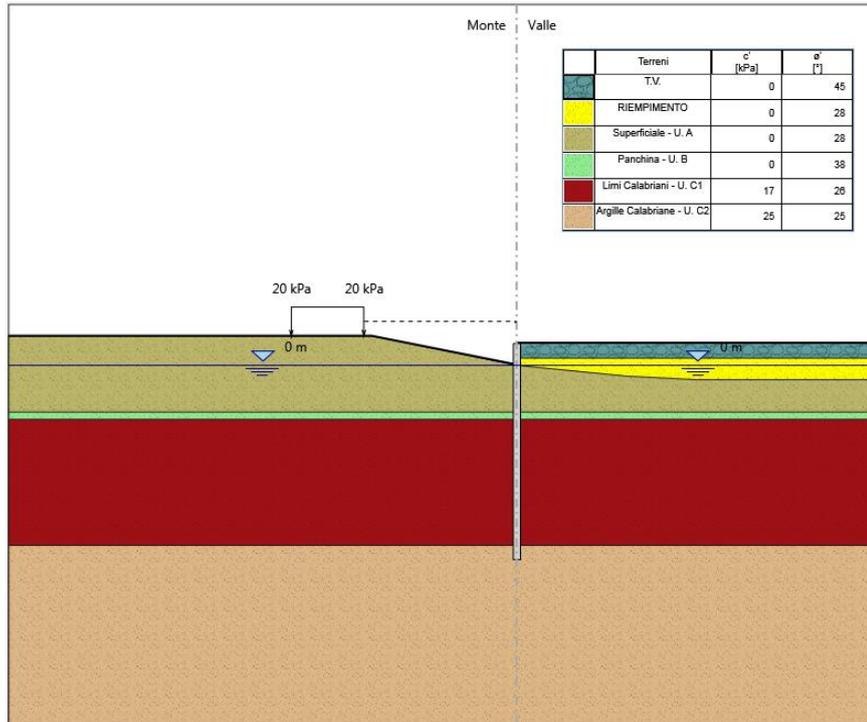


- **Fase 1:** realizzazione della paratia semiplastica.



Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica				
		09	017	DR	005	2

- Fase 2: stato finale dell'opera con il riempimento della vasca di colmata.



9.1 Stratigrafia di calcolo e parametri geotecnici di modello

Di seguito si riportano in sintesi i parametri relativi alle caratteristiche stratigrafiche e geotecniche dei terreni interessati dall'opera assunti in accordo con il modello geotecnico delle opere della vasca; in particolare la stratigrafia di riferimento è quella del lato linea di costa dove si realizzerà la paratia semiplastica.

Vasca - lato linea di costa			
Formazione	Quota sommità m s.l.m.	Quota fondo m s.l.m.	Spessore (m)
Rilevato in Tout Venat o sabbia e limo	+1.00/+3.00	+0.00	4.00/6.00
Superficiale - Unità "A"	0.0	-6.50	6.50
"Panchina" - Unità "B"	-6.50	-7.50	1.00
Limi Calabriani - Unità "C1"	-7.50	-25.00	17.50
Argille Calabriane - Unità "C2"	-25.00	-	-

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica					
		09	017	DR	005	2	GEO

Tout-venant (T-V da q.ta +3.00 m s.l.m. a q.ta +1.00 m s.l.m. - realizzazione nella vasca):

$$\begin{aligned} \gamma &= 21 \text{ kN/m}^3 & \phi' &= 45^\circ & c' &= 0 \text{ kPa} \\ \nu &= 0.30 & K_a \text{ e } K_p & \text{(Met. Rankine)} & & \\ E_{vc}' &= 7 \text{ Mpa} & E_{ur}' &= 21 \text{ Mpa} & & \end{aligned}$$

Riempimento (materiale dragato da q.ta +1.00 m s.l.m. a q.ta fondale - realizzazione nella vasca):

$$\begin{aligned} \gamma &= 19 \text{ kN/m}^3 & \phi' &= 28^\circ & c' &= 0 \text{ kPa} \\ \nu &= 0.30 & K_a \text{ e } K_p & \text{(Met. Rankine)} & & \\ E_{vc}' &= 7 \text{ Mpa} & E_{ur}' &= 21 \text{ Mpa} & & \end{aligned}$$

Strato Superficiale U. A (sabbia limosa da q. ta fondale/versante a q.ta -6.50 m s.l.m.):

$$\begin{aligned} \gamma &= 21 \text{ kN/m}^3 & \phi' &= 28^\circ & c' &= 0 \text{ kPa} \\ \nu &= 0.35 & K_a \text{ e } K_p & \text{(Met. Rankine)} & & \\ E_{vc}' &= 5 \text{ Mpa} & E_{ur}' &= 15 \text{ Mpa} & & \end{aligned}$$

Panchina (sabbie grossolana leggermente cementata - da q. ta -6.50 a q.ta -7.50 m s.l.m.) - Unità B:

$$\begin{aligned} \gamma &= 21 \text{ kN/m}^3 & \phi' &= 38^\circ & c' &= 0 \text{ kPa} \\ \nu &= 0.3 & K_a \text{ e } K_p & \text{(Met. Rankine)} & & \\ E_{vc} &= 58 \text{ MPa} & E_{ur}' &= 93 \text{ Mpa} & & \end{aligned}$$

Limi Calabriani (argilla limosa compatta da q. ta -7.50 a q.ta -25.00 m s.l.m.) - Unità C1:

$$\begin{aligned} \gamma &= 20 \text{ kN/m}^3 & \phi' &= 26^\circ & c' &= 17 \text{ kPa} \\ \nu &= 0.3 & K_a \text{ e } K_p & \text{(Met. Rankine)} & & \\ E_{vc} &= 58 \text{ MPa} & E_{ur}' &= 93 \text{ Mpa} & & \end{aligned}$$

Argille Calabriani (argilla compatta da q.ta -25.00 m s.l.m.) - Unità C2:

$$\begin{aligned} \gamma &= 20 \text{ kN/m}^3 & \phi' &= 25^\circ & c' &= 25 \text{ kPa} \\ \nu &= 0.3 & K_a \text{ e } K_p & \text{(Met. Rankine)} & K_0 &= 0.398 \\ E_{vc} &= 12 \cdot (p'/p_a)^{0.5} & E_{ur}' &= 40 \text{ Mpa} & & \end{aligned}$$

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica				
		09	017	DR	005	2

9.2 Criteri di verifica

Le verifiche di sicurezza relative agli stati limite ultimi (SLU) sono state effettuate in ottemperanza alla normativa nazionale "Norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 17/1/2018, secondo i criteri sotto riportati.

Per le sezioni di calcolo sono stati considerati i seguenti stati limite:

SLU di tipo geotecnico (GEO)

- Instabilità globale del sistema terreno-opera (A2+M2+R2)

Nelle verifiche nei confronti degli stati limite ultimi (SLU) deve essere rispettata la condizione:

$$E_d \leq R_d$$

dove E_d è il valore di progetto delle azioni o dell'effetto delle azioni e R_d è il valore di progetto della resistenza.

In condizioni statiche, i valori di progetto degli effetti delle azioni (E_d) devono essere determinati combinando il valore di azioni che si verificano simultaneamente nel modo seguente:

- *Combinazioni per situazioni persistenti e transitorie: valori di progetto delle azioni permanenti G_i e contemporanea presenza delle azioni variabili Q_j*

$$E_d = \sum_i \gamma_{Gi} G_{ik} + \gamma_{Qk} (Q_{1k} + \sum_j \psi_{0j} Q_{jk})$$

assumendo per i coefficienti parziali γ_G e γ_Q e per i coefficienti di combinazione ψ_{0j} i valori in seguito indicati.

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI	Relazione geotecnica				
	LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	09	017	DR	005	2

Tab. 6.2.I – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni

	Effetto	Coefficiente Parziale γ_F (o γ_E)	EQU	(A1)	(A2)
Carichi permanenti G_1	Favorevole	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti $G_2^{(1)}$	Favorevole	γ_{G2}	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevole	γ_Q	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

⁽¹⁾ Per i carichi permanenti G_2 si applica quanto indicato alla Tabella 2.6.I. Per la spinta delle terre si fa riferimento ai coefficienti γ_{G1}

Tab. 6.2.II – Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

Parametro	Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale	Coefficiente parziale γ_M	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \phi'_k$	γ_ϕ	1,0	1,25
Coesione efficace	c'_k	γ_c	1,0	1,25
Resistenza non drenata	c_{uk}	γ_{cu}	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	γ	γ_γ	1,0	1,0

Tab. 6.8.I - Coefficienti parziali per le verifiche di sicurezza di opere di materiali sciolti e di fronti di scavo

COEFFICIENTE	R2
γ_R	1,1

Per quanto riguarda il caso in esame non sono presenti sovraccarichi accidentali.

In condizioni sismiche, i valori di progetto degli effetti delle azioni (E_d) devono essere determinati combinando il valore di azioni che si verificano simultaneamente nel modo seguente:

- combinazioni per situazioni di progetto sismiche (SLU -EQK): valori caratteristici delle azioni permanenti G_i con i valori frequenti delle azioni variabili Q_j e con il valore di progetto dell'azione sismica A_{Ed}

$$F_d = \sum_i G_{ik} + \gamma_I A_{Ed} + \sum_j \psi_{2j} Q_{jk}$$

assumendo per i coefficienti parziali γ_G e γ_Q il valore pari a 1.

Per le verifiche sismiche i coefficienti parziali A ed M sono tutti uguali a 1.

Per la presenza di acqua libera è necessario tenere in conto della sovrappressione dell'acqua dovuta all'effetto idrodinamico, avente risultante pari a:

$$E_{d,w} = \mp \frac{7}{12} k_h \gamma_w h^2$$

essendo h l'altezza del pelo libero dalla quota del fondale.

Per le verifiche di stabilità globale in condizioni sismiche sono stati applicati i seguenti coefficienti:

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica					
		09	017	DR	005	2	GEO

$$k_h = \beta_s \cdot \frac{a_{max}}{g}$$

$$k_v = \pm 0,5 \cdot k_h$$

dove

β_s = coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito;
 a_{max} = accelerazione orizzontale massima attesa al sito;
 g = accelerazione di gravità.

dove

$$\beta_s = 0.38 \text{ nelle verifiche dello stato limite ultimo (SLV)}$$

$$\gamma_R = 1.2.$$

(§ 7.11.4)

9.3 calcolo e verifica della sezione di progetto

Per i calcoli di verifica è stato utilizzato il software specialistico PARATIE PLUS di Harpaceas Srl.

Per la verifica di stabilità globale è stata applicato il metodo dell'equilibrio limite attraverso il metodo dei conci. Benché il grado di stabilità di un pendio sia legato alle deformazioni che esso manifesta, le analisi di stabilità sono basate su metodi che considerano solo l'equilibrio delle forze in gioco. Il metodo si basa sul confronto tra forze resistenti e forze agenti e sulla definizione di un fattore di sicurezza dato dal loro rapporto. Il corpo è considerato rigido, senza tener conto di deformazioni o spostamenti, la superficie di rottura è nota a priori. Il metodo richiede soltanto di determinare i criteri di resistenza del materiale lungo la superficie di rottura. I metodi dell'equilibrio limite si basano sul presupposto che è necessario che siano soddisfatte le condizioni di equilibrio e il criterio di resistenza (che determina le condizioni di collasso), ma che le condizioni di congruenza e di compatibilità degli spostamenti possano essere ignorate. Esistono diverse applicazioni di questo metodo ma tutte hanno in comune le seguenti assunzioni:

- le superfici di rottura sono delle superfici di scivolamento pre-definite, quindi l'analisi di stabilità è effettuata considerando l'equilibrio della massa di terreno individuata da tale superficie sottoposta alle forze di contorno;
- la legge costitutiva lungo la superficie di rottura è assunta rigida – perfettamente plastica mentre quella del materiale è rigida.
- la resistenza al taglio lungo la superficie di scivolamento è calcolata attraverso le equazioni della statica;
- quando il pendio non è omogeneo ed esistono condizioni di flusso difficilmente schematizzabili, si ricorre a metodi che suddividono la massa interessata in conci per ogni concio valgono le assunzioni precedenti.

In particolare è stato applicato, a favore della sicurezza, il metodo di Bishop semplificato in cui, nelle equazioni di equilibrio, vengono trascurate le forze di taglio tra i conci.

Al metodo di Bishop semplificato è stato applicato l'Approccio di progetto A2+M2+R2 con R2 = 1.1 in condizioni statiche e l'Approccio di progetto 1.0+1.0+R2 con R2 = 1.2 in condizioni sismiche (vedi i criteri di verifica indicati nel §9.2 della relazione).

Nelle figure seguenti si riportano gli esiti delle verifiche svolte per la condizione statica e per la condizione sismica, rappresentate dal valore del coefficiente di sicurezza F_s minimo riferito alla superficie di scorrimento critica ottenuto dal modello di calcolo. Il modello di calcolo considera un valore unitario del coefficiente parziale applicato alla resistenza ($R1$), per tale motivo per

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica					
		09	017	DR	005	2	GEO

ottenere il valore del coefficiente di sicurezza secondo le NTC basta applicare il coefficiente R2 al valore di F_s ottenuto.

Nella tabella riassuntiva si riporta, per le verifiche svolte, nella prima colonna il coefficiente di sicurezza F_s sopra descritto che risulta dal modello di calcolo senza applicare il coefficiente di riduzione delle resistenze offerte, mentre nella seconda colonna si riportata il corrispondente valore del coefficiente di sicurezza ottenuto applicando alla resistenza del terreno il coefficiente R2 della Normativa vigente.

Dai risultati delle analisi, le condizioni di stabilità del versante risultano tutte soddisfatte.

Si evidenzia come il coefficiente di stabilità del versante aumenta con la realizzazione della vasca.

Tabella 9-1 - Risultati delle verifiche di tipo stabilità di insieme (GEO) agli stati limite ultimi

	F_s minimo	Rd/Ed SLU (GEO): (A2+M2+R2) SLU-EQK (GEO): (1.0+1.0+R2)
STATO ATTUALE		
Verifica SLU (GEO) Condizione statica	1.956	1.778
Verifica SLU-EQK (GEO) Condizione sismica	2.150	1.792
FASE 1		
Verifica SLU (GEO) Condizione statica	5.682	5.165
Verifica SLU-EQK (GEO) Condizione sismica	5.801	4.834
FASE 2		
Verifica SLU (GEO) Condizione statica	20.181	18.346
Verifica SLU-EQK (GEO) Condizione sismica	17.734	14.778

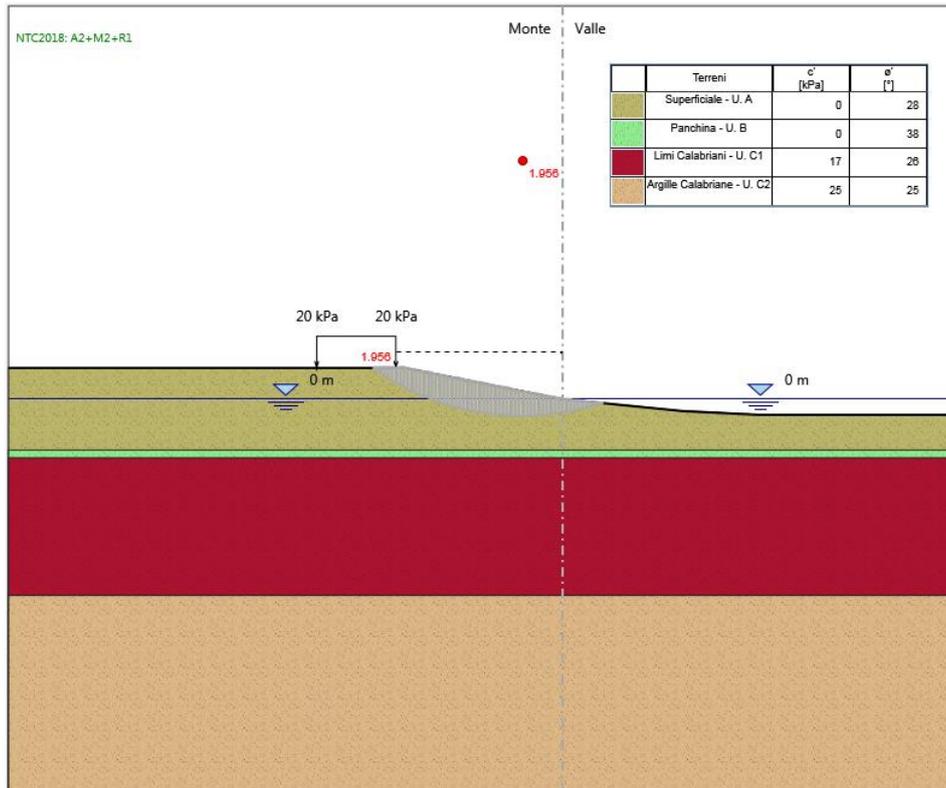
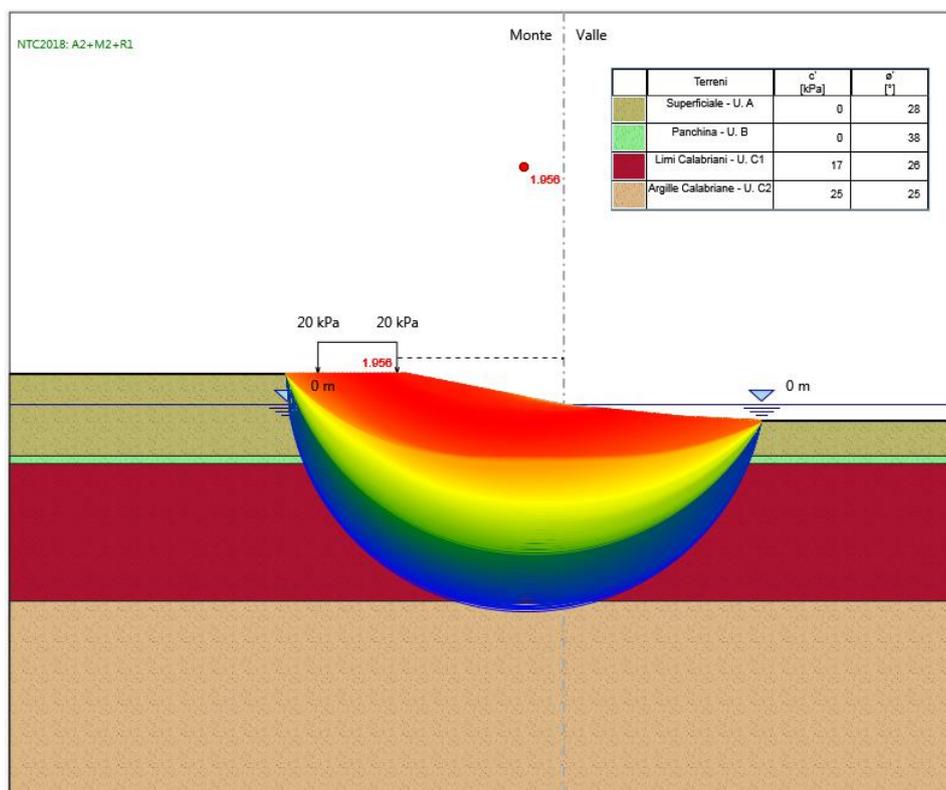


figura 9.3 –Valore del coefficiente di sicurezza minimo (F_s) ottenuto in riferimento alla superficie di scorrimento critica per la verifica di stabilità di globale in condizioni statiche – stato attuale



Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica				
		09	017	DR	005	2

figura 9.4 –Valore del coefficiente di sicurezza minimo (F_s) ottenuto in riferimento alla superficie di scorrimento critica e superfici critiche analizzate per la verifica di stabilità di globale in condizioni statiche – stato attuale

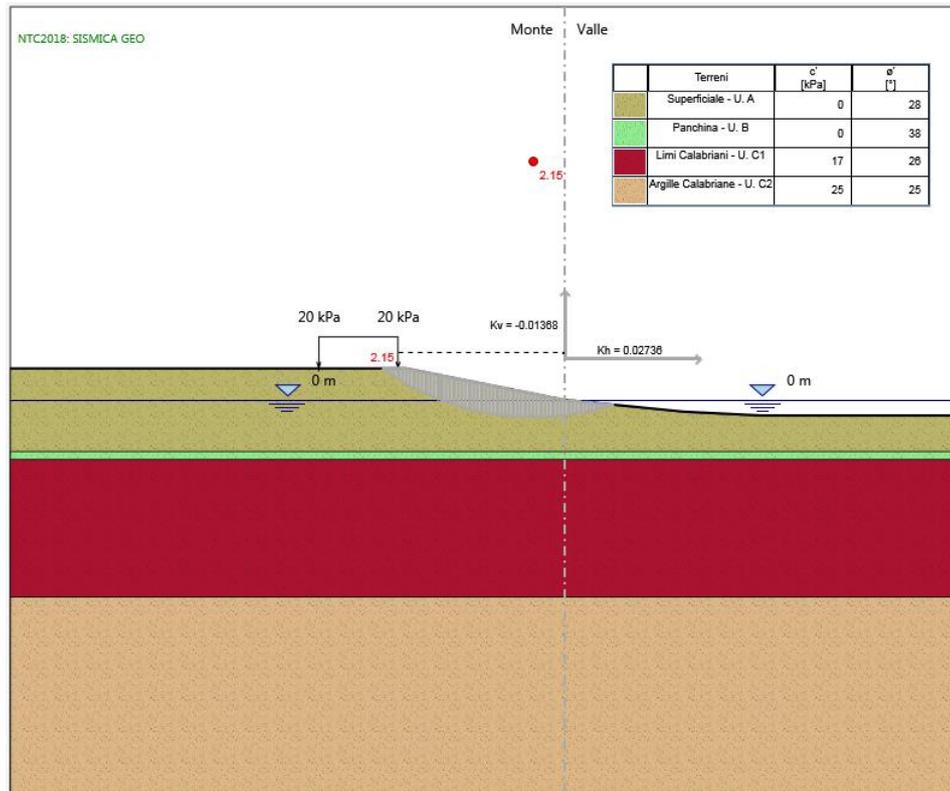


figura 9.5 –Valore del coefficiente di sicurezza minimo (F_s) ottenuto in riferimento alla superficie di scorrimento critica per la verifica di stabilità di globale in condizioni sismiche – stato attuale

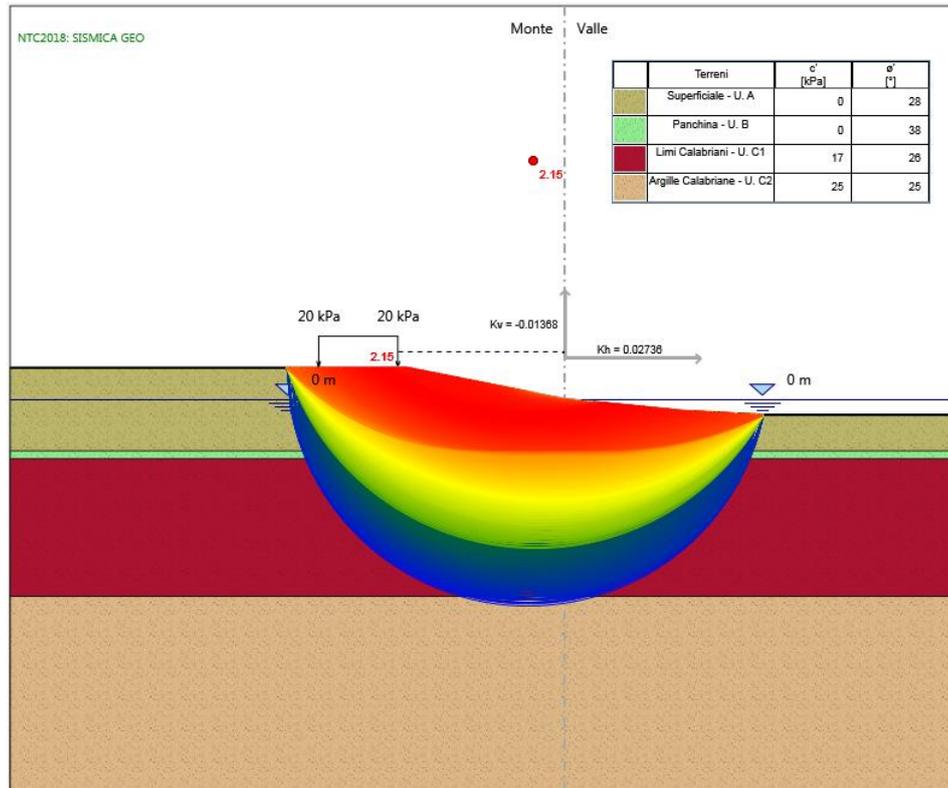
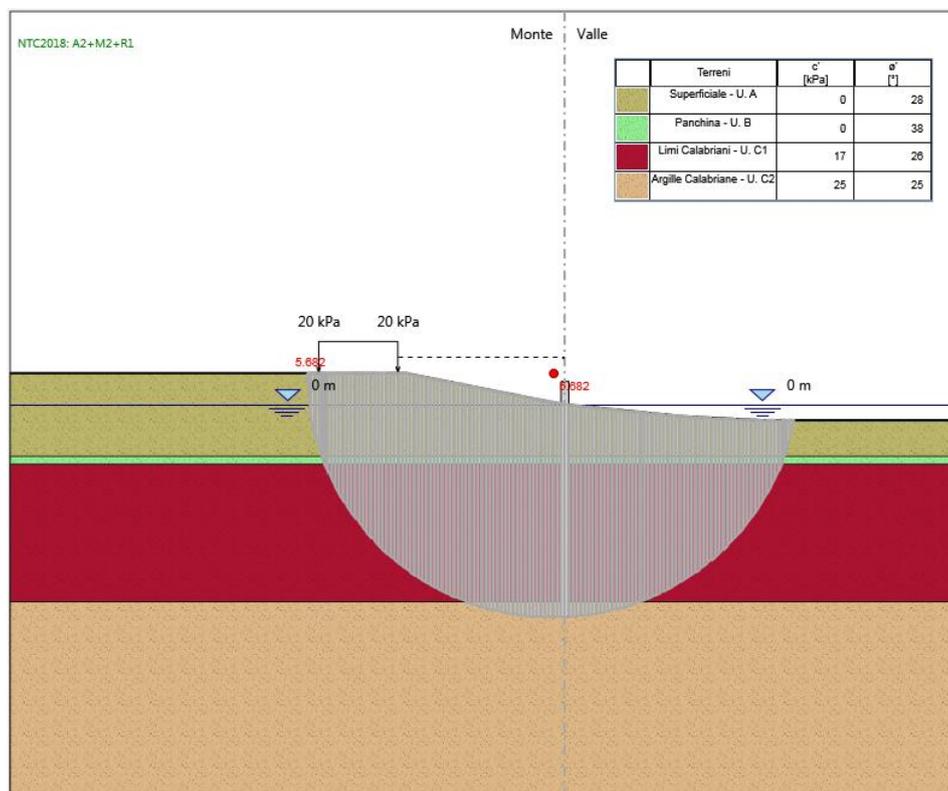


figura 9.6 –Valore del coefficiente di sicurezza minimo (F_s) ottenuto in riferimento alla superficie di scorrimento critica e superfici critiche analizzate per la verifica di stabilità di globale in condizioni sismiche – stato attuale



Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica				
		09	017	DR	005	2

figura 9.7 –Valore del coefficiente di sicurezza minimo (F_s) ottenuto in riferimento alla superficie di scorrimento critica per la verifica di stabilità di globale in condizioni statiche – Fase

1

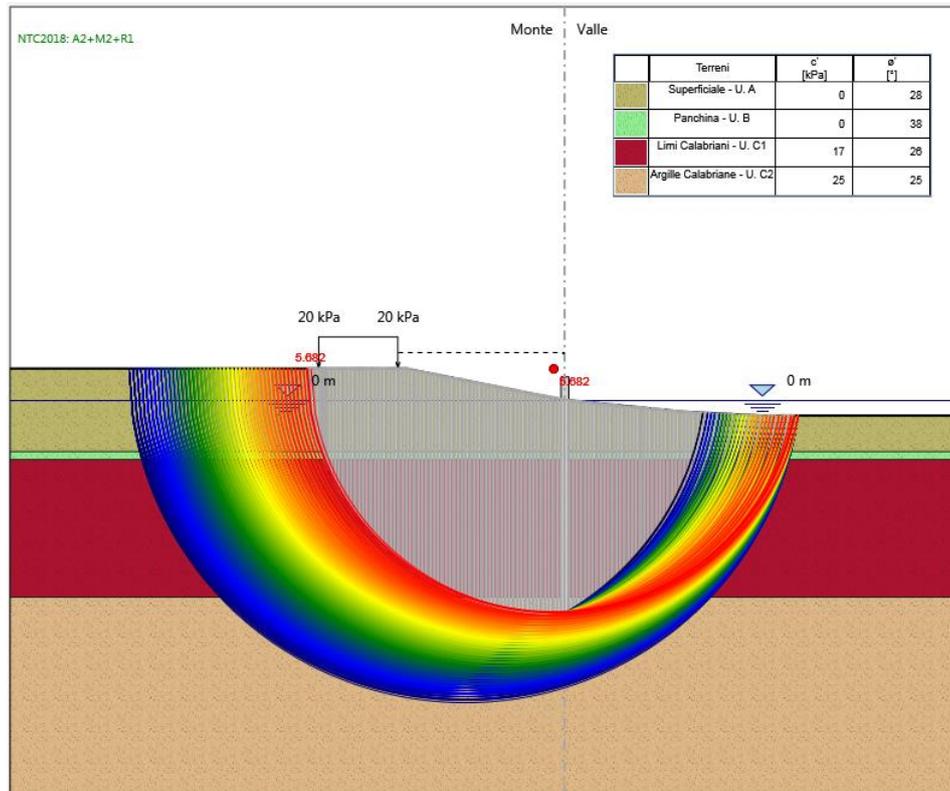


figura 9.8 –Valore del coefficiente di sicurezza minimo (F_s) ottenuto in riferimento alla superficie di scorrimento critica e superfici critiche analizzate per la verifica di stabilità di globale in condizioni statiche – Fase 1

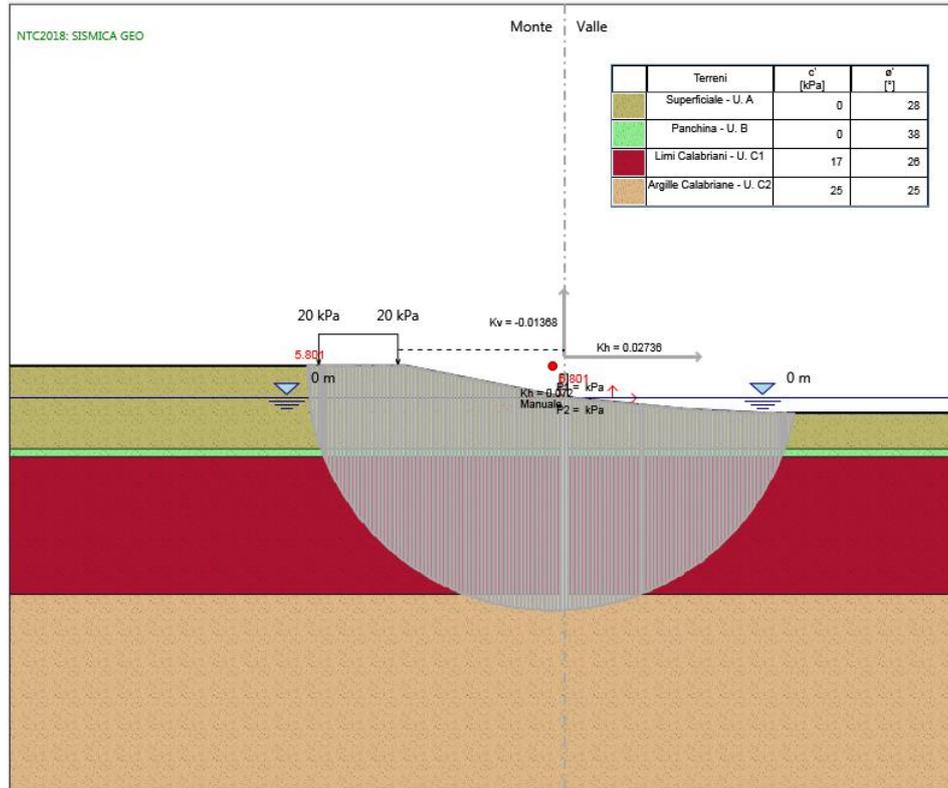
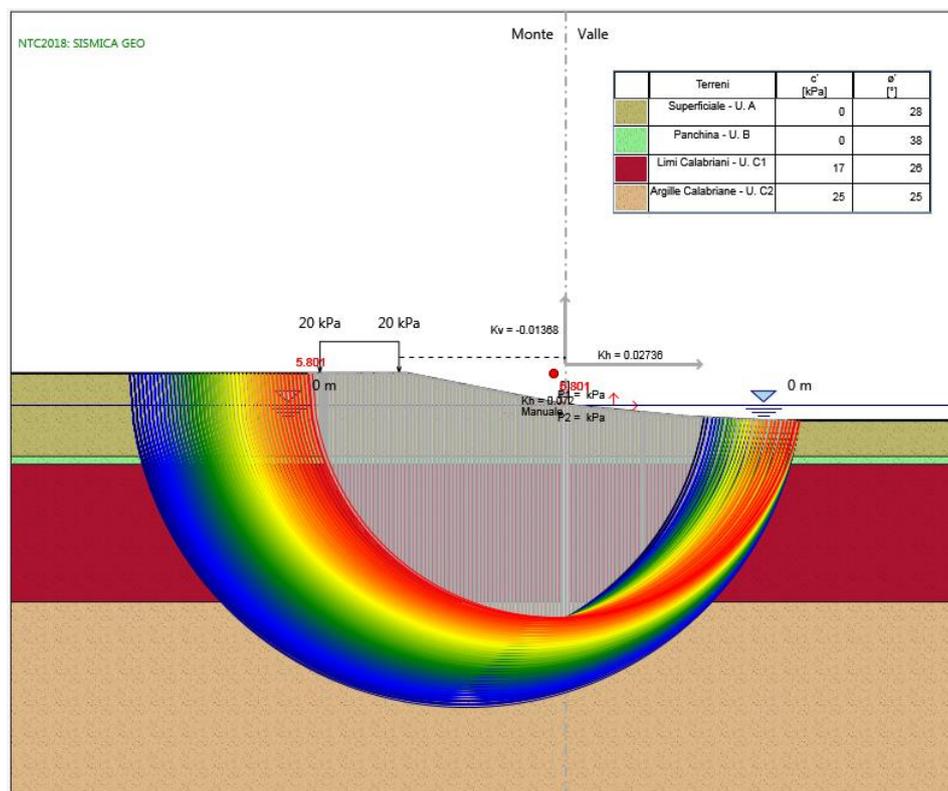


figura 9.9 –Valore del coefficiente di sicurezza minimo (F_s) ottenuto in riferimento alla superficie di scorrimento critica per la verifica di stabilità di globale in condizioni sismiche – **Fase 1**



Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica				
		09	017	DR	005	2

figura 9.10 –Valore del coefficiente di sicurezza minimo (F_s) ottenuto in riferimento alla superficie di scorrimento critica e superfici critiche analizzate per la verifica di stabilità di globale in condizioni sismiche – Fase 1

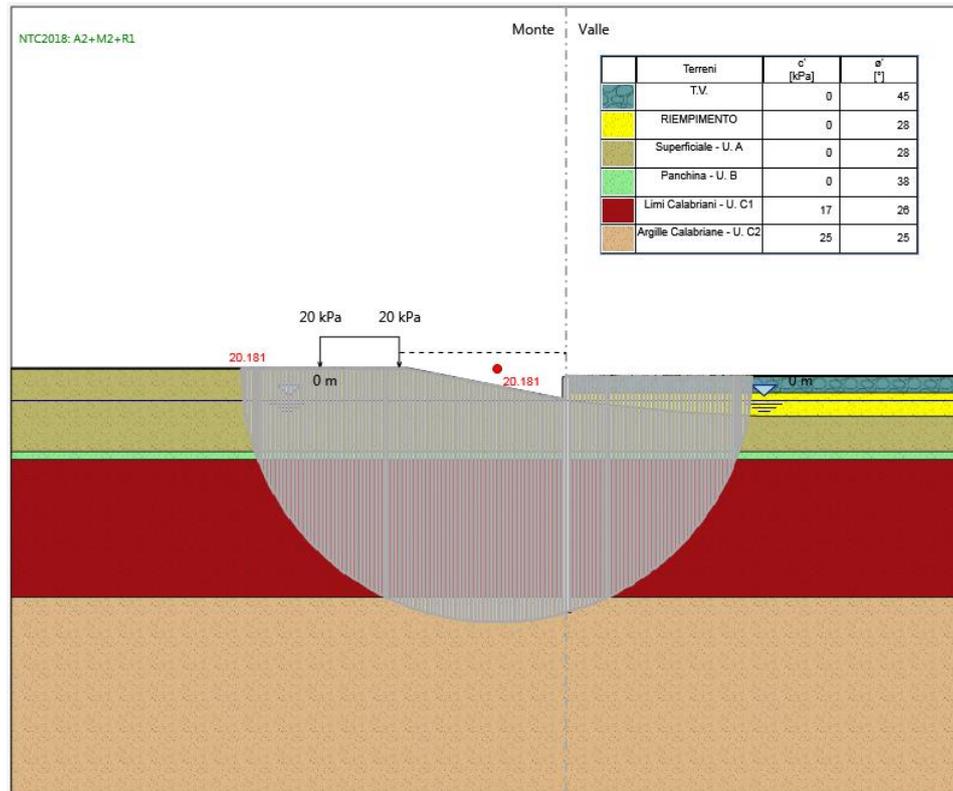


figura 9.11 –Valore del coefficiente di sicurezza minimo (F_s) ottenuto in riferimento alla superficie di scorrimento critica per la verifica di stabilità di globale in condizioni statiche – Fase

2

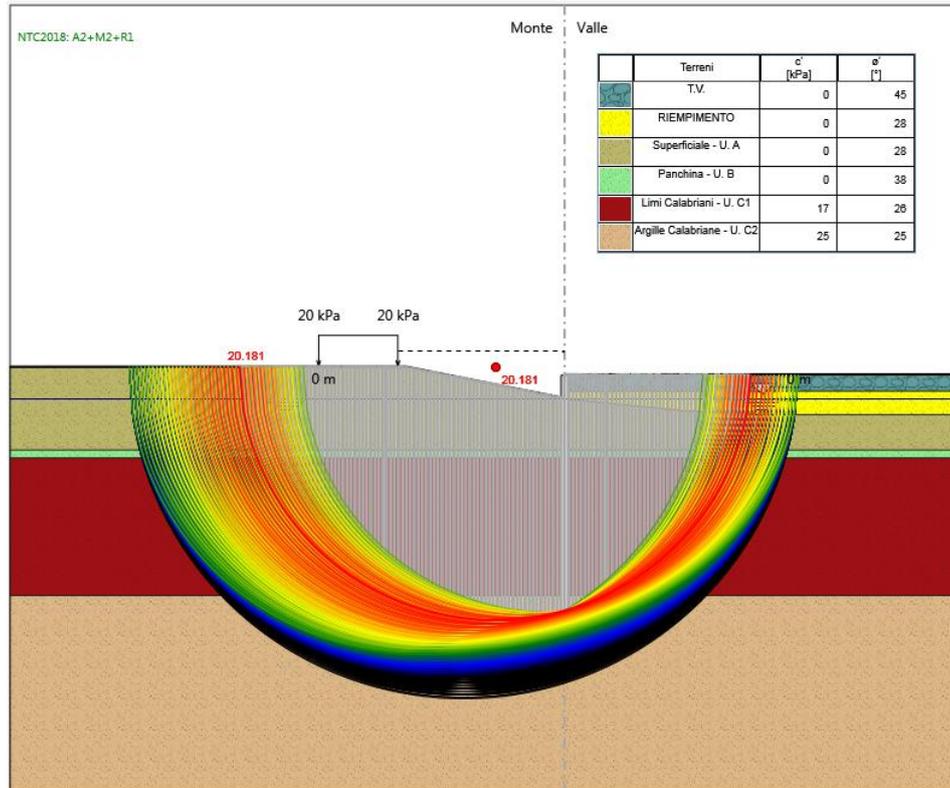


figura 9.12 –Valore del coefficiente di sicurezza minimo (F_s) ottenuto in riferimento alla superficie di scorrimento critica e superfici critiche analizzate per la verifica di stabilità di globale in condizioni statiche – Fase 2

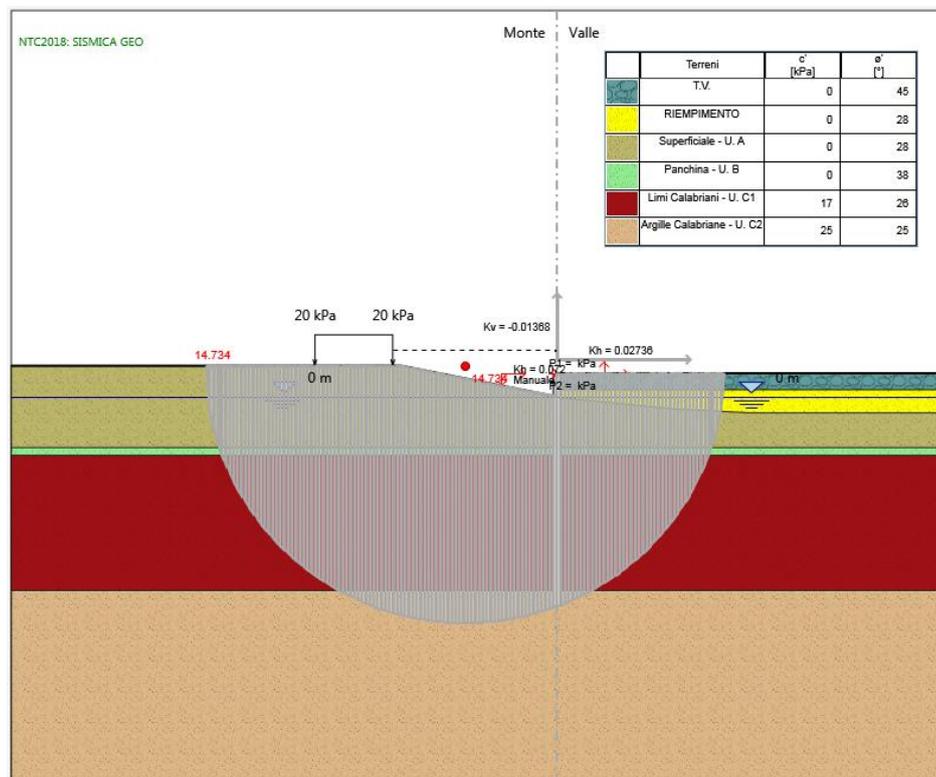


figura 9.13 –Valore del coefficiente di sicurezza minimo (F_s) ottenuto in riferimento alla superficie di scorrimento critica per la verifica di stabilità di globale in condizioni sismiche – Fase 2

Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale	Ufficio di BRINDISI LAVORI PER IL COMPLETAMENTO DELL'INFRASTRUTTURAZIONE PORTUALE MEDIANTE BANCHINAMENTO E REALIZZAZIONE DELLA RETROSTANTE COLMATA TRA IL PONTILE PETROLCHIMICO E COSTA MORENA EST	Relazione geotecnica				
		09	017	DR	005	2

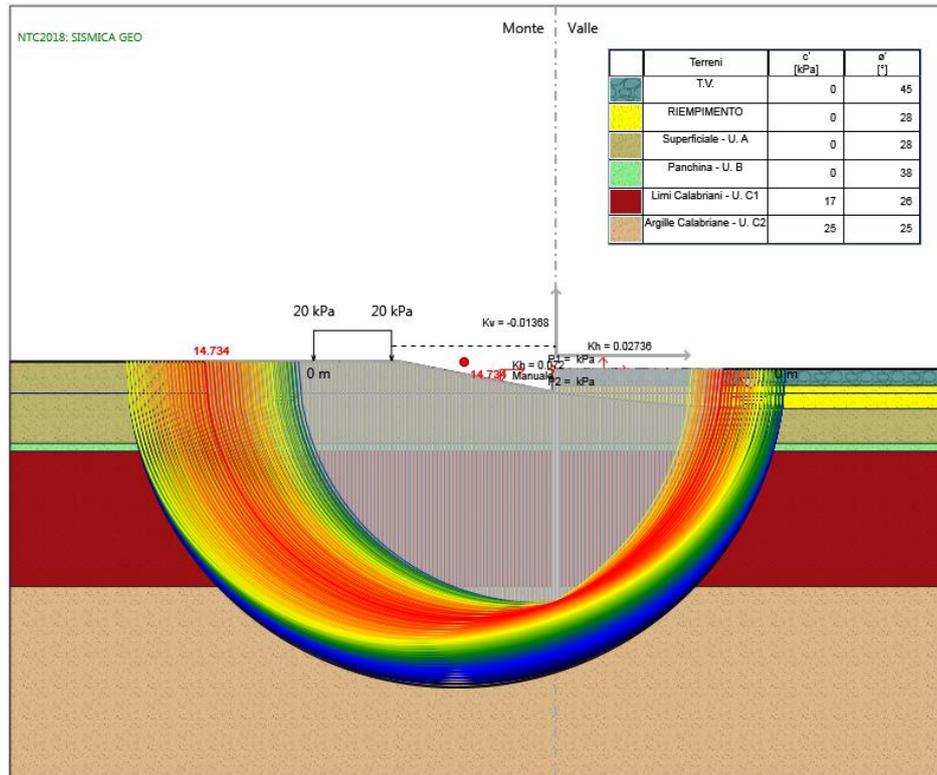


figura 9.14 –Valore del coefficiente di sicurezza minimo (F_s) ottenuto in riferimento alla superficie di scorrimento critica e superfici critiche analizzate per la verifica di stabilità di globale in condizioni sismiche – Fase 2

Capitolo 10 CONCLUSIONI

In questo documento sono stati dapprima caratterizzati i terreni di fondazione relativi alle paratie di contenimento della nuova cassa di colmata (palancole e barriera semirigida) e i sedimenti della costruenda colmata nell'area portuale di Brindisi.

Successivamente sono stati stimati i cedimenti della colmata per effetto della consolidazione degli stessi e di eventuali fenomeni di creep, anche al fine di verificare l'effettiva quantità di materiale stoccabile nella vasca.