



INTERVENTI PER IL DRAGAGGIO DI 2,3 M m³ DI SEDIMENTI IN AREA MOLO POLISETTORIALE PER LA REALIZZAZIONE DI UN PRIMO LOTTO DELLA CASSA DI COLMATA FUNZIONALE ALL'AMPLIAMENTO DEL V SPORGENTE DEL PORTO DI TARANTO

Progetto Esecutivo

DEWATERING

Relazione di calcolo impianto di dewatering- pozzi

SCALA:

CODICE PROGETTO		CODICE ELABORATO								REV	REP
PUG102		PE	GEN	DW	00	00	RE	01	B	360	

REVISIONI	REV	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	CONTROLLATO	APPROVATO
	B	Maggio 2016	Nota A.P. Prot. U. 0006807 22/04/2016	Lottiingegneria		
	A	Gennaio 2016	Emissione	Lottiingegneria		

Progettisti indicati - R.T.P.:

MANDATARIA

LSTTÀ s.p.a.
ingegneria

MANDANTE

ingLuigiSeverini.studio
Ingegneria Italiana

IL PROGETTISTA



Impresa:

 **ASTALDI**

IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO

INDICE

	1	PREMESSA.....	1
	2	DESCRIZIONE DELLA TECNICA.....	2
2.1		ASPETTI PROGETTUALI	2
2.2		DESCRIZIONE DEL SISTEMA DI DRENAGGIO	2
2.3		FASI COSTRUTTIVE.....	6
	3	MODELLO GEOTECNICO	8
	4	ANALISI DI CONSOLIDAZIONE (PLAXIS 2D)	15
4.1		MODELLAZIONE NUMERICA.....	16
4.1.1		Modello costitutivo	17
4.1.2		Risultati analisi	19
	5	ANALISI DI CONSOLIDAZIONE DEL MATERIALE DI COLMATA “SELF-WEIGHT” (CONDES 0)	38
5.1		TARATURA DEL MODELLO.....	40
5.2		ANALISI CONDES 0	43
	6	CONCLUSIONI	45
	7	BIBLIOGRAFIA.....	46

1 PREMESSA

Il presente elaborato riporta le analisi geotecniche e i principali risultati ottenuti nell'ambito della valutazione dell'entità e del relativo decorso temporale dei fenomeni di cedimento attesi per effetto della costruzione del corpo di colmata previsto nell'ambito degli "Interventi per il dragaggio di 2,3 Mm³ di sedimenti in area Molo Polisettoriale per la realizzazione di un primo lotto della cassa di colmata funzionale all'ampliamento del V sporgente del Porto di Taranto".

Il sistema di accelerazione dei cedimenti è composto da una batteria di dreni verticali costituiti da elementi drenanti attivi disposti a maglia triangolare equilatera di lato pari a 40m, , spinti fino alla profondità di imposta dei terreni compressibili per i quali ci si attende il maggiore contributo in termini di cedimenti.

Coerentemente con quanto previsto in Progetto di Offerta, la soluzione proposta, ricalca il medesimo approccio progettuale ed il relativo dimensionamento in termini di numero di dreni (194), geometria e quota di installazione, a meno di lievi adattamenti geometrici e della relativa revisione delle analisi condotte rispetto all'aggiornamento della modellazione geotecnica sviluppata sulla base dei risultati delle indagini geognostiche propedeutiche alla progettazione esecutiva.

Tale sistema consentirà di smaltire le sovrappressioni neutre indotte dall'applicazione dei carichi tramite l'instaurazione di percorsi di filtrazione radiale rispetto alle verticali di drenaggio, governati, oltre che dal naturale gradiente di filtrazione, dall'azione forzante indotta dai sistemi di emungimento installati.

Il sistema previsto, oltre all'accelerazione dei fenomeni legati ai processi di consolidazione "a carichi applicati", consentirà, tramite l'emungimento in continuo delle portate di progetto, la rapida riduzione dei forti eccessi in termini di contenuto d'acqua associati al refluitamento dei sedimenti dragati durante le fasi di costruzione del corpo della colmata, consentendo la rapida stabilizzazione del materiale refluito mediante depressione progressiva del livello piezometrico, secondo l'approccio tipico dei sistemi di "dewatering".

2 DESCRIZIONE DELLA TECNICA

2.1 ASPETTI PROGETTUALI

La soluzione tecnica prevista nell'ambito del Progetto Esecutivo ai fini dell'accelerazione dei processi di consolidazione della colmata è stata impostata analogamente a quanto proposto in ambito di Progetto di Offerta, e cioè, prevedendo la realizzazione di un sistema di drenaggio attivo costituito da dreni verticali di grande diametro, con sistemi di emungimento installati al proprio interno.

Rispetto al Progetto di Offerta, è stato necessario, però, verificare la soluzione progettuale rispetto al diverso modello geologico-geotecnico desunto nell'ambito della campagna di rilievi ed indagini geognostiche propedeutiche alla progettazione esecutiva, caratterizzato da sensibili differenze in termini di assetto litostratigrafico e caratteristiche geotecniche dei terreni di fondazione della cassa di colmata, rispetto a quanto previsto in ambito di PD a base gara (rif. Cap.3 - MODELLO GEOTECNICO);

Per quanto detto, in ambito di Progetto Esecutivo è stato necessario rivedere gli standards prestazionali del sistema di accelerazione, a parità di interasse dei pozzi previsti in Progetto di Offerta, valutando i tempi di consolidazione in modo congruente con le riscontrate diverse caratteristiche geotecniche dei terreni di fondazione della cassa;

Alcune ulteriori ottimizzazioni del sistema si sono rese necessarie al fine di garantirne una migliore efficienza, e nello specifico:

- ottimizzazione della distribuzione geometrica dei dreni, passando da una geometria in pianta a maglia quadra ad una distribuzione a maglia triangolare equilatera;
- ottimizzazione delle quote di installazione dei tratti ad emungimento attivo ed inserimento di tratti a drenaggio passivo, rispetto agli effettivi andamenti dei materiali più/meno permeabili;
- ottimizzazione delle portate da emungere rispetto agli obiettivi prestazionali da conseguire ed alla permeabilità intrinseca dei materiali.

2.2 DESCRIZIONE DEL SISTEMA DI DRENAGGIO

Il sistema di drenaggio attivo ai fini dell'accelerazione dei processi di consolidazione prevede una rete costituita da 194 elementi drenanti realizzati mediante colonne in materiale granulare dotate di sistema di emungimento attivo, distribuiti secondo una maglia triangolare equilatera di lato pari a 40m.

Rispetto a ciascuna colonna drenante, è stato differenziato un primo tratto caratterizzato dall'installazione del sistema di pompaggio, previsto all'incirca alla quota di testa dei depositi limosi di fondazione, ed un secondo tratto caratterizzato dal solo nucleo drenante spinto fino alla quota di testa dei depositi argillosi consistenti. La distribuzione degli elementi più prossimi alla banchina lato Yard-Belleli è stata ottimizzata rispetto all'andamento batimetrico riscontrato.



Autorità Portuale di Taranto

Interventi per il dragaggio di 2,3 M m³ di sedimenti in area Molo Polisettoriale e per la realizzazione di un primo lotto della cassa di colmata funzionale all'ampliamento del V Sporgente del Porto di Taranto

Relazione di calcolo impianto di dewatering - pozzi

Data 05/2016
Rev. B
c.d.c.: C296B
360B.docx

Coerentemente con quanto previsto in Progetto di Offerta, il diametro delle colonne drenanti sarà pari a 800mm e verrà prevista, prima dell'intasamento della colonna con sabbia e ghiaia vagliata a granulometria controllata, la disposizione nel cavo di perforazione di un geotessile filtrante a calza per tutta l'altezza della colonna.

Prima del completamento del riempimento dell'ultima porzione del dreno, di profondità variabile in funzione degli spessori della colmata nei vari tratti, e quindi, rispetto alla testa dei materiali compressibili di fondazione, verrà installata la tubazione in PVC microfessurata Ø250 per l'allestimento del sistema di emungimento, costituito da elettropompe sommergibili di piccola taglia e relativa tubazione premente.

I dreni, disposti secondo la geometria di Progetto, saranno collegati tra di loro da collettori di raccolta di testa, da collegare a loro volta agli apparati di pompaggio disposti in modo da ottimizzare le prevalenze delle pompe rispetto alla profondità di installazione degli apparati di emungimento all'interno di ciascun dreno, nelle varie zone.

Le portate attese, valutate attraverso lo studio dei modelli di filtrazione basati sulle permeabilità dei diversi materiali, sono state stimate per ciascun dreno in un range compreso tra 0.1-0.15 l/s.

**Autorità Portuale di Taranto**

Interventi per il dragaggio di 2,3 M m³ di sedimenti in area Molo Polisettoriale e per la realizzazione di un primo lotto della cassa di colmata funzionale all'ampliamento del V Sporgente del Porto di Taranto

Relazione di calcolo impianto di dewatering - pozzi

Data 05/2016
Rev. B
c.d.c.: C296B
360B.docx

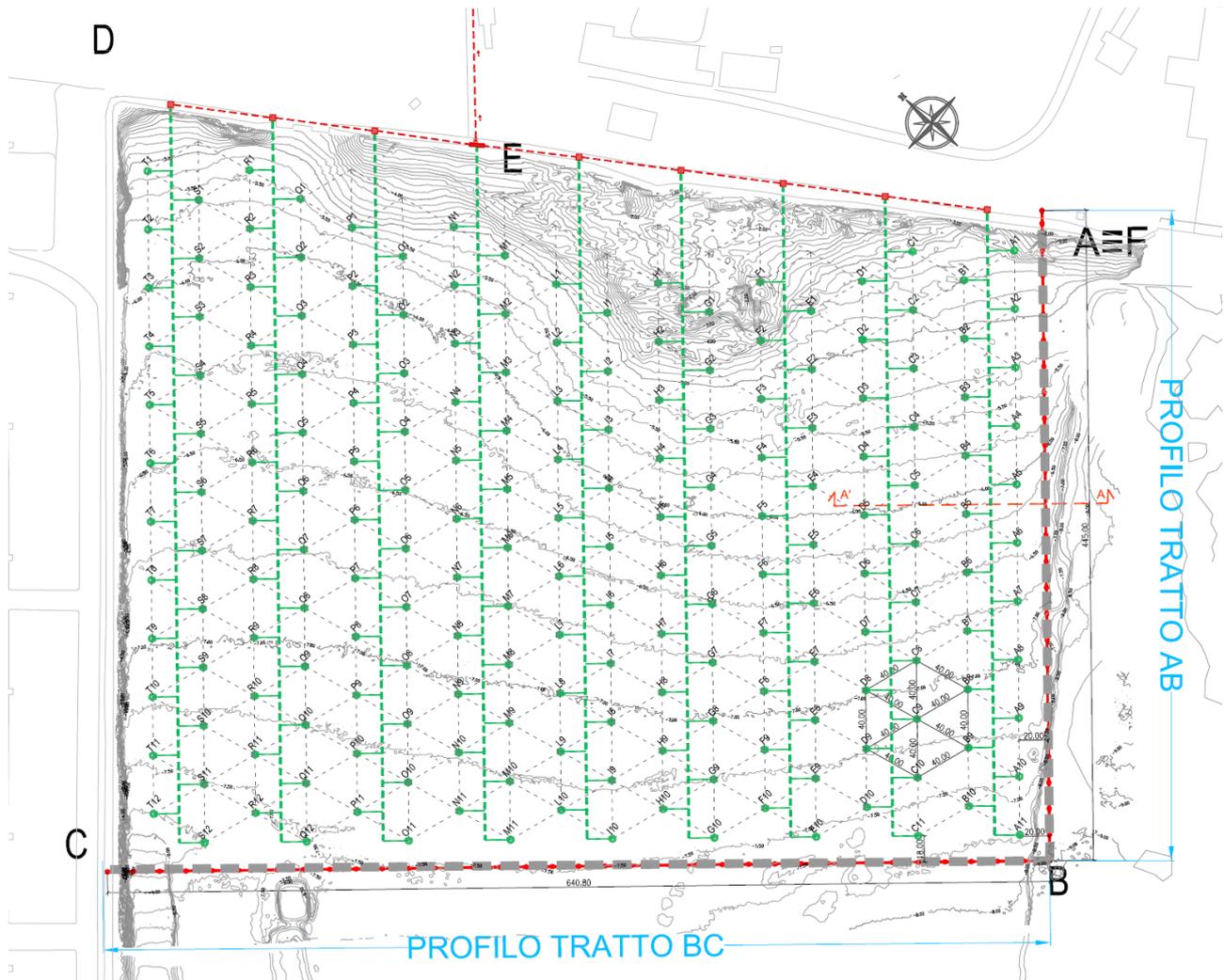


Figura 2-1: Planimetria interventi di accelerazione della consolidazione

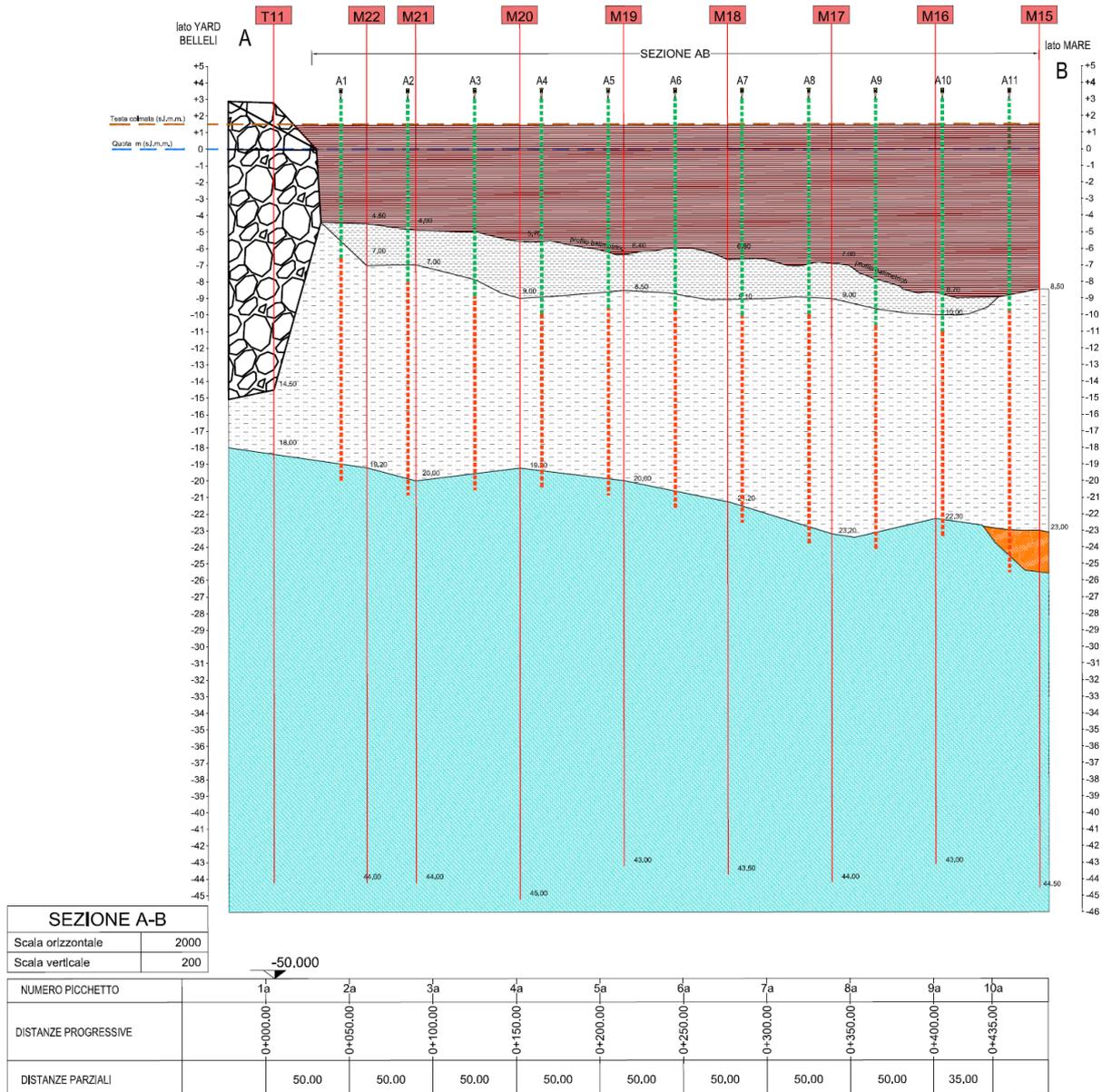


Figura 2-2: Profilo stratigrafico AB



Autorità Portuale di Taranto

Interventi per il dragaggio di 2,3 M m³ di sedimenti in area Molo Polisettoriale e per la realizzazione di un primo lotto della cassa di colmata funzionale all'ampliamento del V Sporgente del Porto di Taranto

Relazione di calcolo impianto di dewatering - pozzi

Data 05/2016
Rev. B
c.d.c.: C296B
360B.docx

2.3 FASI COSTRUTTIVE

I pozzi, coerentemente con quanto previsto nel Progetto di Offerta, verranno realizzati mediante perforazione dalla sommità della colmata (+1,50 m slm) fino alla quota di imposta dei depositi limosi compressibili e quindi fino al tetto delle argille.

A tal proposito va osservato che, a causa del deficit in termini di volumi complessivi da dragare rispetto alla capacità della cassa di colmata, a fine dragaggio della darsena del molo Polisettoriale si è nell'impossibilità di raggiungere le quote finali previste in Progetto Definitivo a base gara (+1.50m slm) nella cassa di colmata (v. Piano di dragaggio e sistema di refluento in cassa di colmata), potendosi attendere, rispetto alle valutazioni effettuate, una quota all'incirca pari alla - 0,10m slm.

Con riferimento alla suddetta quota, tuttavia, si ritiene che la realizzazione dei dreni sia assolutamente sconsigliabile prima del raggiungimento della quota di riempimento finale della cassa di colmata. Infatti, attesa la necessità al termine dei dragaggi di dover ancora refluire in cassa un ulteriore notevole volume di materiale (oltre 500mila mc) per poter raggiungere le quote di sistemazione finale, l'effetto benefico dei pozzi di emungimento, risulterebbe in prima fase limitato solo alla dissipazione di una parte di sovrappressioni indotte dal parziale (e non definitivo) sovraccarico, quindi non in grado di esaurire la sua funzione.

D'altro canto nella successiva fase di completamento della colmata, l'impianto di aggotamento costituito da tubazioni idrauliche, elettropompe, quadri elettrici, ecc. rappresenterebbe un notevole impedimento operativo al refluento di ulteriore materiale con conseguenti maggiori costi per l'Amministrazione.

La realizzazione dei pozzi dalla quota + 1,50m consente quindi di beneficiare del contributo di consolidazione degli ulteriori effetti di precarica dell'intero volume di materiale in cassa, evitando il rischio in fase di riempimento successivo di danneggiare le teste dei pozzi ed il sistema idraulico di dewatering disposto su tutta la superficie della cassa e di compromettere irreparabilmente l'efficienza e la funzionalità del sistema.

Pertanto nel presente Progetto Esecutivo si è fissata la quota di sommità del sistema di dewatering a +1,50.

Effettuata la perforazione con avanzamento progressivo del rivestimento in lamierino, verrà installata una calza in geotessile TNT ad elevata grammatura e capacità idraulica, procedendo poi alla realizzazione del cilindro filtrante da fondo foro fino alle differenti quote previste, mediante immissione di materiale granulare sabbio-ghiaioso vagliato a granulometria selezionata. La curva granulometrica del materiale con cui sarà realizzato il filtro sarà certificata dal fornitore e sarà sottoposta alla Direzione Lavori per preventiva accettazione.

Nell'operazione di posa del filtro granulare la corona del rivestimento sarà progressivamente estratta. La posa del filtro avverrà partendo dal fondo, mediante l'utilizzo di tubi convogliatori. Per garantire l'assestamento uniforme del materiale, si provvederà al pistonaggio progressivo dello stesso durante le fasi di riempimento delle colonne.

Raggiunta la quota di fondo di testa del tratto passivo dei dreni, si procederà con il completamento della colonna drenante fino alla quota di testa, procedendo con l'installazione della tubazione microfessurata in PVC all'interno della quale verrà installata dell'elettropompa di emungimento e della relativa tubazione premente.

Le lunghezze dei tratti di aspirazione attiva sono previste da 9 a 15m valutate rispetto alla ricostruzione dell'andamento batimetrico del fondale e relativo andamento stratigrafico delle litologie da trattare. Le lunghezze dei tratti più profondi delle colonne drenanti, caratterizzati del solo intasamento in granulare protetto con geotessile TNT, variano tra 10 e 20m.



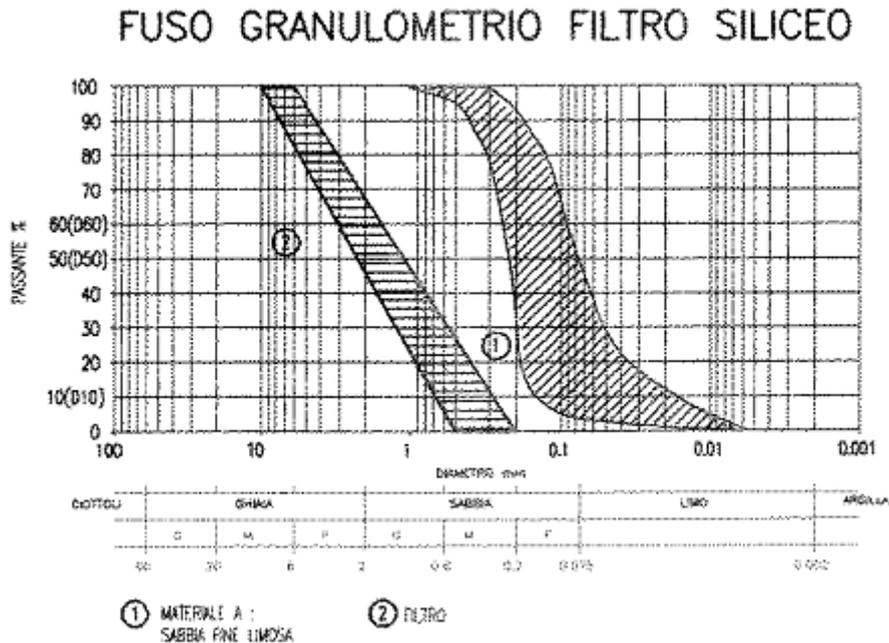
Autorità Portuale di Taranto

Interventi per il dragaggio di 2,3 M m³ di sedimenti in area Molo Polisettoriale e per la realizzazione di un primo lotto della cassa di colmata funzionale all'ampliamento del V Sporgente del Porto di Taranto

Relazione di calcolo impianto di dewatering - pozzi

Data 05/2016
Rev. B
c.d.c.: C296B
360B.docx

Le teste delle tubazioni di aspirazione, previste in HDPE, verranno collegate tra di esse rispetto a collettori in materiale plastico, ciascuno a connettere due file di pozzi. Tali collettori verranno recapitati in vasche di compenso poste nell'area ex Yard-Belleli, nelle immediate pertinenze dei tratti terminali dei collettori. All'interno delle vasche verranno predisposti adeguati apparati di rilancio per l'avvio delle acque a recapito finale.



Diametro (mm)	Passante in peso (%)	
	min	max
0.075	0	3
0.40	0	10
2.00	15	45
5.00	35	75
10.00	70	100

Figura 2-3: Fuso granulometrico per la scelta del filtro

3 MODELLO GEOTECNICO

Il modello geotecnico adottato ai fini delle analisi di consolidazione è stato basato sui risultati delle indagini e delle prove geotecniche all'uopo condotte nell'area di impronta della cassa di colmata.

Si precisa, inoltre, che l'analisi svolta agli elementi finiti è stata eseguita adottando i modelli lito-stratigrafici e parametri geotecnici caratteristici relativi alla Relazione Geotecnica del Progetto Esecutivo, con particolare riferimento alle caratteristiche di compressibilità e permeabilità dei materiali.

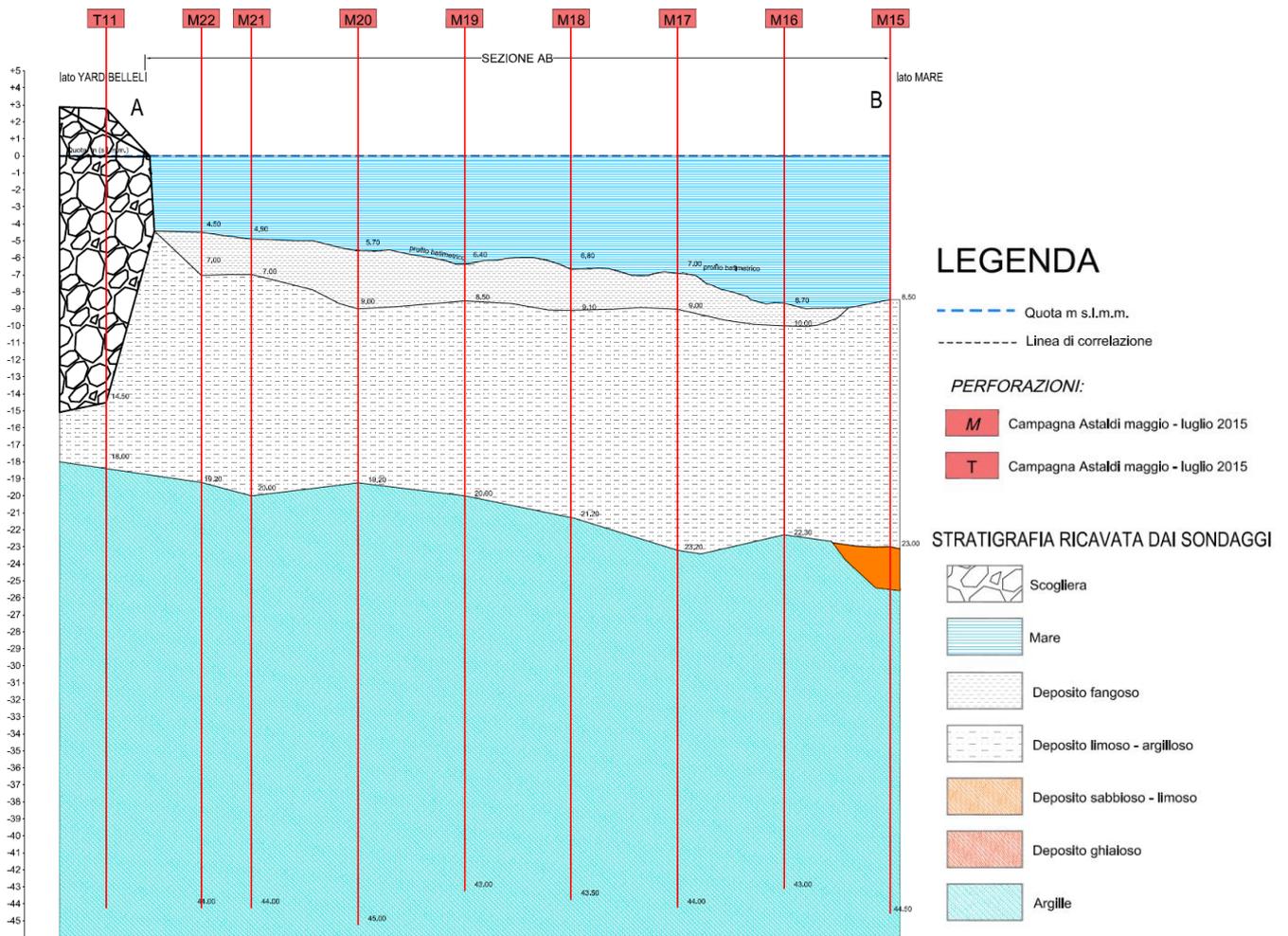


Figura 3-1: Modello lito-stratigrafico lato AB – Progetto Esecutivo

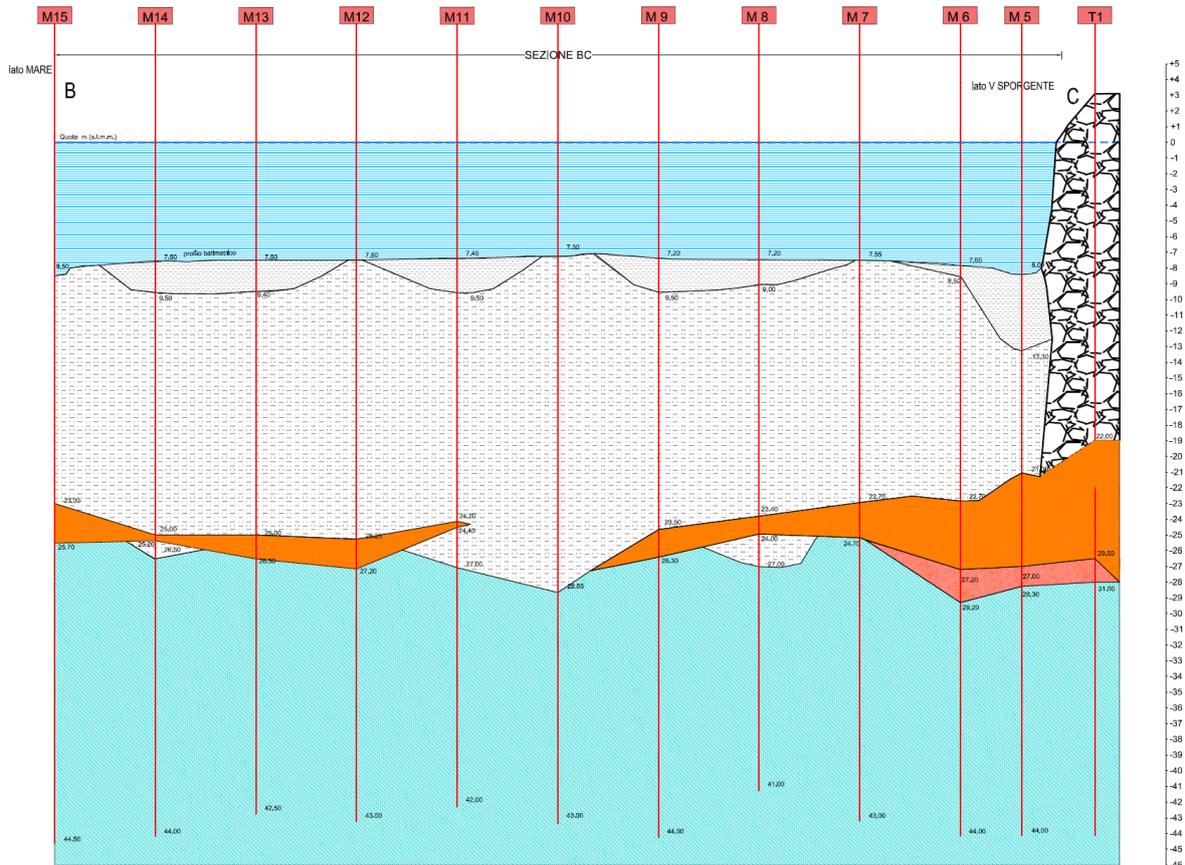


Figura 3-2: Modello lito-stratigrafico lato BC – Progetto Esecutivo

Rispetto alla successione stratigrafica, individuata nell'ambito della campagna di indagini geognostiche a supporto della progettazione esecutiva, si riscontra un sostanziale scostamento dell'assetto stratigrafico dei terreni di fondazione della cassa di colmata rispetto a quanto previsto in ambito di Progetto Definitivo. Tali evidenze hanno comportato di rivedere il modello geotecnico assunto in ambito di Progetto Definitivo basato sui dati documentati nella Relazione Geotecnica di PD, e quindi, il dimensionamento degli interventi di accelerazione della consolidazione al fine di garantire i medesimi standard prestazionali.

La prima valutazione da esprimere riguarda il diverso grado di approfondimento tra i dati disponibili nell'ambito di Progetto Definitivo e quelli oggi analizzati sulla base delle specifiche indagini geognostiche e geotecniche condotte a supporto della Progettazione Esecutiva.

La ricostruzione dell'assetto stratigrafico sia dell'area a terra che dell'area a mare, infatti, in ambito di Progetto Definitivo era stata basata su diverse campagne geognostiche eseguite in fasi diverse. Tali dati erano stati mutuati, tra l'altro, da ambiti di progetto diversi, e quindi non sempre orientati strettamente al volume significativo interagente con le opere, oltre che, per quanto attiene nello specifico le indagini a mare, fortemente limitate da grosse problematiche operative relative al recupero del materiale carotato. Molti dei sondaggi eseguiti a mare nell'area della cassa di colmata, infatti, presentano percentuali di recupero molto scarse nei primi 20m, con valori

in molti casi non superiori al 20-30%, con valori medi compresi tra il 50-60%. Anche le prove CPTu eseguite a mare presentano diagrafie spesso discontinue e con valori dei parametri caratteristici di difficile interpretazione.

Il quadro geognostico e geotecnico di sintesi che ne è scaturito quindi è stato necessariamente basato sui dati disponibili e quindi interpretato globalmente rispetto a tutto il set di dati disponibili.

La sequenza stratigrafica individuata sulla base dei dati disponibili in ambito si PD è stata sintetizzata nel modo seguente:

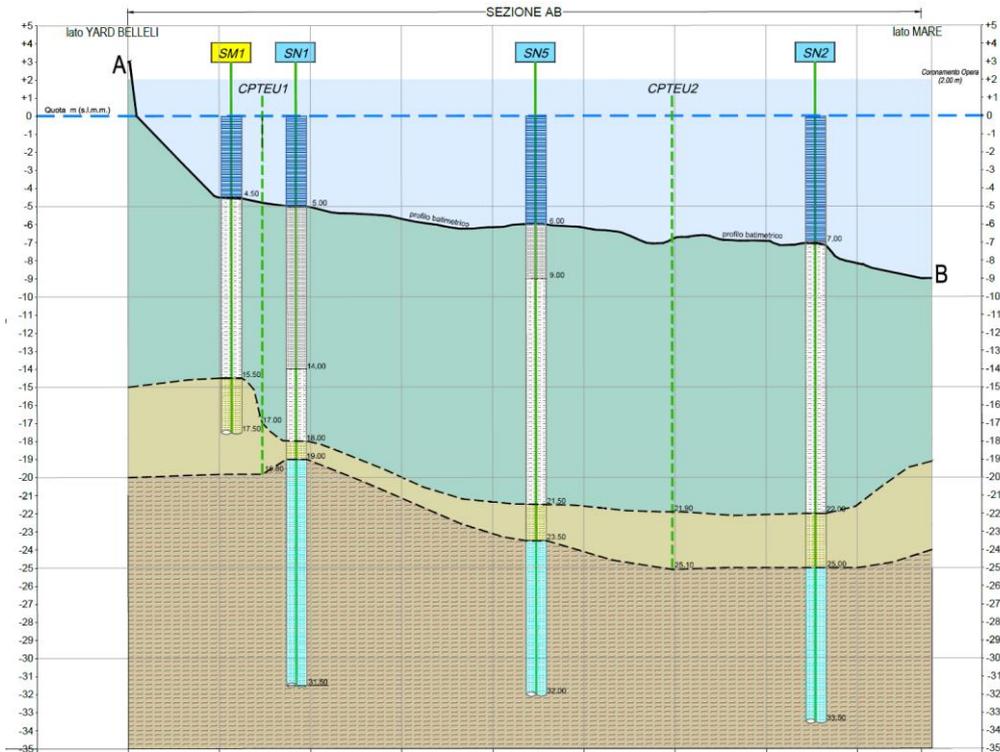
- terreni di riporto (R), costituiti da terreni a granulometria variabile da limoso-sabbiosa a ghiaiosa (Molo Polisettoriale), materiale costituito ciottoli e blocchi sub-angolari di varie dimensioni di natura calcarea e scorie di loppa in matrice sabbioso-ghiaiosa (V Sporgente e Ex Yard Belleli);
- depositi limoso sabbiosi (DLS), costituiti da sedimenti di fondale caratterizzati da granulometria variabile da limosa a limoso sabbiosa a carattere incoerente. I sedimenti a componente limoso-sabbiosa si presentano da incoerenti a consistenti e con presenza diffusa di componente organica. Talora si incontrano livelli diffusi a granulometria sabbiosa. Lo spessore dei depositi individuato nel corso delle indagini geognostiche è variabile da 2 m a 14 m;
- depositi limoso argillosi (DLA), costituiti da terreni di natura limoso-argillosa, con presenza di strati centimetrici limoso-sabbiosi. Sono risultati da debolmente consistenti a consistenti e di colore grigio-azzurro. Lo spessore dei depositi incontrato nel corso delle indagini geognostiche è variabile da 2 m a 6 m;
- depositi argillosi (DA), costituiti da termini argillosi di colorazione grigio-azzurra con componente limosa decrescente con la profondità. Compatti e consistenti.


Autorità Portuale di Taranto

Interventi per il dragaggio di 2,3 M m³ di sedimenti in area Molo Polisettoriale e per la realizzazione di un primo lotto della cassa di colmata funzionale all'ampliamento del V Sporgente del Porto di Taranto

Relazione di calcolo impianto di dewatering - pozzi

Data 05/2016
Rev. B
c.d.c.: C296B
360B.docx



LEGENDA

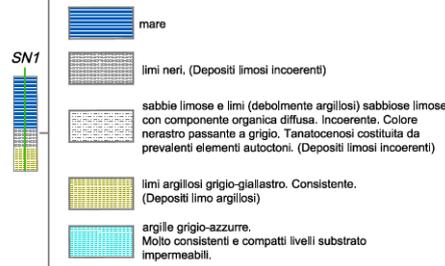
--- Quota m s.l.m.

PERFORAZIONI:

- SM3 Campagna settembre - ottobre 2011
- SN1 Campagna settembre - ottobre 2012

--- Linea di correlazione

SEQUENZA STRATIGRAFICA RICAVATA DAI SONDAGGI



SEQUENZE GEOLOGICHE INTERPRETATIVE

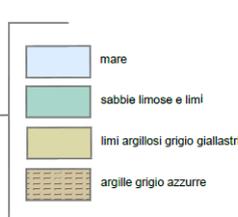


Figura 3-3: Modello lito-stratigrafico lato AB – Progetto Definitivo

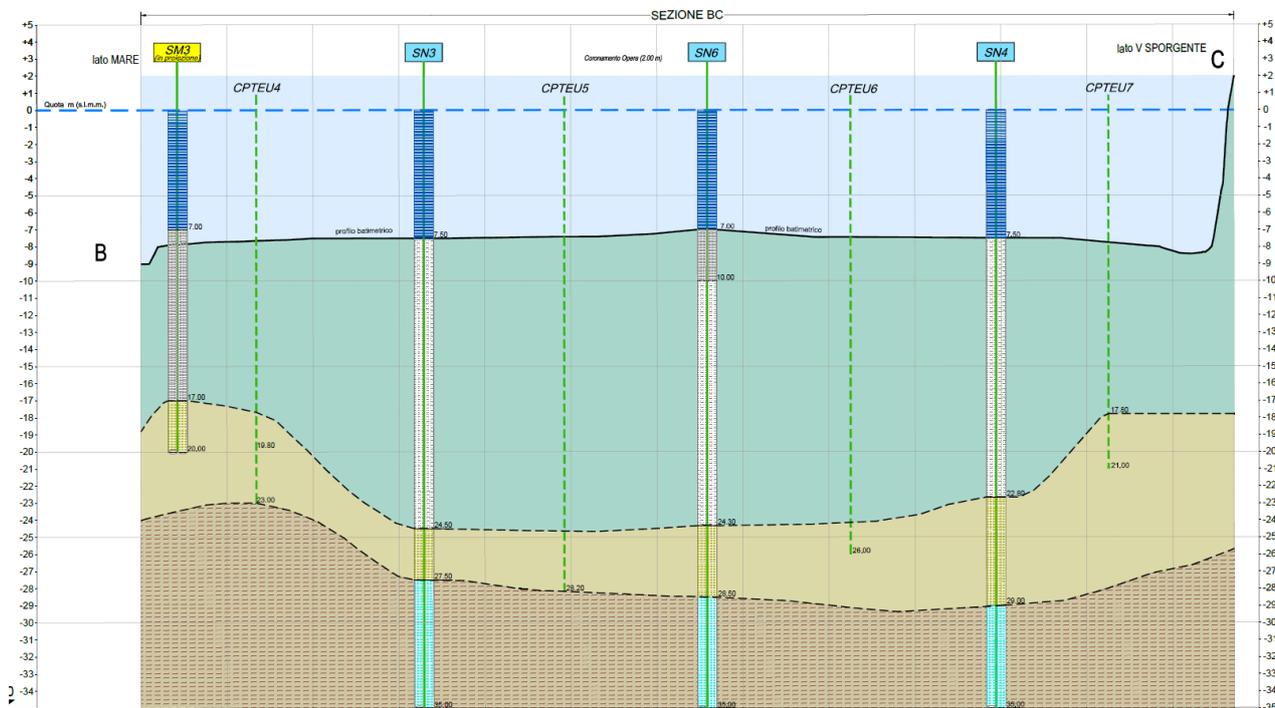


Figura 3-4: Modello lito-stratigrafico lato BC – Progetto Definitivo

Le principali differenze, con particolare riferimento agli aspetti relativi alla consolidazione della colmata, riguardano essenzialmente le potenze e le caratteristiche fisiche e meccaniche dei Depositi Limosi, individuati e caratterizzati in ambito di PD come DLS, che di fatto costituiscono i terreni di fondazione della cassa di colmata.

La predetta unità litologica, rispetto alle indagini condotte in ambito di Progetto Esecutivo, non si presenta come un materiale a matrice sabbio-limosa a comportamento incoerente, come caratterizzata in ambito di PD, ma essenzialmente come un materiale a principale componente limo-argillosa a comportamento coesivo, caratterizzato da scarsissime proprietà meccaniche. Tali materiali, caratterizzati da spessori variabili orientativamente tra 13 e 16m, presentano i caratteri tipici dei depositi coesivi normal-consolidati ad elevata compressibilità. Tale litologia si presenta sovrastata da uno strato fangoso di sedimenti ricchi di sostanze organiche in matrice limo-sabbiosa caratterizzato da spessori maggiori di 2m. Il substrato pleistocenico caratterizzato dalle argille consistenti si individua a profondità comprese tra -20 e -27m essenzialmente in linea con il modello geotecnico di Progetto Definitivo.

Il passaggio tra i depositi alluvionali compressibili e il substrato argilloso consistente non si presenta sempre netto, ma talvolta intercalato in forma di singolarità spaziale, a lenti sabbiose e/o sabbio-ghiaiose con ciottoli eterometrici, di spessore variabile fino ad alcuni metri, concentrate principalmente lungo l'asse BC della cassa di colmata.

Per quanto detto, i materiali costituenti i terreni di fondazione del corpo di colmata possono essere inquadrati essenzialmente nell'ambito di un unico deposito coesivo normalconsolidato a carattere limo-argilloso caratterizzato da scarsissime proprietà meccaniche, Unità geotecnica DLA, presente tra circa -10 s.l.m. fino a profondità medie

variabili tra -18 fino a circa -23 s.l.m.. Tale litologia insiste principalmente sul substrato argilloso consistente definito nell'ambito dell'Unità geotecnica DA e, lungo l'asse BC della cassa di colmata, sui livelli sabbio-ghiaiosi in quadrabili nell'ambito dell'Unità geotecnica DLS.

Risulta, inoltre, opportuno precisare che i depositi fangosi che caratterizzano i primi 2-3m del fondale, in relazione ai bassissimi livelli di consistenza registrati nell'ambito delle prove geotecniche eseguite, non vengono tenuti in conto nella presente modellazione. Tali spessori, infatti, verranno ad inglobarsi molto verosimilmente nei sedimenti ricollocati in cassa, pertanto, nelle modellazioni di seguito riportate, tali spessori sono stati assimilati agli spessori della colmata.

I parametri caratteristici associati alle varie litologie sono stati mediati rispetto ai dati raccolti nell'ambito della recente campagna geognostica, e nello specifico, rispetto alle prove Lefranc in foro, alle prove CPTu ed alle prove edometriche eseguite strettamente nell'ambito dell'impronta della cassa di colmata. Tali dati, inoltre, essendo stati ricavati nell'ambito di sondaggi e prove, eseguite strettamente nell'ambito del volume significativo interagente con la cassa di colmata possono ritenersi piuttosto affidabili ai fini del modello geotecnico da adottare.

Per quanto attiene ai valori di permeabilità caratteristici, è stato possibile valutare in maniera adeguata la tipica anisotropia e variabilità di tale grandezza, rispetto alle misure di permeabilità orizzontale e verticale associate ai vari schemi delle prove geotecniche eseguite, oltre che, rispetto ai concetti di permeabilità microstrutturale (associata tipicamente a misure in piccola scala, cella edometrica e piezocono) e permeabilità macrostrutturale o in banco (associata tipicamente a misure in grande scala, prove Lefranc).

Per quanto detto, si è ritenuto ragionevole associare i valori caratteristici di permeabilità verticale (kv), ai valori mediati delle misure in cella edometrica tenuto conto dell'effettivo stato tensionale efficace funzione della profondità, mentre quelli di permeabilità orizzontale (kh) ad una condizione mediata tra le misure di piezocono in prova di dissipazione e le misure in foro da prove Lefranc.

Tale caratterizzazione consentirà di tener conto in modo adeguato dei suddetti aspetti sia nell'ambito dei modelli numerici da mettere a punto per le analisi di consolidazione, e sia rispetto ad un eventuale confronto con i classici modelli analitici basati sulla teoria della consolidazione monodimensionale (e/o radiale), rispetto alla valutazione dei coefficienti di consolidazione verticale ed orizzontale.

I valori caratteristici di compressibilità sono stati valutati rispetto alle prove edometriche, tenuto conto delle effettive condizioni litostatiche e del relativo grado di consolidazione. Per quanto attiene al modulo di compressibilità edometrica Eed, i valori relativi alle prove edometriche sono stati diagrammati con la profondità e confrontati con l'interpretazione delle diagrafie CPTu realizzate nell'impronta della cassa di colmata. Gli indici di compressibilità e rigonfiamento Cc e Cs sono stati mediati sul campione omogeneo dei dati.

Si rimanda alla Relazione Geotecnica di Progetto Esecutivo, per valutazioni di maggiore dettaglio.

Per quanto attiene ai parametri geotecnici assegnati al materiale di colmata, ci si è riferiti a studi bibliografici, correlazioni di letteratura, nonché ai dati disponibili da alcune sperimentazioni in corso, nell'ambito del Porto di Taranto.

Formazione	γ (kN/m ³)	OCR	c' (kPa)	φ' (°)	Eed (MPa)	e_0	Cc	Cs	Kv (m/s)	Kh (m/s)	Cv (m ² /s)	Ch (m ² /s)
Materiale di colmata stabilizzato (Colm)	16	1	0	18	0.5	1.5	0.45	0.08	4.5·10 ⁻⁷	4.5·10 ⁻⁷	-	-
Limi argillosi (DLA)	18	1	13	24	0.5-3.0	1.25	0.29	0.054	2.0·10 ⁻⁹	2.0·10⁻⁷	2.8·10 ⁻⁷	4.8·10 ⁻⁶
Argille grigio azzurre (DA)	19	7	25	25	5-15	0.83	0.21	0.036	4.5·10 ⁻¹⁰	1.5·10 ⁻⁸	3.5·10 ⁻⁷	3.3·10 ⁻⁶

Figura 3-5: Tabella parametri geotecnici caratteristici – Progetto Esecutivo

Rispetto alla caratterizzazione geotecnica sviluppata in Progetto Esecutivo, sono emerse alcune sensibili differenze rispetto ai parametri caratteristici assunti in ambito di Progetto Definitivo, principalmente per quanto attiene ai depositi limosi compressibili, che costituiscono, quindi, di fatto, i materiali di fondazione della cassa di colmata e che ne governano, quindi, principalmente, il comportamento tensio-deformativo atteso (Unità DLS in Progetto Definitivo – Unità DLA in Progetto Esecutivo).

Sono stati riscontrati, nello specifico, parametri di compressibilità dei materiali di fondazione tendenzialmente superiori, e valori di permeabilità generalmente inferiori rispetto a quelli caratteristici assunti in ambito di Progetto Definitivo. Per tali materiali, infatti, rispetto alle tabelle dei parametri geotecnici caratteristici riportati nella Relazione Geotecnica di Progetto Definitivo, veniva indicato un valore di permeabilità di **9.7·10⁻⁶ m/s**, e un range di modulo di rigidità operativo **2-5 MPa**.

Rispetto a quanto sopra esposto, come noto, rispetto ai risultati delle analisi condotte, sono stati riscontrati cedimenti di maggiore entità e tempi di consolidazione più lunghi rispetto a quanto valutato in ambito di PD.

Tali evidenze, come detto, hanno comportato la necessità di rivedere le prestazioni attese per il sistema, a parità di soluzione prevista in Progetto Definitivo, ammettendo necessariamente tempi di consolidazione maggiori.

Le analisi condotte, differenziate rispetto ai fenomeni da valutare, sono state condotte mediante l'ausilio del programma agli elementi finiti PLAXIS2D 2015 e del software alle differenze finite Condes0.

In modo separato, si è deciso di affrontare i differenti aspetti relativi ai diversi processi di consolidazione attesi per la cassa di colmata, con particolare riferimento al corpo di colmata e ai terreni di fondazione. I fenomeni esaminati sono due, sintetizzati in:

- Processo di consolidazione del materiale di colmata e del terreno di fondazione, (Plaxis2D)
- Processo di consolidazione in grandi deformazioni del materiale di colmata per "self-weight", (Condes0)

In entrambe le analisi, viene tenuta debitamente conto del processo di dewatering previsto per l'accelerazione dei processi di consolidazione.

Il risultato delle analisi ha consentito di dimostrare l'efficacia del dewatering nell'accelerare i tempi di consolidazione, rispetto a entrambi i processi.

4 ANALISI DI CONSOLIDAZIONE (PLAXIS 2D)

Il modello di calcolo impostato ai fini delle analisi di consolidazione è stato scelto come rappresentativo dei processi di filtrazione radiali associati ad un cilindro filtrante equivalente con elemento drenante centrale, rappresentativo della distribuzione geometrica a maglia triangolare equilatera prevista per i dreni.

Nel caso in esame, rispetto ad una maglia di lato pari a 40m, il modello cilindrico di filtrazione equivalente è stato impostato con diametro 42m ($d_e \approx 1.05 \cdot S$). Il modello bidimensionale da implementare nella analisi sarà quindi a geometria assialsimmetrica rispetto al cilindro equivalente.

Le condizioni al contorno assunte nel modello, quindi, consistono nell'impostazione di superfici esterne impermeabili.

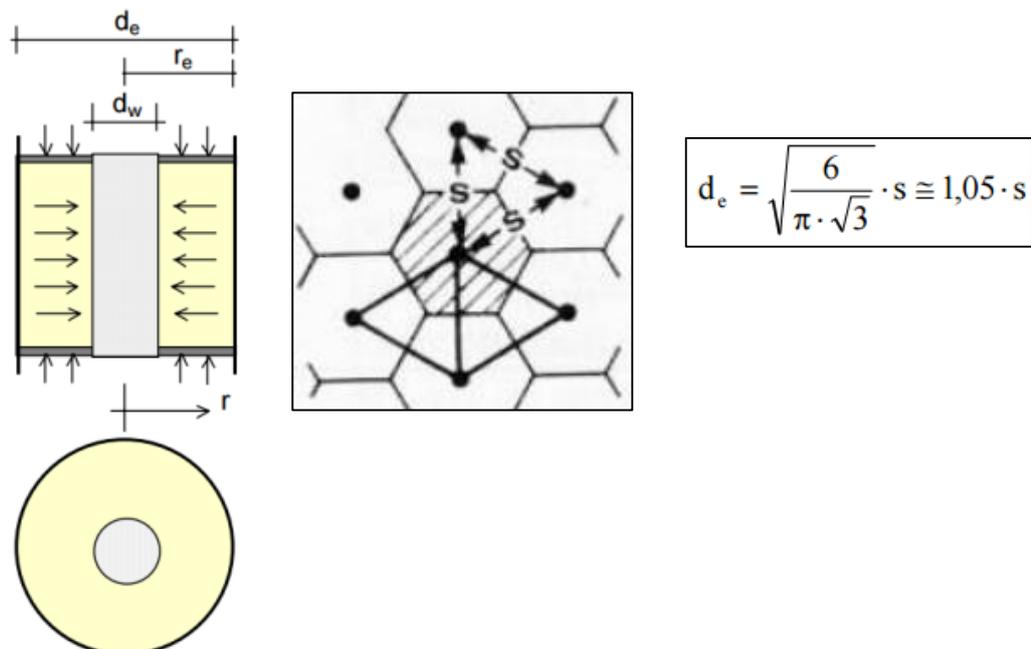


Figura 4-1: Geometria del sistema di filtrazione radiale equivalente

4.1 MODELLAZIONE NUMERICA

L'analisi numerica è stata condotta schematizzando il problema reale con un modello a geometria assialsimmetrica equivalente in termini geometrici alla sezione radiale del generico cilindro di filtrazione relativo a ciascuna verticale di drenaggio, simulando, quindi, i meccanismi di filtrazione tipicamente radiali associati alla modellazione di tali problemi. Per via della variabilità spaziale degli spessori del corpo di colmata, e quindi di entità del carico applicato, la geometria in pianta della vasca di colmata è stata suddivisa in 3 diverse fasce caratterizzate da diversi spessori delle diverse litologie valutate rispetto al profilo geologico-stratigrafico ricostruito sul lato AB, nonchè rispetto alle quote finali previste in Progetto Definitivo.

In seguito si riporta una tabella riassuntiva delle diverse potenze degli strati compressibili che caratterizzano ogni fascia.

	H[Colm] [m]	H[DLA] [m]
Fascia 1	9.5	13
Fascia 2	11	12
Fascia 3	11.5	14.5

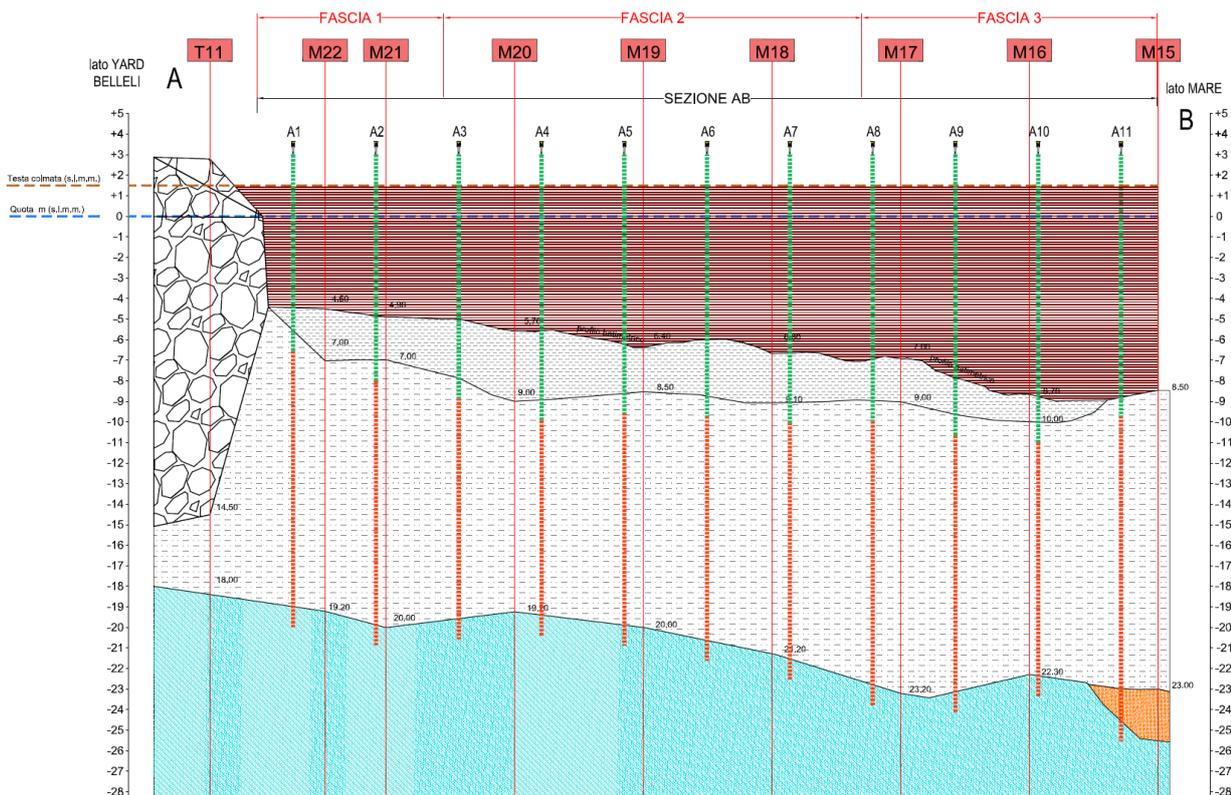


Figura 4-2: Rappresentazione fasce di calcolo

Le condizioni al contorno assunte, quindi, consistono nell'impostazione di superfici esterne impermeabili e schematizzazione del dreno centrale tramite applicazione di materiale caratterizzato da permeabilità sensibilmente più elevata rispetto a quella del terreno naturale.

La modellazione delle portate emunte è avvenuta tramite l'applicazione di una specifica funzione del software ipotizzando condizioni di regime di filtrazione stazionario (steady state).

Le fasi di calcolo adottate per la modellazione numerica sono state implementate secondo la seguente successione, tenuto conto delle fasi realizzati dell'opera:

FASE A: Condizioni geostatiche iniziali

Calculation type: Plastic

FASE B: Realizzazione colmata, applicazione istantanea del carico (CND)

Calculation type: Plastic

FASE C: Realizzazione sistema di drenaggio, avvio del processo di emungimento ed analisi del processo di consolidazione

Calculation type: Fully coupled flow-deformation

La modellazione adottata quindi ha consentito di valutare la variazione dello stato tensionale rispetto all'applicazione dei carichi e quindi la relativa generazione del regime di sovrappressioni interstiziali ad esso proporzionale. Il processo di consolidazione e dewatering (fase C) viene modellato mediante una analisi idro-meccanica accoppiata in cui è possibile analizzare il variare delle grandezze di interesse, come regime delle pressioni interstiziali e deformazioni, in funzione del tempo e quindi della dissipazione delle pressioni interstiziali tenuto conto del sistema di drenaggio previsto.

4.1.1 Modello costitutivo

Per quanto attiene la definizione dei parametri di compressibilità, ai fini di cogliere meglio il comportamento tenso-deformativo dei terreni in oggetto, la modellazione numerica in ambito Plaxis 2D, è stata eseguita utilizzando un modello costitutivo "Soft Soil" (Cam-Clay), più aderente alla realtà e al particolare problema in esame, relativamente ad analisi così dette "in grandi deformazioni", con elevato contributo deformativo rispetto alla componente plastica.

Il modello costitutivo Soft Soil è un modello elastico non lineare con incrudimento isotropo. È mutuato dal noto modello Cam Clay, sviluppato a Cambridge negli anni sessanta da Roscoe e Schofield, la cui idea basilare è considerare l'effetto di incrudimento che la tensione efficace media esercita sul comportamento tenso-deformativo del terreno. In particolare, la legge costitutiva è caratterizzata da una relazione lineare tra le deformazioni volumetriche ed il logaritmo della tensione sferica, come rappresentato nella Figura 4-3:



Autorità Portuale di Taranto

Interventi per il dragaggio di 2,3 M m³ di sedimenti in area Molo Polisettoriale e per la realizzazione di un primo lotto della cassa di colmata funzionale all'ampliamento del V Sporgente del Porto di Taranto

Relazione di calcolo impianto di dewatering - pozzi

Data 05/2016
 Rev. B
 c.d.c.: C296B
 360B.docx

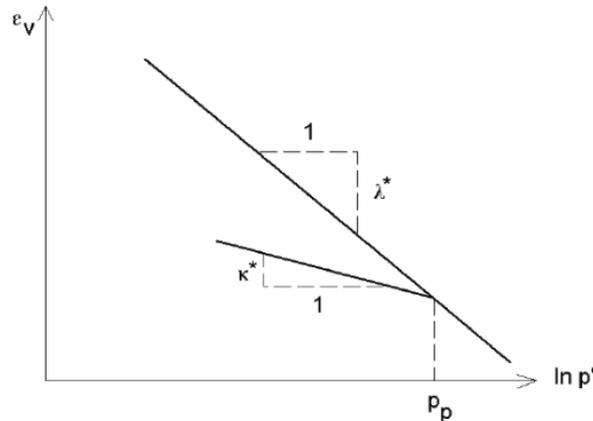


Figura 4-3: Relazione logaritmica tra le deformazioni volumetriche e la tensione efficace media

Il parametro λ^* è l'indice di compressione modificato, che descrive la compressibilità del materiale in un processo di primo carico. Differisce dal simbolo λ utilizzato da Burland (1965) perché, come si vede dalla figura, usa, non l'indice dei vuoti ma le deformazioni volumetriche. Il parametro k^* è invece l'indice di rigonfiamento modificato, il quale descrive la compressibilità del materiale in un processo di scarico e ricarico. Anche in questo caso differisce dal simbolo k di Burland, anche se il rapporto λ^*/k^* è uguale a quello di Burland λ/k .

L'equazione della superficie di snervamento nel piano q - p' è data da:

$$p'_p = p' + \frac{q^2}{M^2 \cdot (p' + c' \cot \phi')}$$

in cui p'_p rappresenta la tensione isotropa di snervamento. Nel piano q - p' l'equazione descrive un'ellisse.

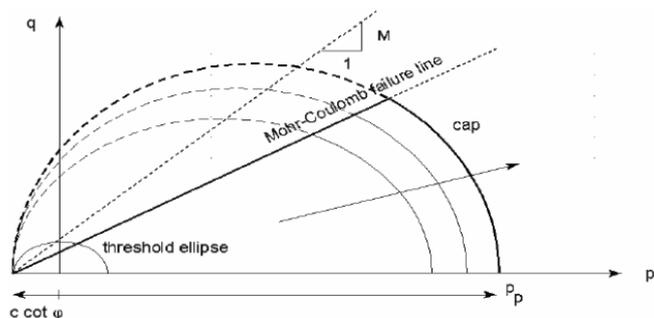


Figura 4-4: Superficie di snervamento nel piano q - p' del modello Soft Soil

Il parametro M determina il diametro minore dell'ellisse, che è responsabile del rapporto tra la tensione orizzontale e quella verticale in un processo di compressione primario unidimensionale. Dunque, il parametro M influenza in maniera significativa il coefficiente di spinta a riposo K_0^{NC} . In ragione di quanto appena detto il valore da assegnare al parametro M può essere scelto in modo da interpolare i dati di un processo di compressione monodimensionale

per un valore noto del coefficiente di spinta a riposo. L' espressione proposta da Brinkgreve (1994) per il Soft Soil è riportata in basso:

$$M = 3 \cdot \sqrt{\frac{(1 - k_0^{NC})^2}{(1 + 2k_0^{NC})^2} + \frac{(1 - k_0^{NC}) \cdot (1 - 2\nu) \cdot \left(\frac{\lambda^*}{k^*} - 1\right)}{(1 + 2k_0^{NC}) \cdot (1 - 2\nu) \cdot \frac{\lambda^*}{k^*} - (1 - k_0^{NC}) \cdot (1 + \nu)}}$$

in cui $K_0^{NC} = 1 - \sin\phi'$ (Jaky, 1936) rappresenta il coefficiente di spinta a riposo nelle condizioni di normalconsolidazione, ν è il coefficiente di Poisson, $\lambda^* = \lambda/1 + e$ ("λ" è l'indice di compressione ed "e" l'indice dei vuoti), $k^* = k/1 + e$ ("k" rappresenta l'indice di rigonfiamento). L'interpretazione e l'utilizzo di M nel Soft Soil differisce sostanzialmente da quella del Cam Clay Modificato, in cui il parametro rappresenta la pendenza della linea di stato critico, e questo perché nel Soft Soil la rottura non è necessariamente associata al raggiungimento della condizione di stato critico. Il criterio di rottura utilizzato, infatti, è un criterio alla Mohr Coulomb rappresentato nel piano q-p' da una retta identificata da due parametri (la coesione e l'angolo di attrito del materiale, che può essere scelto pari a quello di stato critico). Gli apici superiori di tutte le possibili ellissi prodotte dall'incrudimento sono allineati su una retta inclinata proprio di M.

4.1.2 Risultati analisi

Di seguito si riportano i risultati delle analisi numeriche condotte per la Fascia 1, in termini di regime delle pressioni interstiziali, stato tensionale verticale efficace e deformazioni verticali. I valori di compressibilità ed indice dei vuoti, assunti nella modellazione per il materiale di colmata, sono stati assunti come rappresentativi di una fase sufficientemente avanzata dei processi di redistribuzione e ricostituzione dei sedimenti dragati deposti in cassa.

Per quanto attiene alla FASE C, le analisi mostrano le condizioni finali raggiunte dalla colmata a valle di un processo di emungimento in continuo spinto fino ad ottenere la depressione del livello piezometrico nel corpo della colmata a valori molto prossimi all' imposta della stessa.

4.1.2.1 Modellazione Plaxis2D – Fascia 1

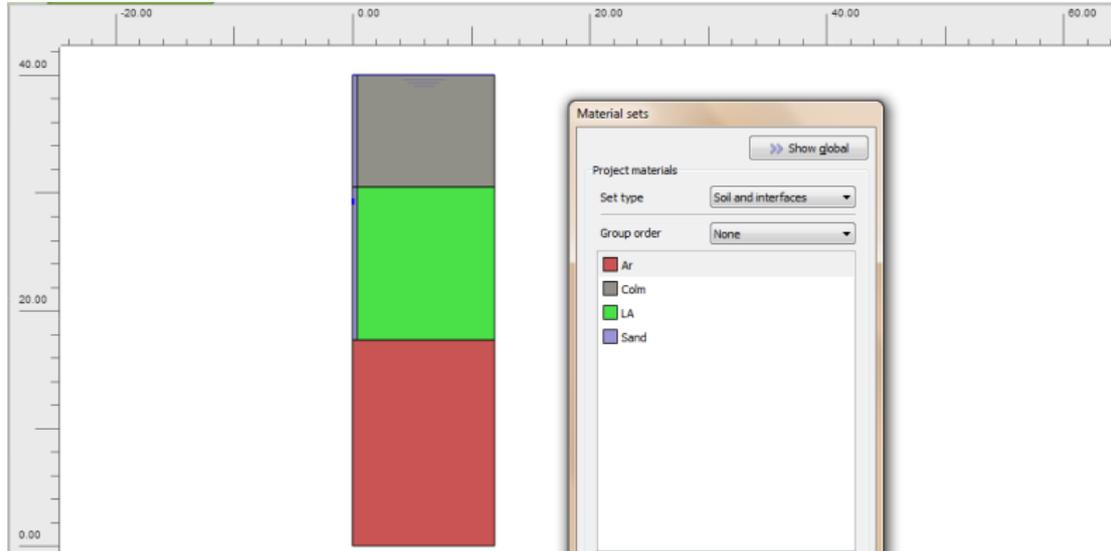


Figura 4-5: Modello Plaxis2D con stratigrafia (Fascia1)

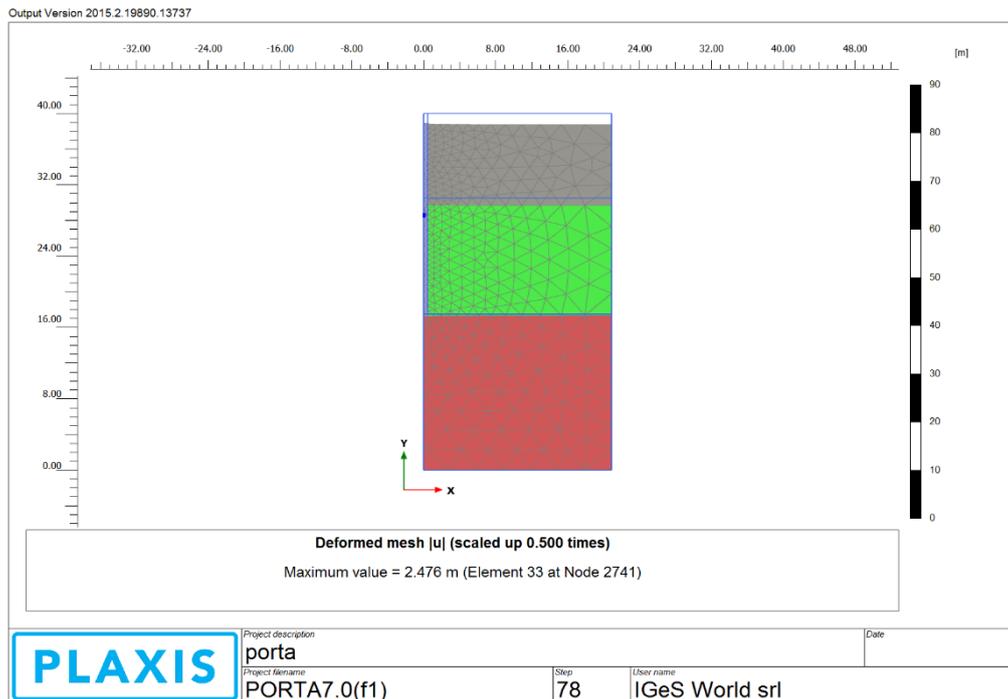


Figura 4-6: Deformata mesh - FASE C (Fascia1)

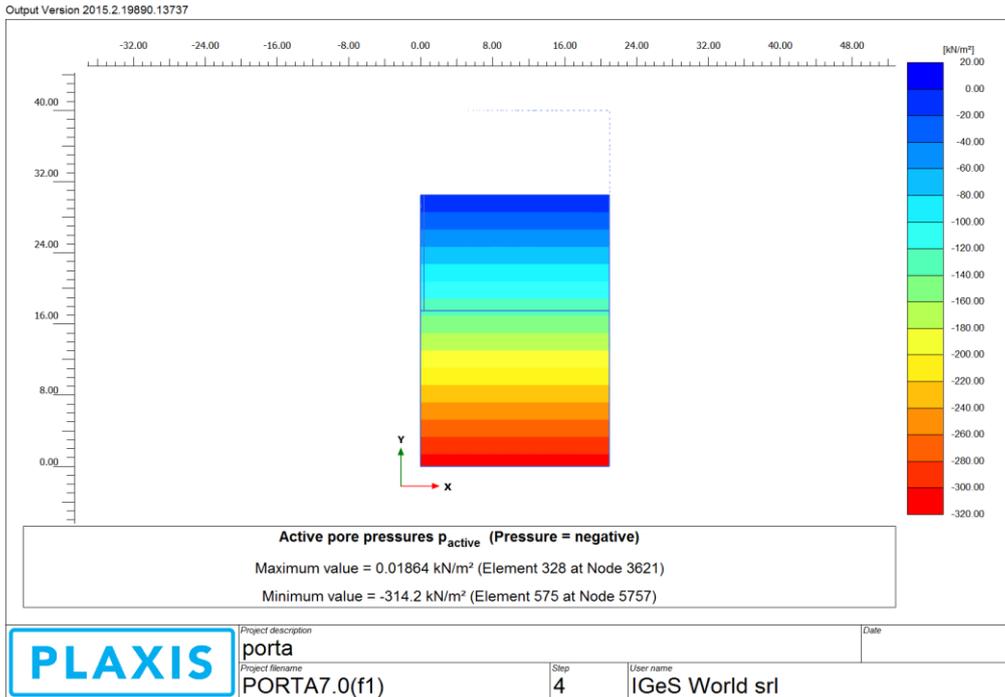


Figura 4-7: Pressioni interstiziali - FASE A (Fascia1)

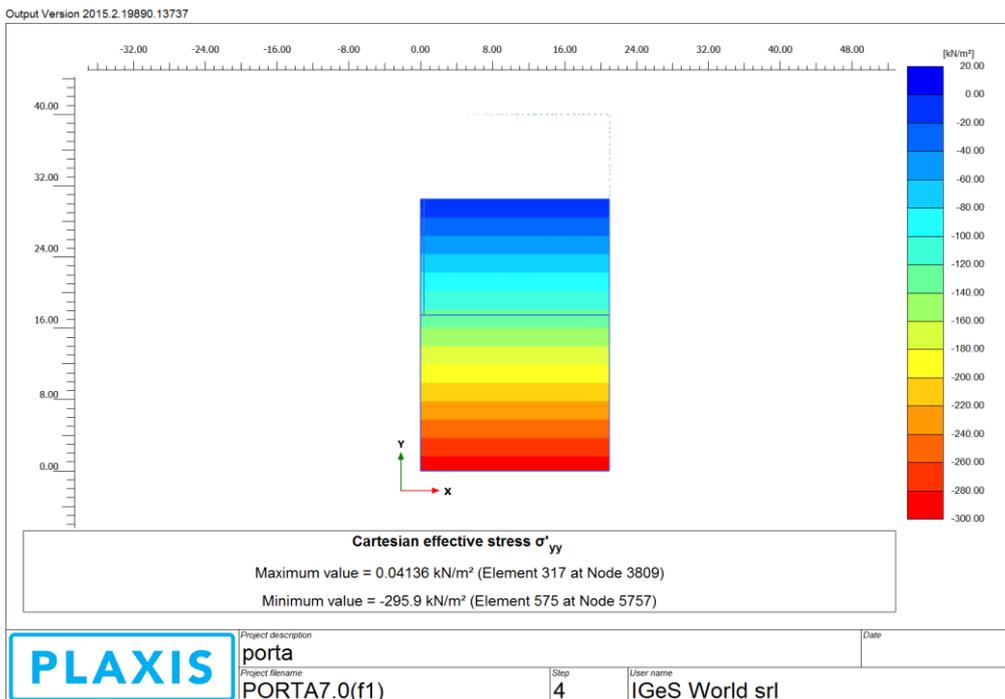


Figura 4-8: Tensioni efficaci σ'_{yy} - FASE A (Fascia1)

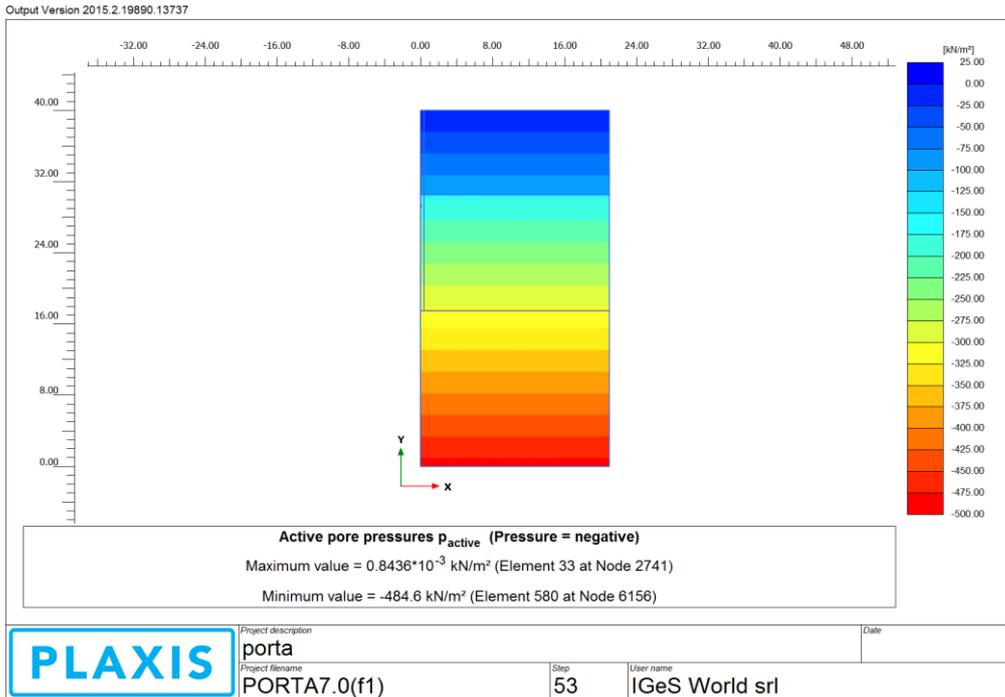


Figura 4-9: Pressioni interstiziali - FASE B (Fascia1)

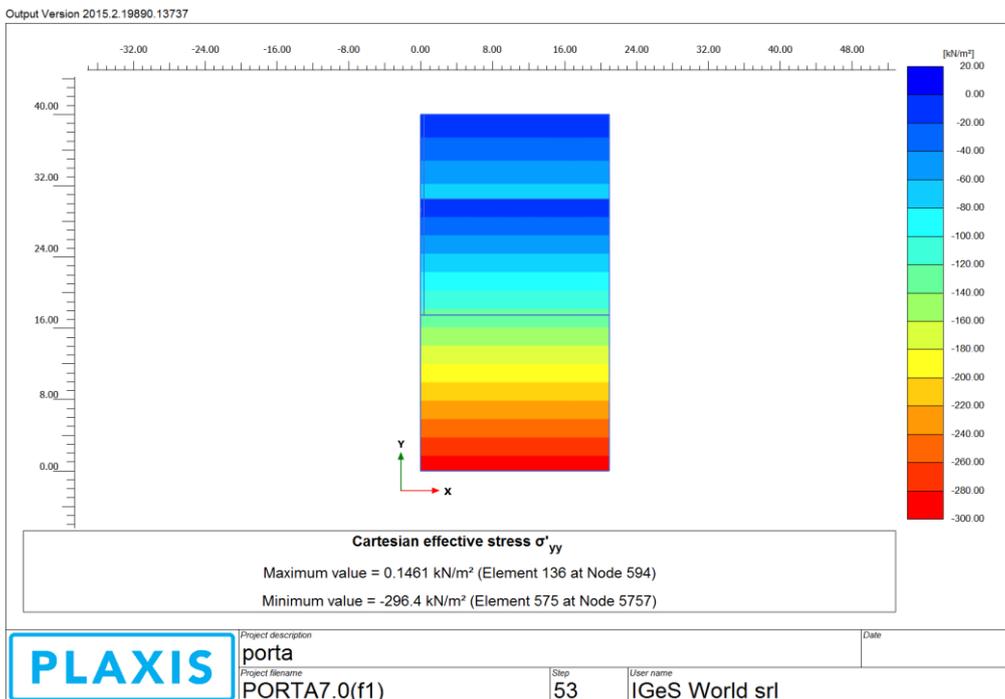


Figura 4-10: Tensioni efficaci σ'_{yy} - FASE B (Fascia1)

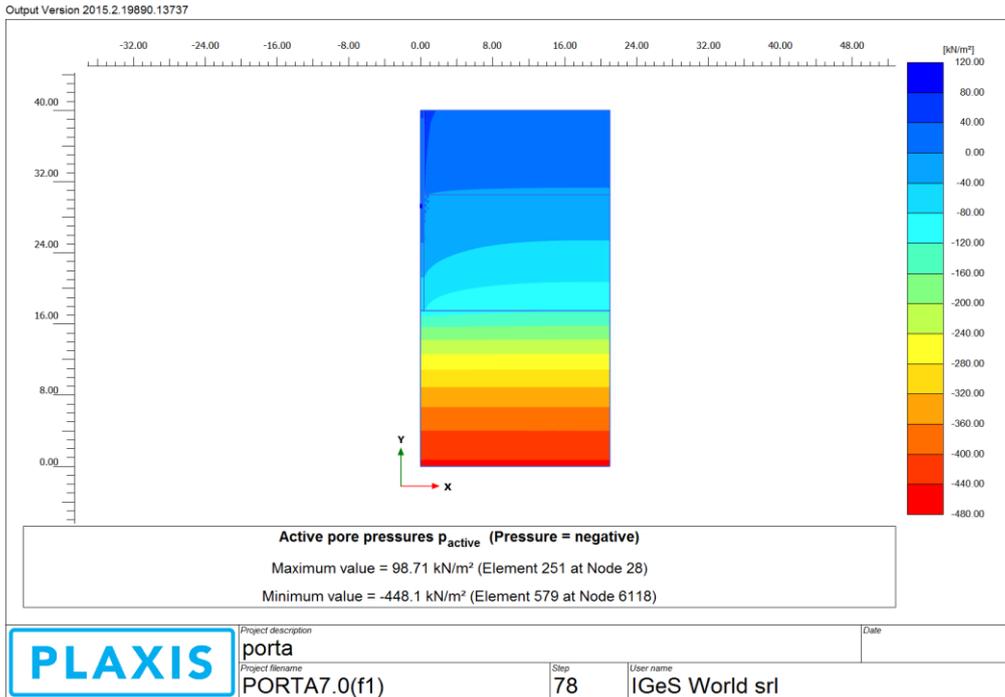


Figura 4-11: Pressioni interstiziali - FASE C (Fascia1)

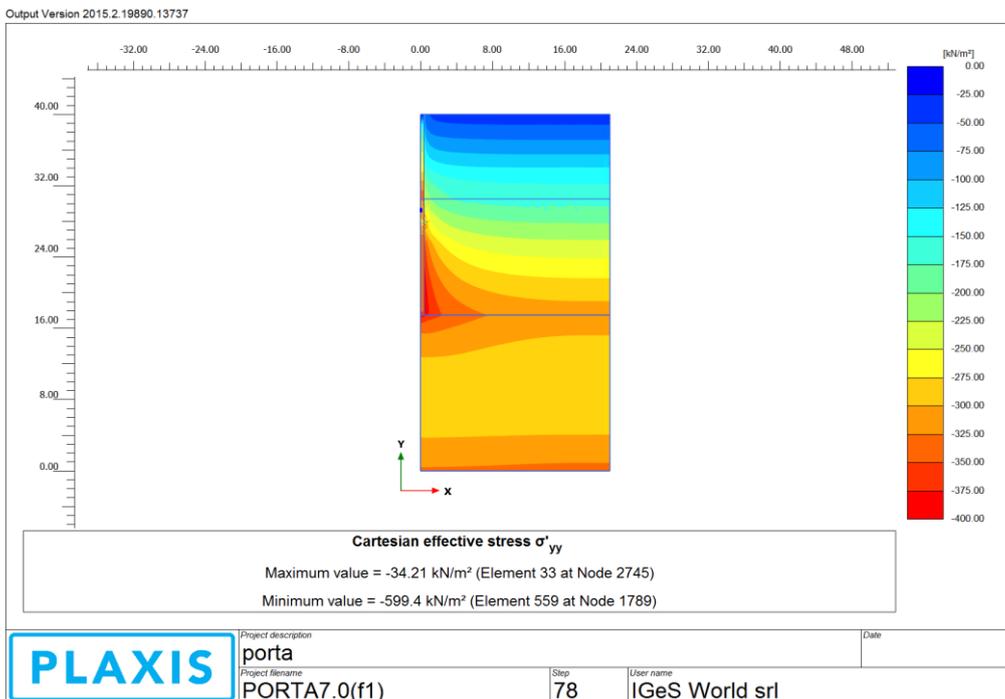


Figura 4-12: Tensioni efficaci σ'_{yy} - FASE C (Fascia1)

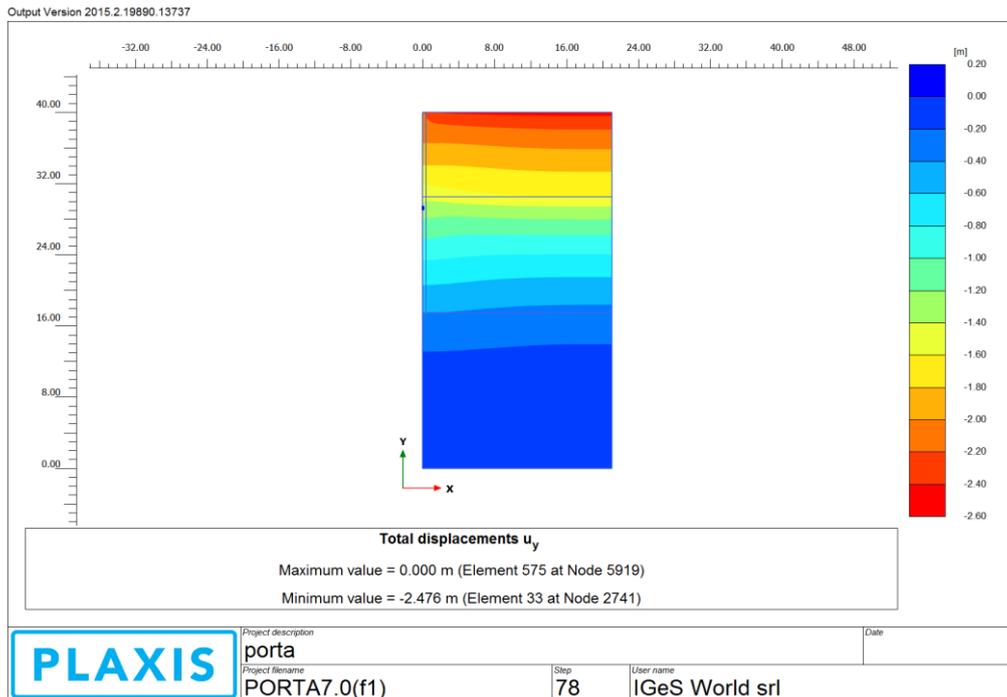


Figura 4-13: Spostamenti verticali - FASE C (Fascia1)

Il valore di cedimento verticale complessivo, valutato al termine dell'analisi, è pari a circa 2.4m. Tale valore può ritenersi ascrivito sia ai processi di consolidazione del materiale di colmata (analizzato in forma più appropriata con le analisi di consolidazione in grandi deformazioni) che nei terreni di fondazione.

La valutazione dell'evoluzione di tale cedimento, e quindi, del regime delle pressioni neutre nel tempo, è stata analizzata rispetto a due punti di controllo del modello, A e B, rispettivamente all'incirca collocati al centro del deposito Limoso (circa $z \approx -16m$) e sul fondo del materiale di colmata (circa $z \approx -9m$).

Dall'andamento del regime delle pressioni interstiziali è possibile notare come, dopo circa 3 anni dall'istante di attivazione del sistema di drenaggio, il livello piezometrico nel materiale di colmata, tende a raggiungere la quota di testa dei depositi limosi di fondale. Ciò conduce dunque, ad un duplice effetto: la forte accelerazione dei processi di consolidazione legati strettamente alla dissipazione del regime di sovrappressioni indotte dal carico nei terreni di fondazione e, la progressiva riduzione del livello piezometrico nei materiali di colmata al fine di consentirne la stabilizzazione per progressiva riduzione dell'indice dei vuoti. Quest'ultimo processo, come detto, verrà analizzato in forma più appropriata con le analisi Condes 0.

Quanto descritto viene riportato in Figura 4-14, dove si osserva come la curva rappresentativa del punto A parta da una condizione iniziale di sovrappressione interstiziale indotta dal carico ($\Delta u \approx 75kPa$) e raggiunga solo dopo meno di 6 mesi la condizione idrostatica. Successivamente la curva, per via dell'emungimento, continua a decrescere fino ad un valore di pressione interstiziale pressoché coincidente al battente idrostatico minimo a fine emungimento valutabile tra 30-50kPa, in ragione della variabilità spaziale legata curvatura del conoide indotto dal moto di

filtrazione, in un tempo in cui il punto B ha sostanzialmente raggiunto una condizione di pressione interstiziale minimale pressoché nulla.

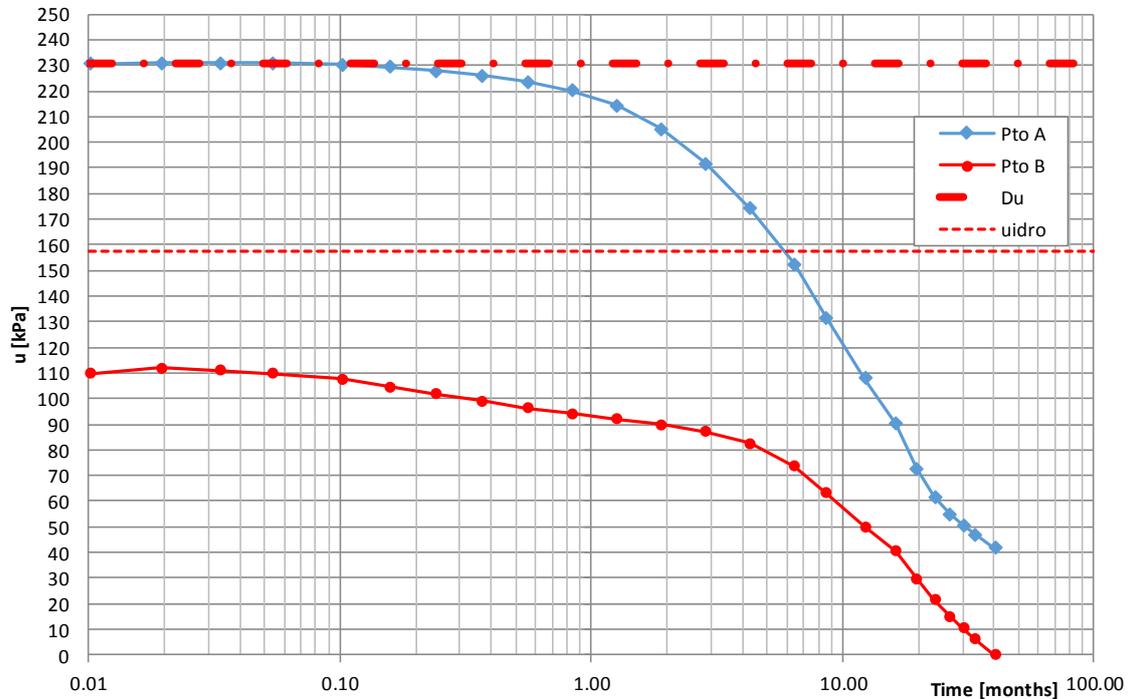


Figura 4-14: Regime pressioni neutre nel tempo - FASE C (Fascia1)

4.1.2.2 Modellazione Plaxis2D – Fascia 2

Di seguito si riportano i risultati delle analisi numeriche condotte per la Fascia 2, in termini di regime delle pressioni interstiziali, stato tensionale verticale efficace e deformazioni verticali. I valori di compressibilità ed indice dei vuoti, assunti nella modellazione per il materiale di colmata, sono stati assunti come rappresentativi di una fase sufficientemente avanzata dei processi di redistribuzione e ricostituzione dei sedimenti dragati depositi in cassa.

Per quanto attiene alla FASE C, le analisi mostrano le condizioni finali raggiunte dalla colmata a valle di un processo di emungimento in continuo spinto fino ad ottenere la depressione del livello piezometrico nel corpo della colmata a valori molto prossimi all'imposta della stessa.

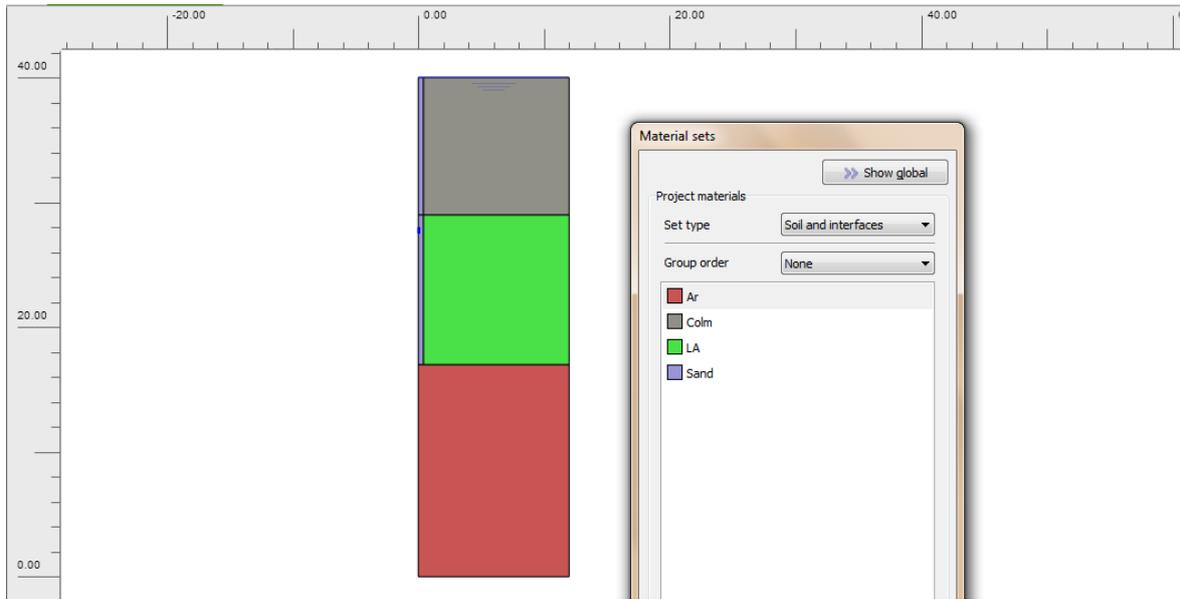


Figura 4-15: Modello Plaxis2D con stratigrafia (Fascia2)

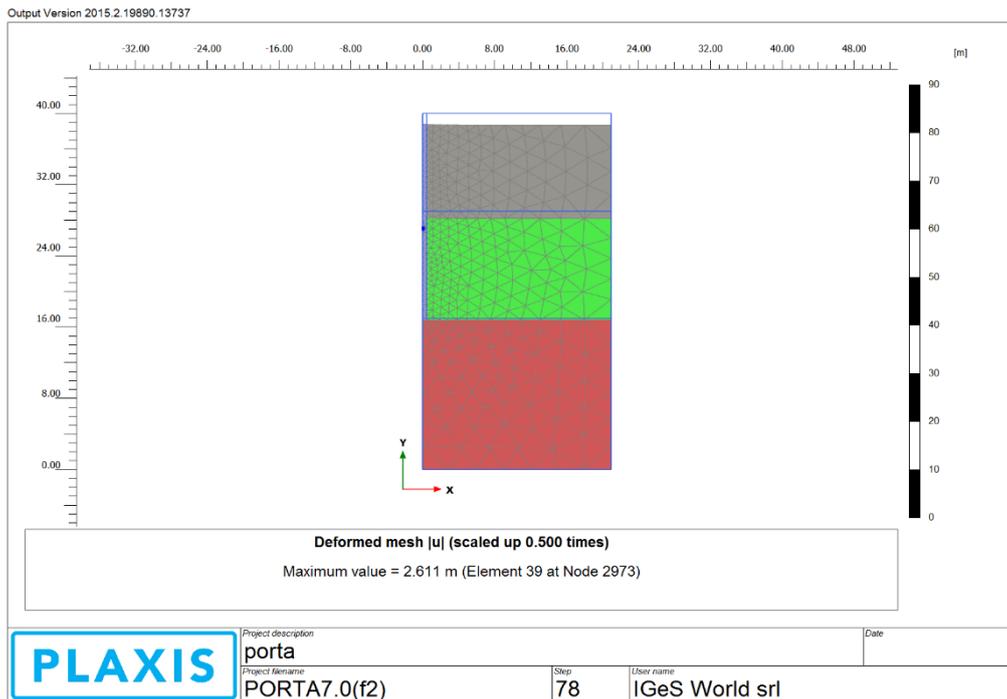


Figura 4-16: Mesh deformata - FASE C (Fascia2)

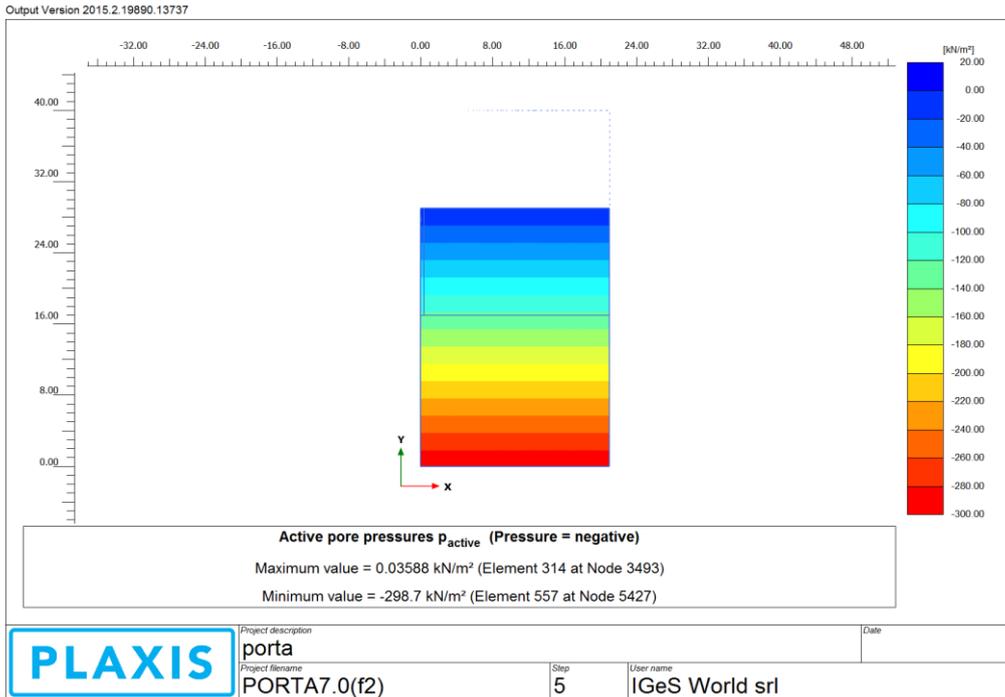


Figura 4-17: Pressioni interstiziali - FASE A (Fascia2)

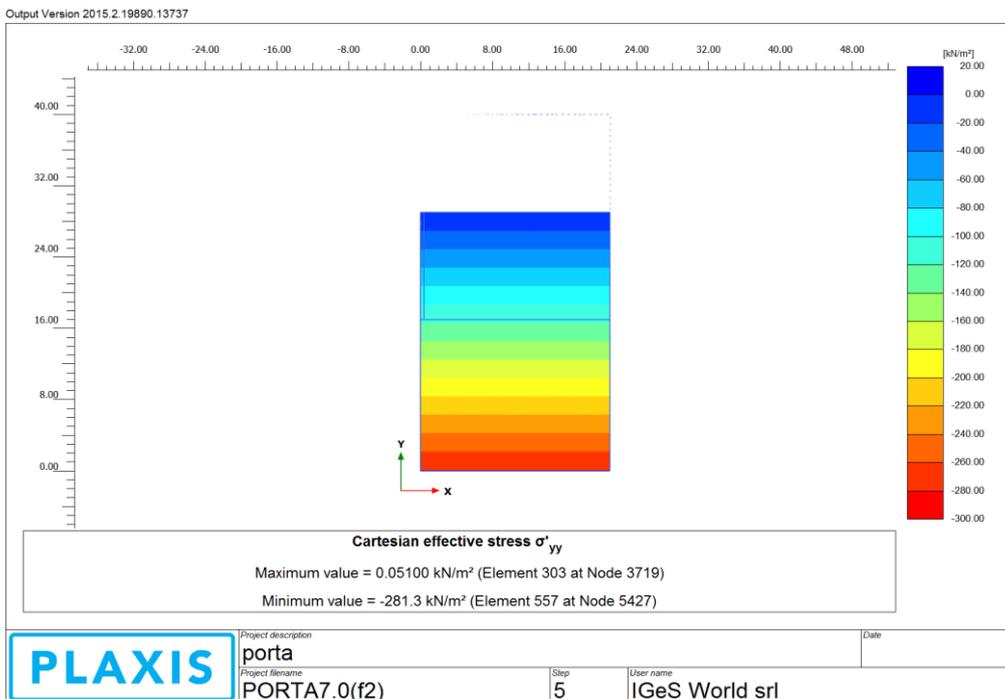


Figura 4-18: Tensioni efficaci σ'_{yy} - FASE A (Fascia2)

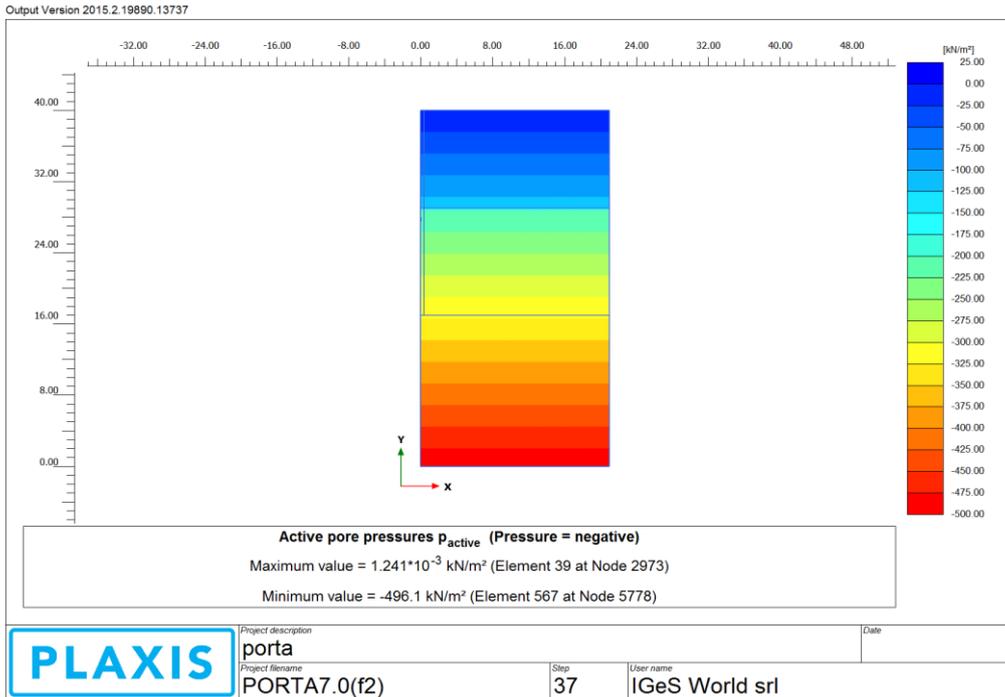


Figura 4-19: Pressioni interstiziali - FASE B (Fascia2)

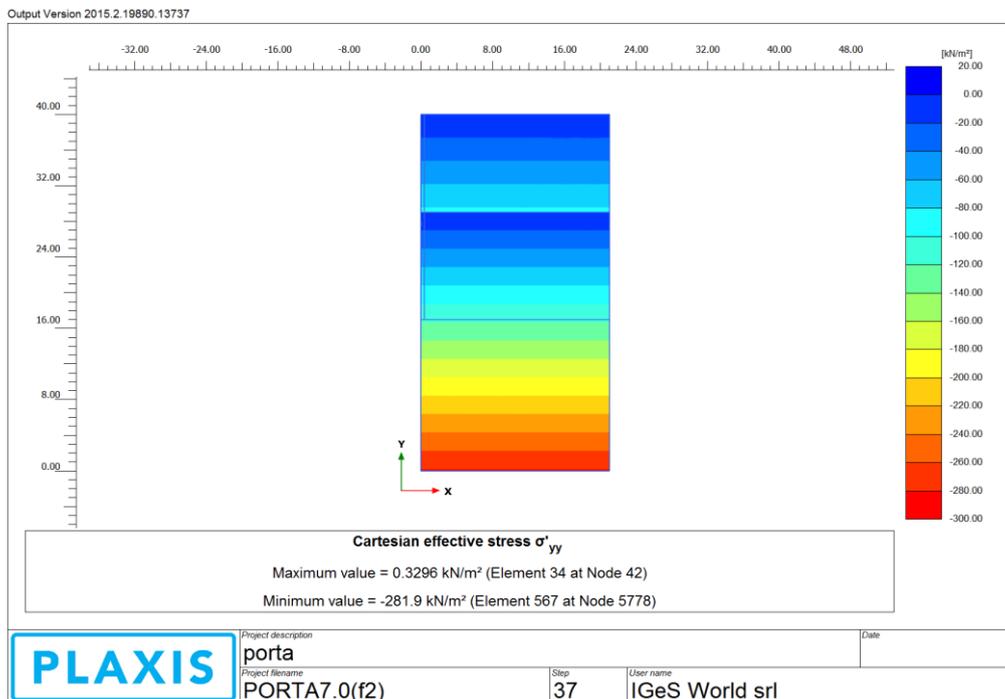


Figura 4-20: Tensioni efficaci σ'_{yy} - FASE B (Fascia2)

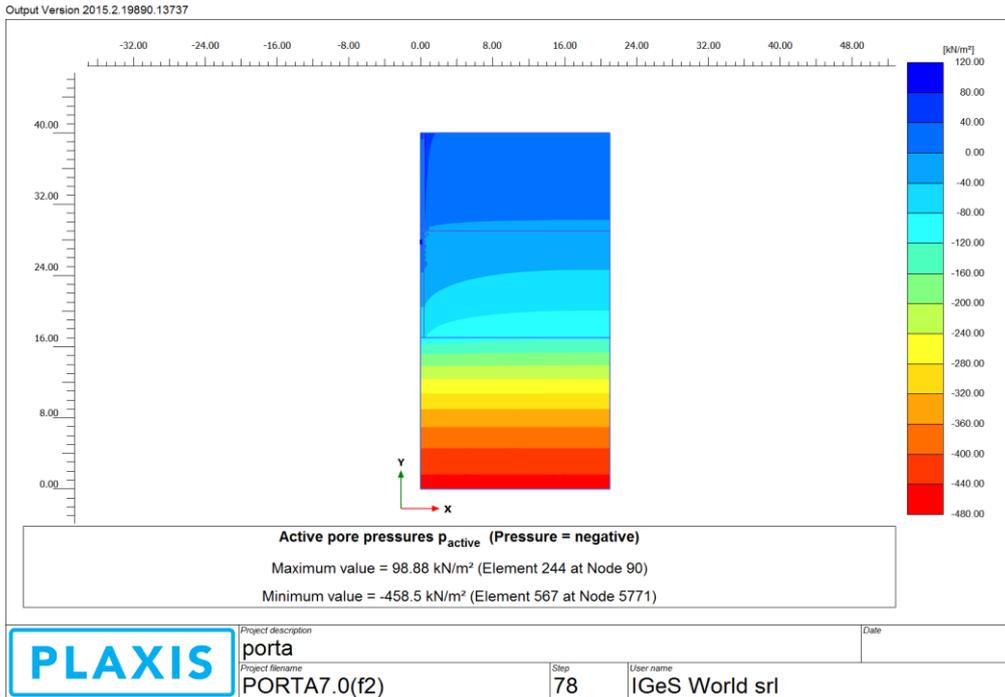


Figura 4-21: Pressioni interstiziali - FASE C (Fascia2)

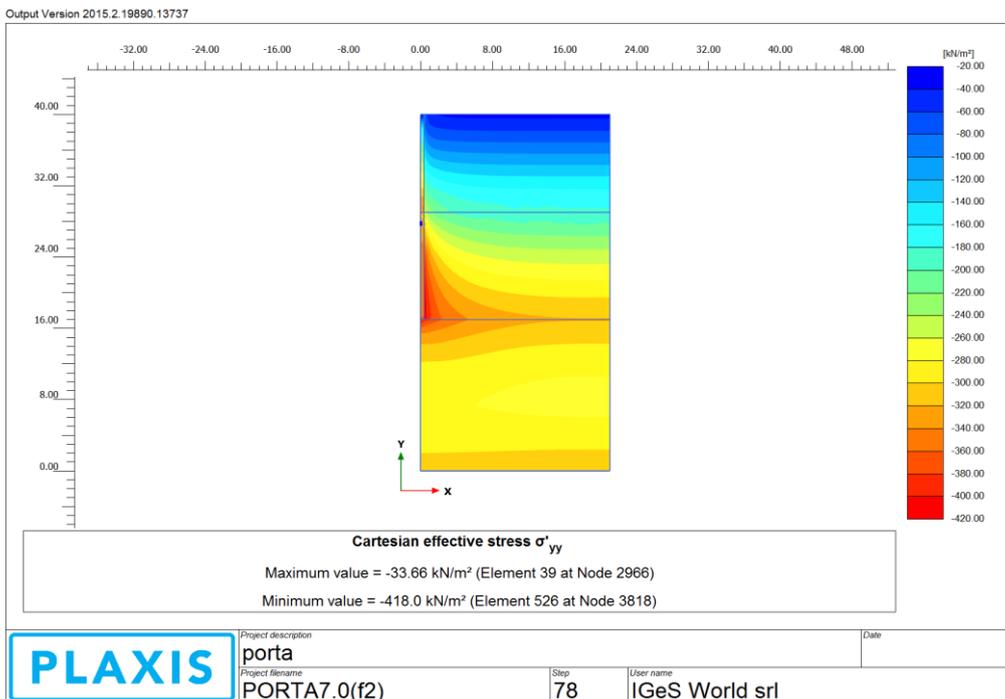


Figura 4-22: Tensioni efficaci σ'_{yy} - FASE C (Fascia2)

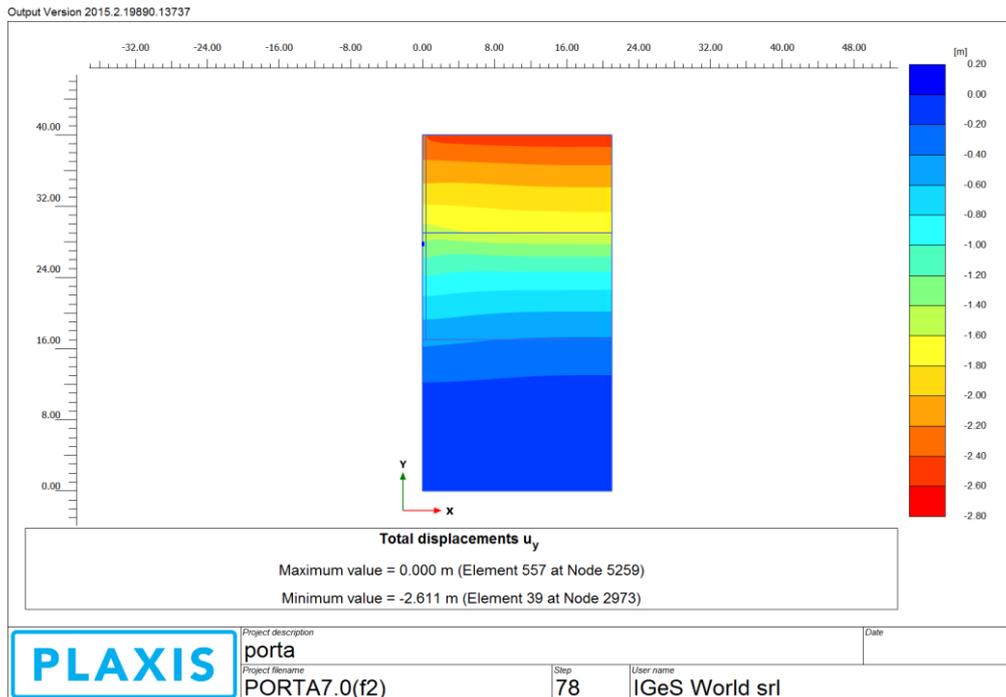


Figura 4-23: Spostamenti verticali - FASE C (Fascia2)

Il valore di cedimento verticale complessivo, valutato al termine dell'analisi, è pari a circa 2.6m. Tale valore può ritenersi ascritto sia ai processi di consolidazione del materiale di colmata (analizzato in forma più appropriata con le analisi di consolidazione in grandi deformazioni) che nei terreni di fondazione.

La valutazione dell'evoluzione di tale cedimento, e quindi, del regime delle pressioni neutre nel tempo, è stata analizzata rispetto a due punti di controllo del modello, A e B, rispettivamente all'incirca collocati al centro del deposito Limoso (circa $z \approx -17m$) e sul fondo del materiale di colmata (circa $z \approx -10m$).

Dall'andamento del regime delle pressioni interstiziali è possibile notare come, dopo circa 3 anni dall'istante di attivazione del sistema di drenaggio, il livello piezometrico nel materiale di colmata, tende a raggiungere la quota di testa dei depositi limosi di fondale. Ciò conduce dunque, ad un duplice effetto: la forte accelerazione dei processi di consolidazione legati strettamente alla dissipazione del regime di sovrappressioni indotte dal carico nei terreni di fondazione e, la progressiva riduzione del livello piezometrico nei materiali di colmata al fine di consentirne la stabilizzazione per progressiva riduzione dell'indice dei vuoti. Quest'ultimo processo, come detto, verrà analizzato in forma più appropriata con le analisi Condes 0.

Quanto descritto viene riportato in Figura 4-24, dove si osserva come la curva rappresentativa del punto A parta da una condizione iniziale di sovrappressione interstiziale indotta dal carico ($\Delta u = 85kPa$) e raggiunga solo dopo meno di 7 mesi la condizione idrostatica. Successivamente la curva, per via dell'emungimento, continua a decrescere fino ad un valore di pressione interstiziale pressoché coincidente al battente idrostatico minimo a fine emungimento valutabile tra 40-50kPa, in ragione della variabilità spaziale legata curvatura del conoide indotto dal moto di filtrazione, in un tempo in cui il punto B ha sostanzialmente raggiunto una condizione di pressione interstiziale minimale pressoché nulla.

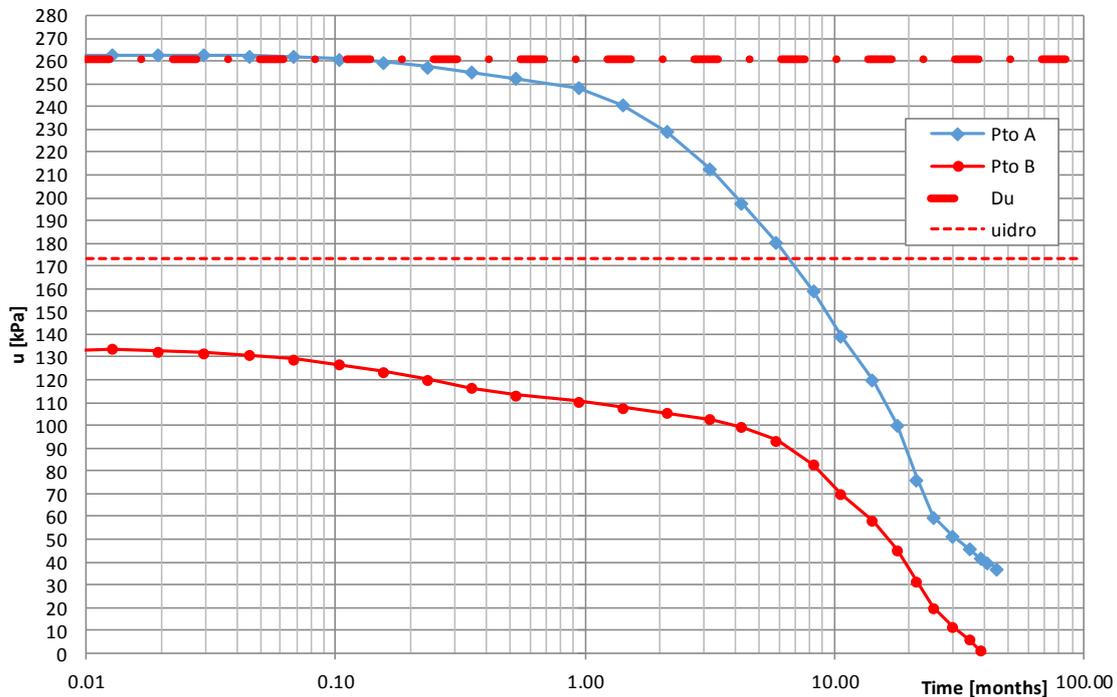


Figura 4-24: Regime pressioni neutre nel tempo - FASE C (Fascia2)

4.1.2.3 Modellazione Plaxis2D – Fascia 3

Di seguito si riportano i risultati delle analisi numeriche condotte per la Fascia 3, in termini di regime delle pressioni interstiziali, stato tensionale verticale efficace e deformazioni verticali. I valori di compressibilità ed indice dei vuoti, assunti nella modellazione per il materiale di colmata, sono stati assunti come rappresentativi di una fase sufficientemente avanzata dei processi di redistribuzione e ricostituzione dei sedimenti dragati depositi in cassa.

Per quanto attiene alla FASE C, le analisi mostrano le condizioni finali raggiunte dalla colmata a valle di un processo di emungimento in continuo spinto fino ad ottenere la depressione del livello piezometrico nel corpo della colmata a valori molto prossimi all'imposta della stessa.

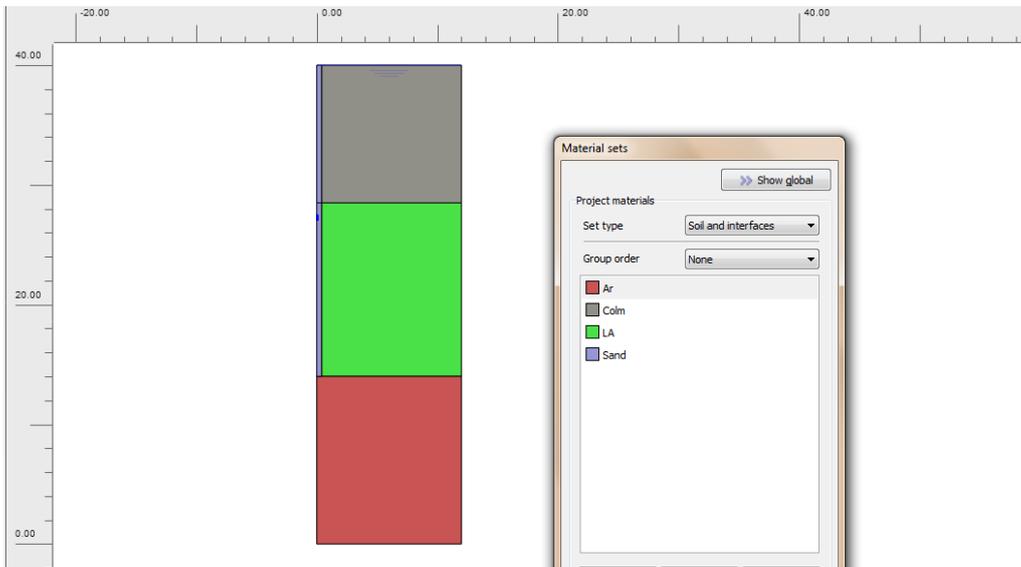


Figura 4-25: Modello Plaxis2D con stratigrafia (Fascia3)

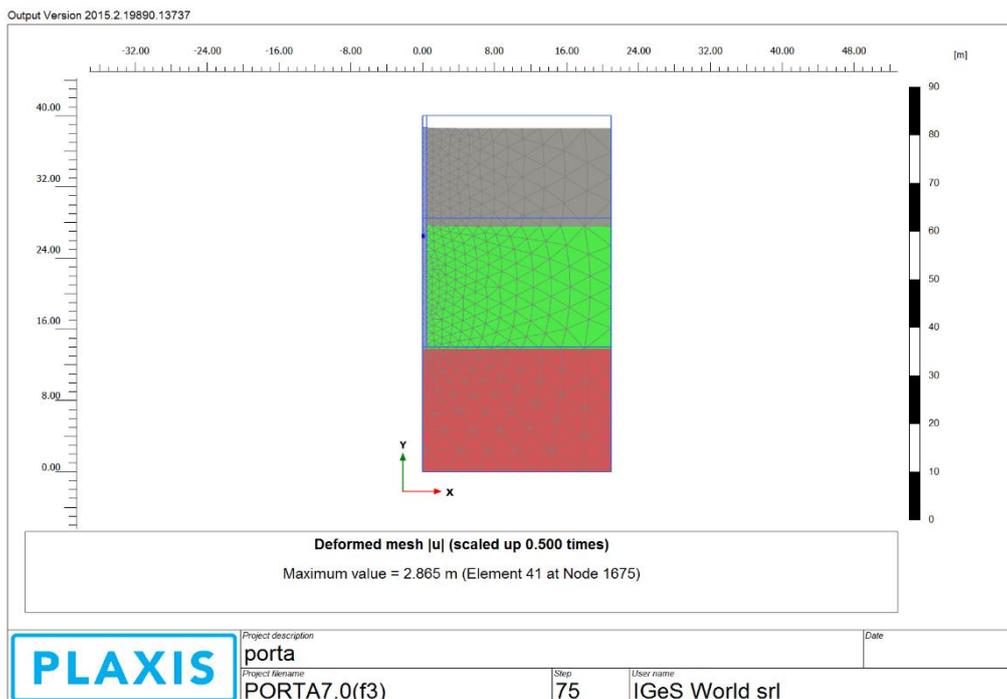


Figura 4-26: Deformata mesh - FASE C (Fascia3)

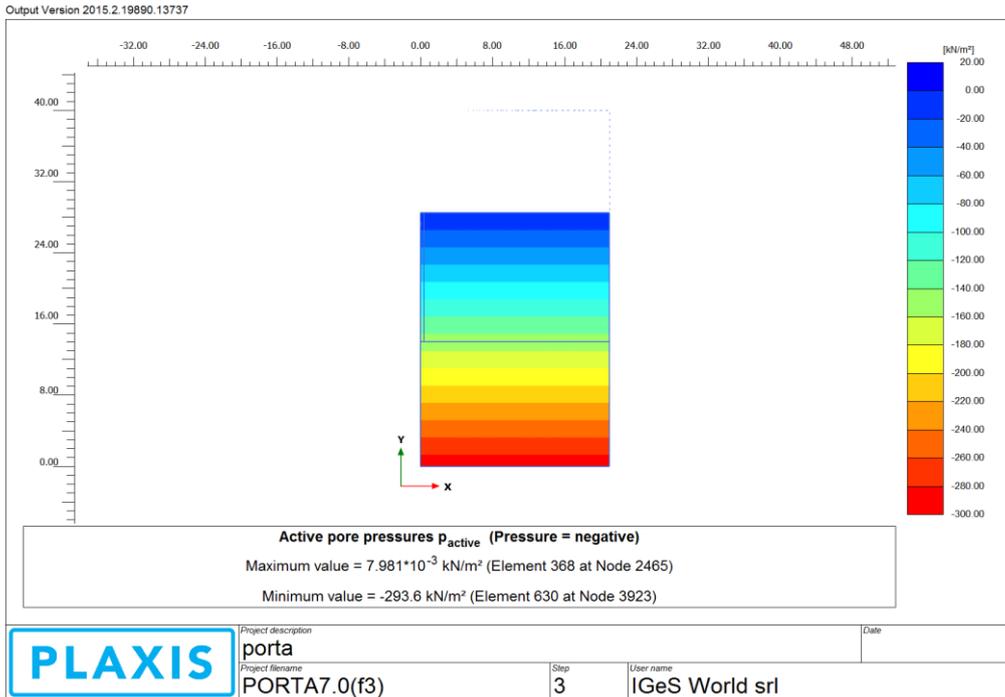


Figura 4-27: Pressioni interstiziali - FASE A (Fascia3)

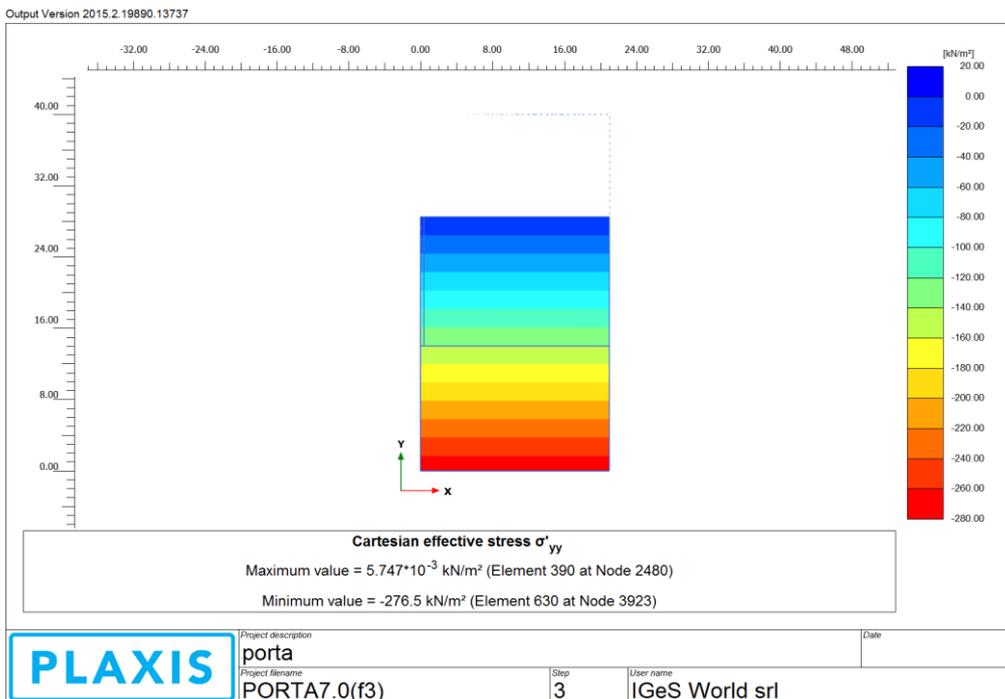


Figura 4-28: Tensioni efficaci σ'_{yy} - FASE A (Fascia3)

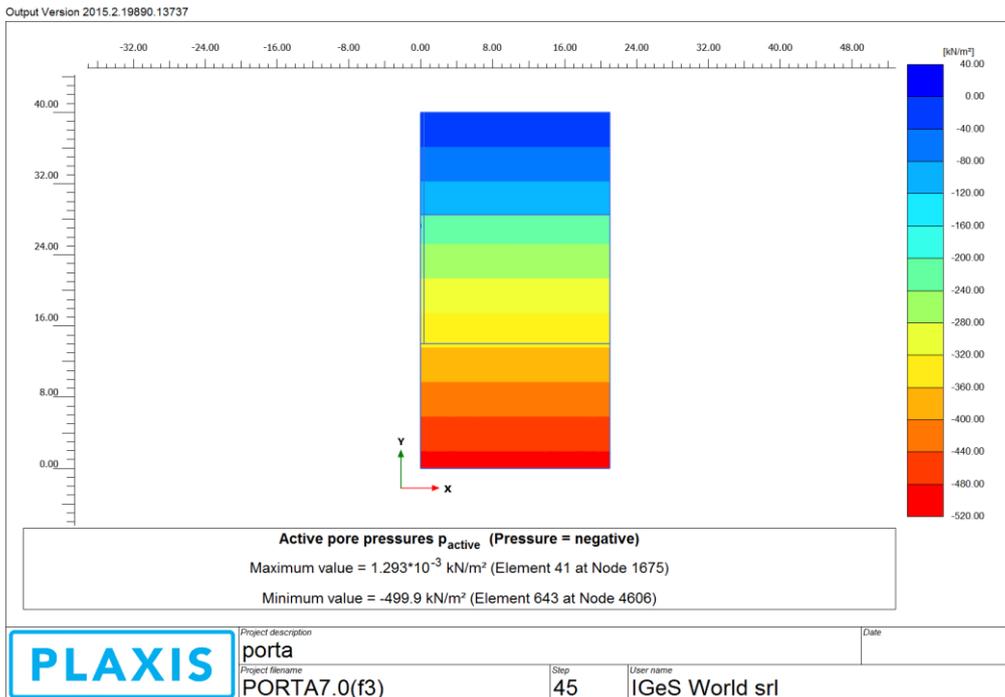


Figura 4-29: Pressioni interstiziali - FASE B (Fascia3)

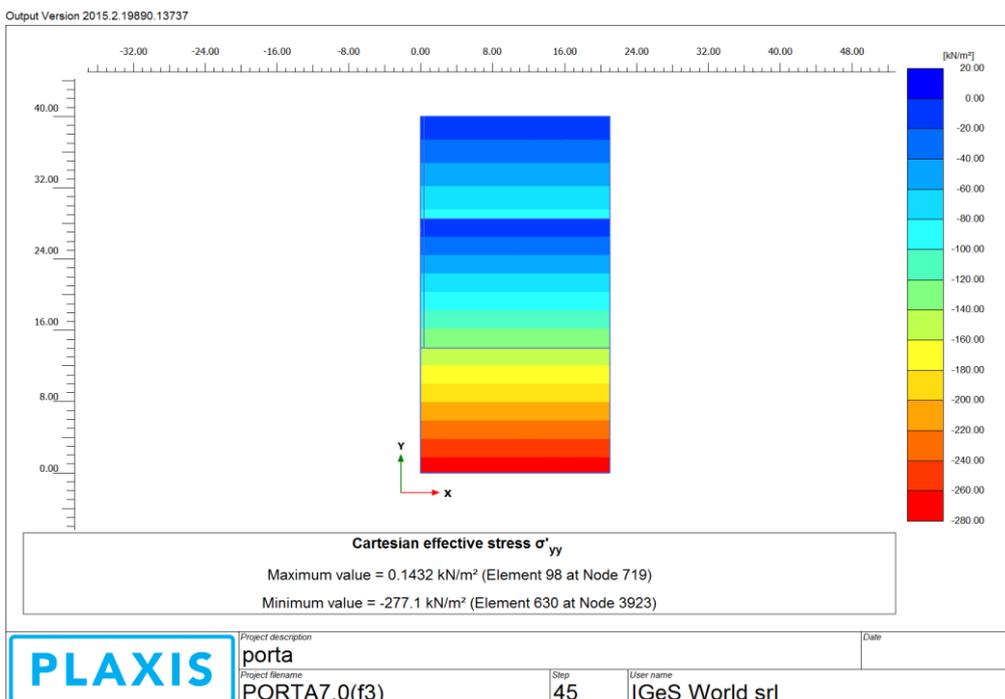


Figura 4-30: Tensioni efficaci σ'_{yy} - FASE B (Fascia3)

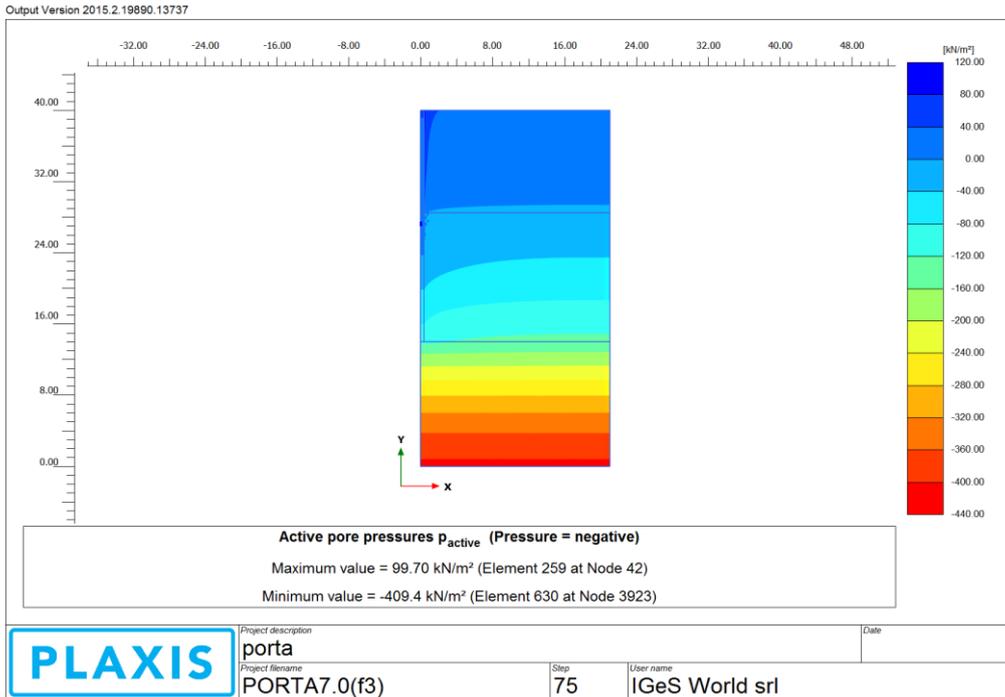


Figura 4-31: Pressioni interstiziali - FASE C (Fascia3)

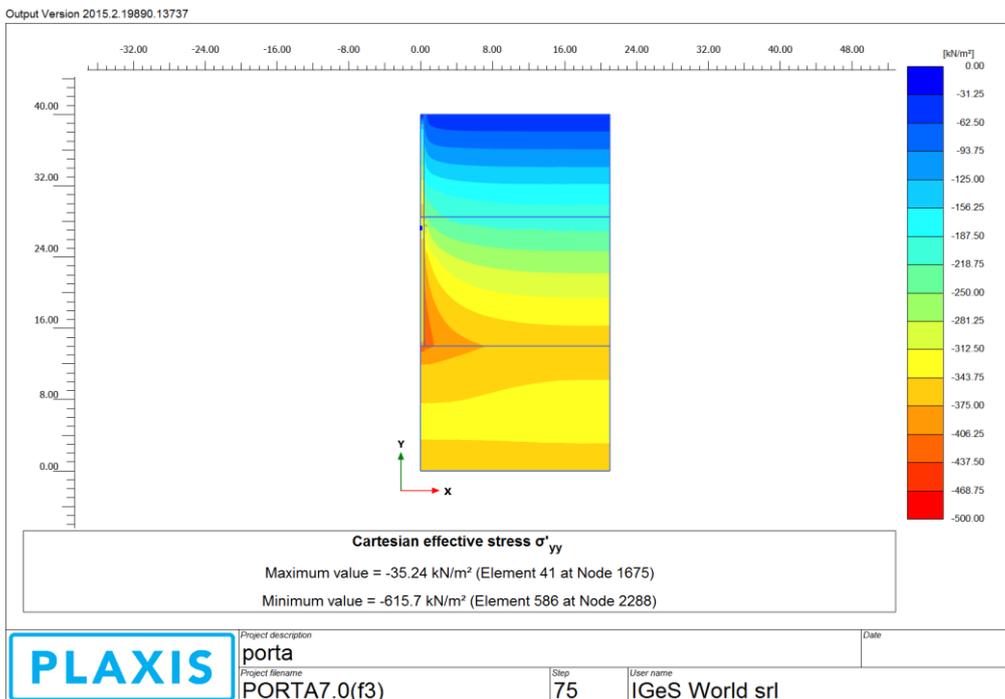


Figura 4-32: Tensioni efficaci σ'_{yy} - FASE C (Fascia3)

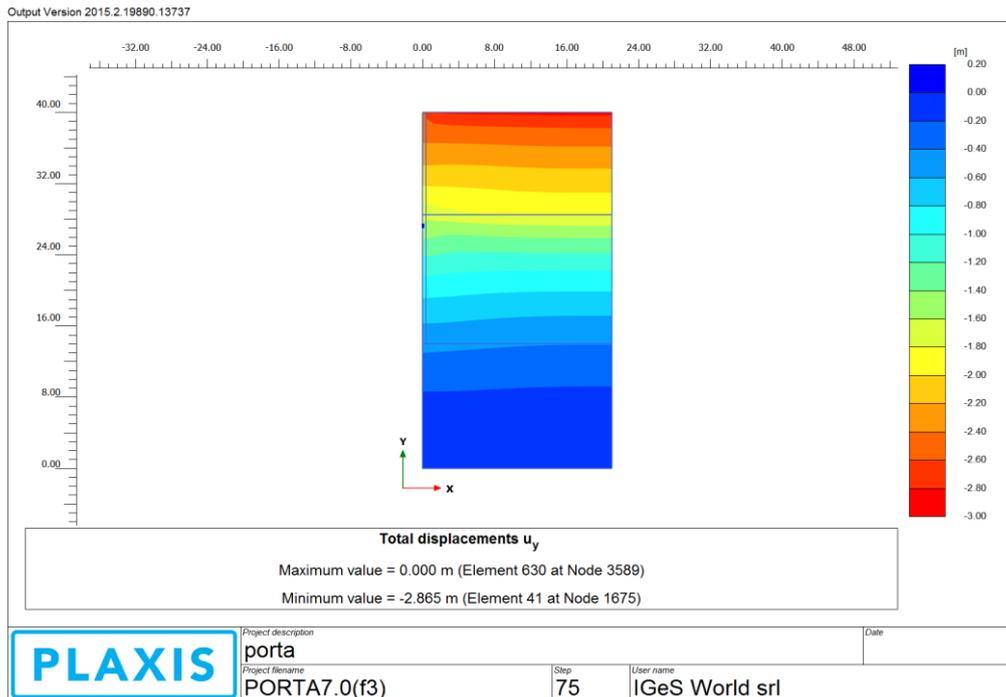


Figura 4-33: Spostamenti verticali - FASE C (Fascia3)

Il valore di cedimento verticale complessivo, valutato al termine dell'analisi, è pari a circa 2.8m. Tale valore può ritenersi ascritto sia ai processi di consolidazione del materiale di colmata (analizzato in forma più appropriata con le analisi di consolidazione in grandi deformazioni) che nei terreni di fondazione.

La valutazione dell'evoluzione di tale cedimento, e quindi, del regime delle pressioni neutre nel tempo, è stata analizzata rispetto a due punti di controllo del modello, A e B, rispettivamente all'incirca collocati al centro del deposito Limoso (circa $z \approx -18\text{m}$) e sul fondo del materiale di colmata (circa $z \approx -11\text{m}$).

Dall'andamento del regime delle pressioni interstiziali è possibile notare come, dopo circa 4 anni dall'istante di attivazione del sistema di drenaggio, il livello piezometrico nel materiale di colmata, tende a raggiungere la quota di testa dei depositi limosi di fondale. Ciò conduce dunque, ad un duplice effetto: la forte accelerazione dei processi di consolidazione legati strettamente alla dissipazione del regime di sovrappressioni indotte dal carico nei terreni di fondazione e, la progressiva riduzione del livello piezometrico nei materiali di colmata al fine di consentirne la stabilizzazione per progressiva riduzione dell'indice dei vuoti. Quest'ultimo processo, come detto, verrà analizzato in forma più appropriata con le analisi Condes 0.

Quanto descritto viene riportato in Figura 4-34, dove si osserva come la curva rappresentativa del punto A parta da una condizione iniziale di sovrappressione interstiziale indotta dal carico ($\Delta u = 90\text{kPa}$) e raggiunga solo dopo meno di 7 mesi la condizione idrostatica. Successivamente la curva, per via dell'emungimento, continua a decrescere fino ad un valore di pressione interstiziale pressoché coincidente al battente idrostatico minimo a fine emungimento valutabile tra 30-60kPa, in ragione della variabilità spaziale legata curvatura del conoide indotto dal moto di filtrazione, in un tempo in cui il punto B ha sostanzialmente raggiunto una condizione di pressione interstiziale minimale pressoché nulla.

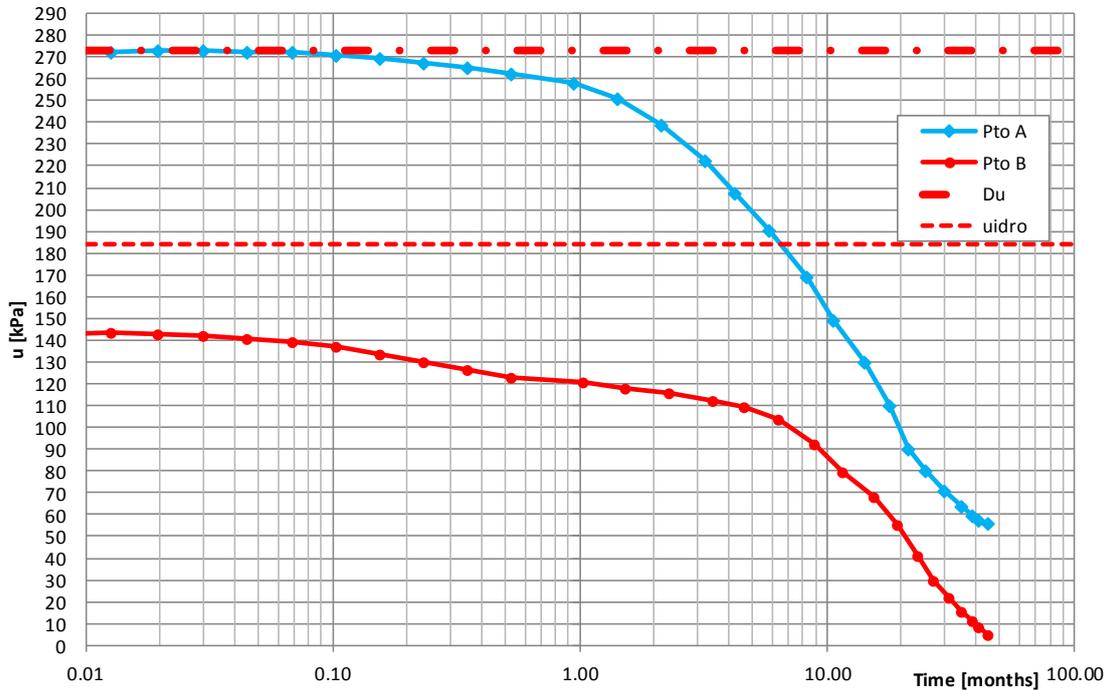


Figura 4-34: Regime pressioni neutre nel tempo - FASE C (Fascia3)

Confrontando i risultati delle analisi, non emergono sostanziali variazioni dell'evoluzione temporale del comportamento tensio-deformativo della colmata rispetto alle 3 differenti condizioni stratigrafiche analizzate. Ad ogni modo, i risultati relativi alla fascia 3 mostrano le condizioni più gravose sia in termini di entità delle deformazioni che in termini di durata dei fenomeni.

5 ANALISI DI CONSOLIDAZIONE DEL MATERIALE DI COLMATA “SELF-WEIGHT” (CONDES 0)

Ai fini di cogliere meglio gli aspetti specifici relativi alla consolidazione intrinseca dei sedimenti dragati riposizionati in cassa per effetto del peso proprio, tenuto conto degli effettivi rapporti di dragaggio, è necessario ricorrere a teorie diverse dalla consolidazione monodimensionale classica, e che colgano in maniera maggiormente congruente i cosiddetti effetti delle “grandi deformazioni”.

Mediante la suddetta analisi è stato possibile determinare l’evoluzione delle deformazioni e i tempi di consolidazione dei sedimenti dragati durante e dopo la progressiva ricostituzione in cassa di colmata, ovviamente, trascendendo in tale ambito dalle deformazioni dei terreni di fondazione, analizzate nello specifico attraverso la modellazione FEM accoppiata con codice Plaxis 2D.

Nell’ambito delle presenti analisi è stato necessario definire, innanzitutto, opportune leggi di variazione che tengano conto dell’evoluzione progressiva dell’indice dei vuoti e della permeabilità intrinseca del materiale dragato a bassi livelli tensionali assimilabili in generale al peso proprio.

Generalmente infatti, nell’ambito di sedimenti dragati, il rapporto volumetrico acqua-solido, assimilabile nell’ipotesi di miscela completamente satura all’indice dei vuoti, risulta fortemente influenzato dalla tecnologia esecutiva del dragaggio, dalla granulometria dei sedimenti e dal relativo stato di consistenza. Il valore dell’indice dei vuoti iniziale di un sedimento dragato e ridepositato artificialmente sotto l’unica azione del peso proprio, può comunque essere valutato tendenzialmente elevato, e variabile secondo studi di letteratura nel range 2–8.

Nella seguente analisi, considerando l’utilizzo di una draga aspirante refluyente è possibile valutare un valore di indice di vuoti della miscela dragata pari a 8, valutabile rispetto ad un rapporto di dragaggio 1:4, considerando un indice dei vuoti del materiale in banco pari a 0.8.

Per studiare tali processi di consolidazione, considerate le grandi deformazioni attese, si è scelto di utilizzare la teoria della consolidazione monodimensionale rivista nell’ipotesi di grandi deformazioni (Gibson & Hussey ‘67).

In aggiunta alle ipotesi della classica teoria della consolidazione di Terzaghi, vengono tenute in conto specifiche relazioni di variazione dell’indice dei vuoti rispetto alla variazione dello stato tensionale efficace e la relativa variazione della permeabilità.

Le relazioni costitutive di governo utilizzate in questa analisi sono:

- relazione che lega stato tensionale efficace verticale all’indice dei vuoti (Liu e Znidarcic, 1991):

$$e = A_1(\sigma' + Z_1)^{B_1}$$

ove e e σ' sono rispettivamente indice dei vuoti e tensione efficace verticale; A_1 , B_1 e Z_1 sono costanti empiriche

- relazione che lega la permeabilità all’indice dei vuoti (Somogyi, 1971):

$$K = C e^D$$

ove K é la permeabilità idraulica, C e D sono costanti empiriche, e indice dei vuoti.

Le equazioni che governano la compressione unidimensionale sono formulate con le funzioni di velocità e conservazione della massa in un sistema di coordinate Lagrangiane. Le funzioni di velocità e conservazione della massa sono presentate come:

one-dimensional compression

velocity function:
$$v_u = \frac{K \cdot (Gs - 1)}{1 + e} + \frac{K \cdot (1 + e_0)}{\gamma_w \cdot (1 + e)} \frac{d\sigma'_v}{de} \frac{\partial \xi}{\partial t}$$

conservation of mass:
$$\frac{\partial v_u}{\partial t} = \frac{-1}{1 + e_0} \frac{\partial e}{\partial t}$$

where t : time

a, a_1 : Lagrangian coordinate systems

ξ : Eulerian coordinate system

e_{cr} : cracking void ratio (see the definition in the Cracking Function below)

e_0 : void ratio at zero effective stress

Gs : specific gravity of soil particles

v_c : velocity function in cracking soil

v_u : velocity function in uncracked soil

α : ratio of the area of the element to its height

γ_s, γ_w : unit weights of soil solids and water respectively

E : evaporation rate from the top intact soil surface

η : empirical parameter for determining evaporation from crack walls

L'analisi è stata condotta avvalendosi del programma alle differenze finite **Condes 0** (Yao & Znidarcic '97).

Mediante tale software è possibile valutare in funzione del tempo, le variazioni di geometria (altezza di drenaggio), e l'evoluzione delle compressibilità e permeabilità al variare dell'indice dei vuoti.

La formulazione numerica implementata nel software segue degli schemi di discretizzazione per la compressione monodimensionale cosiffatti:

$$\frac{\left\{ \frac{C \cdot (e^{j+\frac{1}{2}})^D (Gs-1)}{(1+e^{j+\frac{1}{2}})} + \frac{C \cdot (e^{j+\frac{1}{2}})^D (1+e_0)}{\gamma_w \cdot (1+e^{j+\frac{1}{2}})} \left[\frac{1}{A \cdot B} \left(\frac{e^{j+\frac{1}{2}}}{A} \right)^{\frac{1}{b_2}-1} \right] \frac{e^{j+1} - e^{j+1}}{\Delta a_j} \right\} - \left\{ \frac{C \cdot (e^{j+\frac{1}{2}})^D (Gs-1)}{(1+e^{j+\frac{1}{2}})} + \frac{C \cdot (e^{j+\frac{1}{2}})^D (1+e_0)}{\gamma_w \cdot (1+e^{j+\frac{1}{2}})} \left[\frac{1}{A \cdot B} \left(\frac{e^{j+\frac{1}{2}}}{A} \right)^{\frac{1}{b_2}-1} \right] \frac{e^{j+1} - e^{j+1}}{\Delta a_{j-1}} \right\}}{\frac{1}{2}(\Delta a_j + \Delta a_{j-1})}$$

$$= \frac{-1}{(1+e_0)} \frac{e^{j+1} - e^j}{\Delta a_j}$$

Inoltre le possibili condizioni al contorno da utilizzare possono essere due:

- **Neuman** (La derivata dell'indice dei vuoti rispetto al sistema di coordinate di Lagrange è formulata dalle funzioni di velocità);

$$e^{j+1} - e^{j+1} = \Delta a_j \cdot \left\{ \frac{\gamma_w \cdot (1 + e^{j+\frac{1}{2}}) \cdot A_1 \cdot B_1}{K \cdot (1 + e_0) \cdot \left(\frac{e^{j+\frac{1}{2}}}{A_1} \right)^{\frac{1}{b_2}-1}} \cdot \left[v - \frac{K \cdot (Gs - 1)}{(1 + e^{j+\frac{1}{2}})} \right] \right\}$$

- **Dirichlet** (Gli indici dei vuoti al contorno sono calcolati utilizzando le equazioni indice dei vuoti-tensioni efficaci. Sia i carichi applicati sia i carichi idraulici sono convertiti in sollecitazioni usando il principio delle tensioni efficaci).

5.1 TARATURA DEL MODELLO

Ai fini della modellazione numerica, le due equazioni che governano il fenomeno, ossia le funzioni di variabilità della permeabilità e compressibilità con lo stato tensionale, sono state calibrate rispetto alle prove edometriche eseguite nell'ambito della campagna di indagini geognostiche propedeutiche alla progettazione esecutiva, ritenute rappresentative del materiale da dragare, nonché tenendo conto anche di risultati ottenuti da prove di compressibilità eseguite su campioni di sedimenti dragati ricostituiti, svolte nell'ambito delle attività scientifiche condotte dal Politecnico di Bari nell'area del Molo Polisettoriale del Porto di Taranto, allegate al Progetto Definitivo a Base di Gara - *T&A Sperimentazione Geotecnica finalizzata alla gestione dei sedimenti provenienti dai dragaggi Rapporto n.2 Gennaio 2013*.

Come detto in precedenza, il rapporto volumi liquidi-solidi dei sedimenti riversati in cassa di colmata, o indice dei vuoti, è fortemente influenzato dalla tecnologia esecutiva adoperata.

I dati disponibili dagli studi effettuati sul materiale da ricostituire in cassa di colmata, derivano da prove condotte a partire da sedimenti dragati meccanicamente in una area prossima al Molo Polisettoriale, ricostituiti in fustella sotto carichi statici imposti (*consolidometro*) misurando la variazione dell'indice dei vuoti in funzione dello stato tensionale efficace. Tali prove hanno consentito di stimare un valore dell'indice dei vuoti iniziale "e₀" pari a circa 2 e



Autorità Portuale di Taranto

Interventi per il dragaggio di 2,3 M m³ di sedimenti in area Molo Polisettoriale e per la realizzazione di un primo lotto della cassa di colmata funzionale all'ampliamento del V Sporgente del Porto di Taranto

Relazione di calcolo impianto di dewatering - pozzi

Data 05/2016
Rev. B
c.d.c.: C296B
360B.docx

un contenuto d'acqua naturale al 78% circa. Tale studio ha inoltre permesso di risalire alla distribuzione dell'indice dei vuoti in funzione del coefficiente di permeabilità verticale.

Partendo dunque dalle relazioni di Liu e Znidarcic (1991) e da Somogyi (1971) precedentemente illustrate, tarate attraverso i risultati delle prove edometriche eseguite nell'ambito della campagna di indagini propedeutiche alla progettazione esecutiva ed attraverso i dati disponibili dallo studio condotto dal Politecnico di Bari, è stato possibile definire una curva $e=f(\sigma'_v)$ ed una curva $e=f(K_v)$ rappresentative del materiale dragato ricostituito.

I risultati sono illustrati nelle Figura 5-1 Figura 5-2.

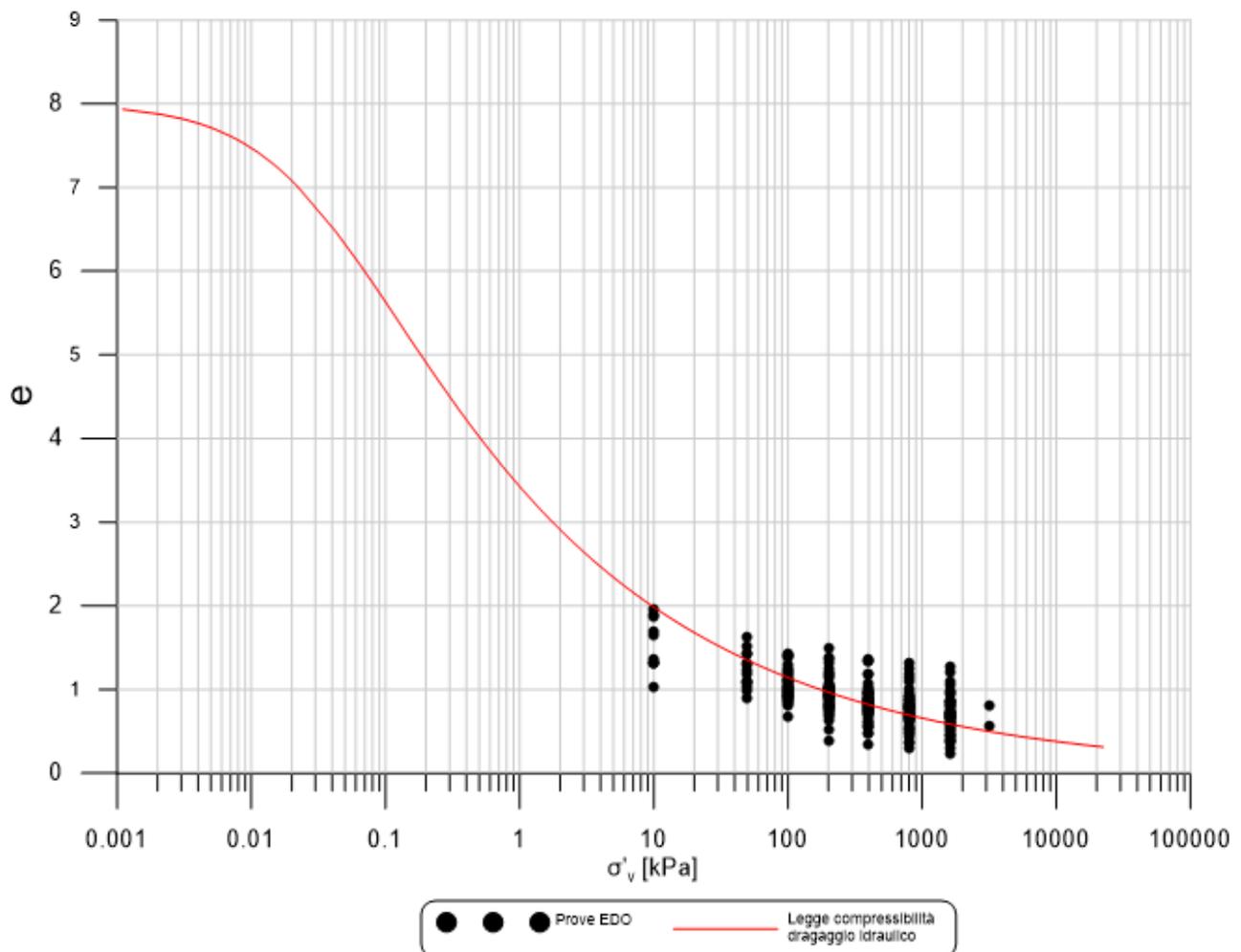


Figura 5-1: Materiale dragato: Indice dei vuoti al variare dello stato tensionale verticale efficace (fonte dati Prove Edometriche – Campagna indagini geotecniche Astaldi 2015)

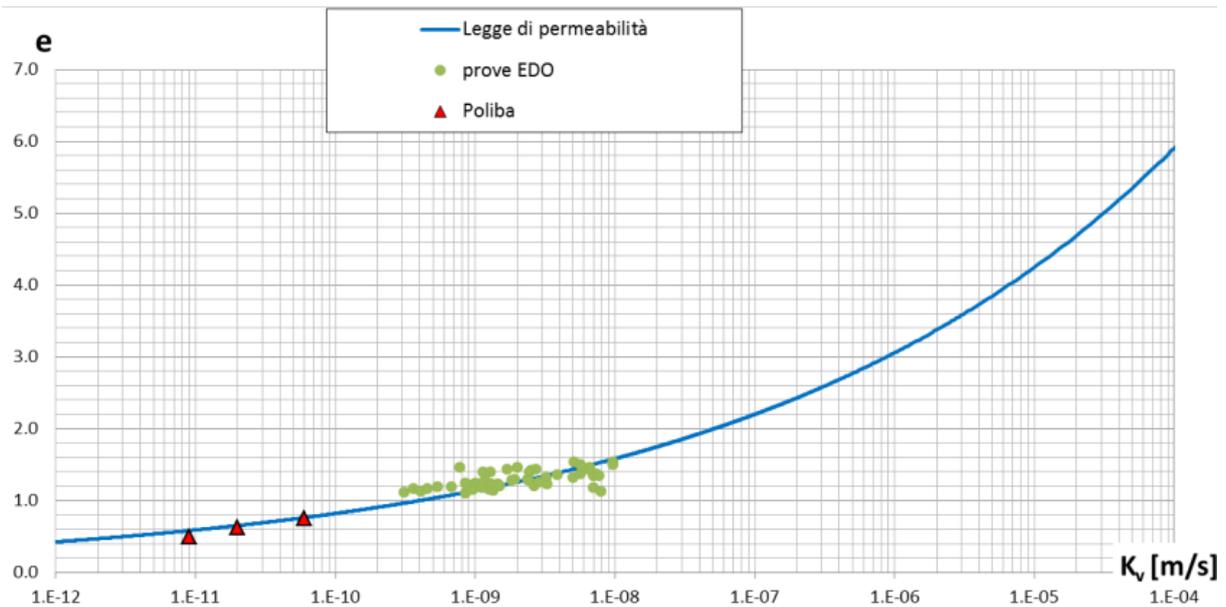


Figura 5-2: Materiale dragato: Indice dei vuoti al variare del coefficiente di permeabilità verticale

Le costanti caratteristiche delle predette relazioni determinate sulla base dei dati disponibili sono quindi le seguenti:

Legge di compressibilità		
<i>A</i>	5	-
<i>B</i>	-0.3	-
<i>Z</i>	24.0	kPa

Legge di permeabilità		
<i>C</i>	4.00E-10	m/s
	1.26E-02	m/anni
<i>D</i>	7	-

5.2 ANALISI CONDES 0

Mediante l'analisi di simulazione svolta con il software Condes0 è stato possibile determinare l'evoluzione delle deformazioni e i tempi di stabilizzazione e consolidazione dei sedimenti dragati durante e dopo la progressiva ricostituzione in cassa di colmata, in accordo con le modalità previste in ambito di Progetto di Offerta, ovviamente senza tener conto in alcun modo delle deformazioni dei terreni di fondazione, analizzate nello specifico nell'ambito della modellazione Plaxis 2D.

Lo studio è stato suddiviso in 3 finestre temporali d'analisi (*sottosistemi*): la prima, rappresentativa delle fasi di deposizione del materiale in cassa (s1), la seconda, dell'attivazione del sistema di emungimento (s2) (pozzi) e la terza alla fase di lungo termine ad emungimento terminato (s3).

Il primo sottosistema valuta il processo di deformazione praticamente contestuale all'immissione del materiale in cassa, innescando sin dalle prime fasi la consolidazione per peso proprio, e quindi compensato progressivamente in termini di quote rese all'immissione del materiale. La portata adottata per la deposizione in casse delle argille dragate nella prima fase è stimata di circa 50'000 m³/giorno di miscela dragata, prevedendo così il raggiungimento della quota di progetto (circa +1.50m slm), in circa 26 settimane in accordo col piano di refluento.

Raggiunto il predetto spessore di colmata, si analizza il secondo sottosistema che prevede l'attivazione di un sistema di emungimento del fluido interstiziale finalizzato alla stabilizzazione del materiale refluito. Ciò induce, come noto, notevoli deformazioni del corpo di colmata in ragione della progressiva riduzione dell'indice dei vuoti, indotta dalla sovrapposizione degli effetti di peso proprio ed azione di emungimento. Tale processo è stato analizzato rispetto al raggiungimento di un valore medio dell'indice dei vuoti variabile nello spessore della colmata tra 0.8-1.5, valori ritenuti rappresentativi di un adeguato stato di consistenza del materiale refluito. Tale analisi è stata condotta rispetto ad un periodo di emungimento di circa 10 mesi, valutabile quindi come il periodo strettamente necessario per l'addensamento e la stabilizzazione del materiale refluito rispetto ai predetti valori "target", stimando valori di cedimento complessivi chiaramente maggiori rispetto al caso naturale, stimabili nell'ordine di 1.5-2.0m.

Al termine della fase di analisi dell'emungimento, al fine di valutare la risposta di lungo termine e/o eventuali "code" di deformazione residua rispetto alla potenziale disattivazione del sistema di emungimento, si è processato il terzo sottosistema. Come può notarsi dal grafico riportato in Figura 5-3, rispetto all'ultima finestra d'analisi non si mostrano ulteriori fenomeni deformativi significativi per il materiale ricostituito.

Da quanto emerso dall'analisi mediante l'utilizzo del Condes0, emerge, quindi, come gli interventi di accelerazione della consolidazione previsti in Progetto, seppur inducendo maggiori deformazioni nel breve termine, consentano di ottenere in tempi relativamente ridotti l'addensamento e la stabilizzazione del materiale dragato refluito, ovviamente indipendentemente dai processi di consolidazione nei terreni di fondazione così come analizzati al Cap.4, al quale si demanda per la valutazione dei tempi di consolidazione complessivi.

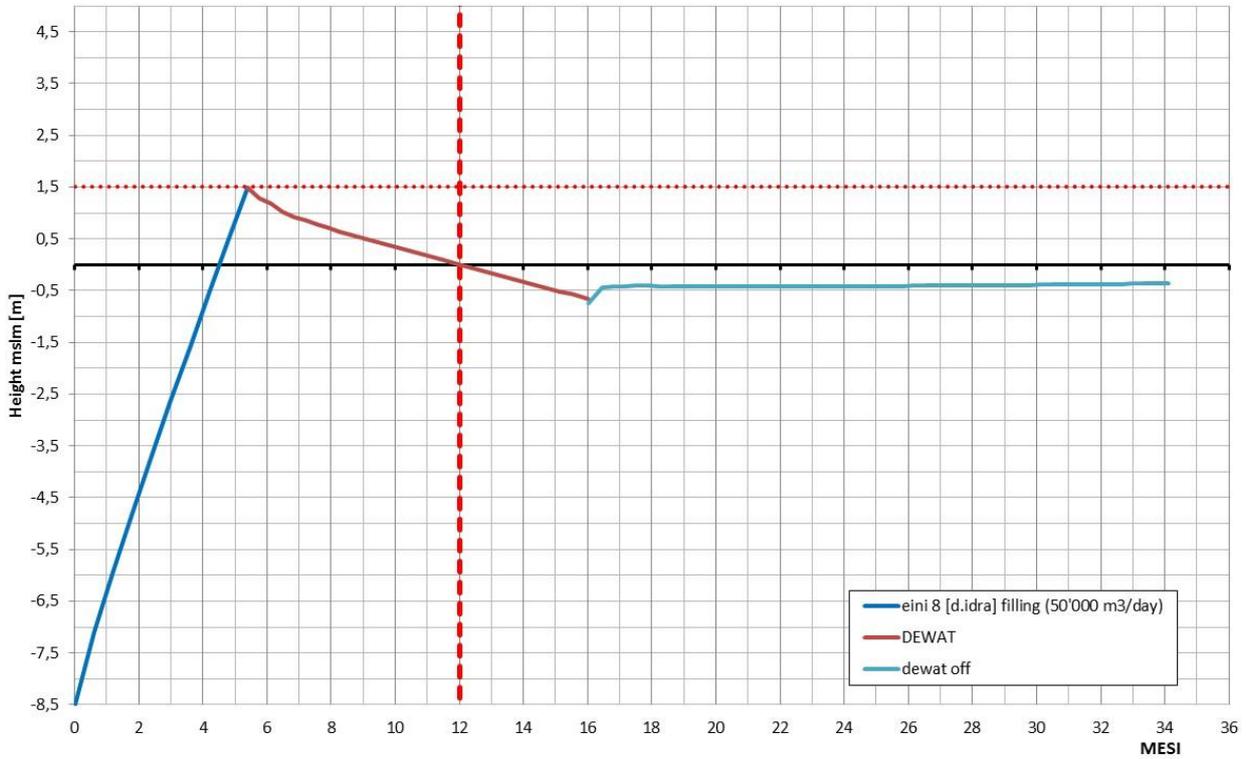


Figura 5-3: Condes0: Variazione spessore colmata in funzione del tempo – Consolidazione accelerata

6 CONCLUSIONI

Nell'ambito del presente elaborato sono state riportate le analisi geotecniche e i risultati ottenuti nell'ambito della valutazione dell'entità e del relativo decorso temporale dei fenomeni di cedimento attesi rispetto alla costruzione del corpo di colmata, tenuto conto degli specifici interventi di accelerazione dei cedimenti con riferimento alle caratteristiche del modello geotecnico costruito nel Progetto Esecutivo.

Il sistema di accelerazione dei cedimenti è composto da una batteria di dreni verticali di grande diametro costituiti da elementi drenanti attivati con opportuni sistemi di emungimento, disposti a maglia triangolare equilatera di lato pari a 40m, distribuiti sull'area della colmata e spinti fino alla profondità di imposta dei terreni compressibili per i quali ci si attende il maggiore contributo in termini di cedimenti.

Tale sistema consente di smaltire rapidamente le sovrappressioni neutre indotte dall'applicazione dei carichi tramite l'istaurazione di percorsi di filtrazione radiale rispetto alle verticali di drenaggio, governati, oltre che dal naturale gradiente di filtrazione, dall'azione forzante indotta dai sistemi di emungimento installati, garantendo ottime prestazioni rispetto alla forte accelerazione dei processi di consolidazione naturale, sia nei terreni di fondazione che nel corpo dei materiali di colmata, come dimostrato nell'ambito della analisi condotte.

Il modello geotecnico adottato, ai fini della analisi di consolidazione, è stato basato sui risultati delle indagini propedeutiche al Progetto Esecutivo e delle prove geotecniche all'uopo condotte nell'area di impronta della cassa di colmata.

Le analisi, differenziate rispetto ai diversi fenomeni da valutare, sono state condotte mediante l'ausilio del programma agli elementi finiti PLAXIS 2D 2015 e del software alla differenze finite Condes0.

In modo distinto, infatti, sono state affrontate le problematiche che contestualmente emergono in seguito al refluento in vasca del materiale di colmata.

Gli aspetti analizzati sono stati studiati come:

- Processo di consolidazione del materiale di colmata e del terreno di fondazione, (Plaxis2D);
- Processo di consolidazione in grandi deformazioni del materiale di colmata per "self-weight", (Condes0).

In entrambe le analisi, viene tenuta debitamente conto del processo di dewatering previsto per l'accelerazione dei processi di consolidazione.

Il confronto dei risultati ottenuti dalle due diverse analisi, ha consentito di dimostrare l'efficacia del sistema di dewatering rispetto all'accelerazione dei tempi di consolidazione, e confermarne, quindi, la validità, sia per quanto attiene l'accelerazione della consolidazione dei terreni di fondazione che dei materiali di colmata.

7 BIBLIOGRAFIA

- Crust formation and desiccation characteristics for phosphatic clays, User's manual for computer program Condes0, University of Colorado, Boulder.
- Plaxis 2D 2015, Reference Manual & Material Models Manual.
- Dragaggio dei fondali del porto canale e della darsena di Fiumicino e vasca di contenimento, Progetto esecutivo, Autorità Portuale di Civitavecchia, Fiumicino e Gaeta.
- Un'applicazione atipica del vacuum consolidation per il consolidamento rapido di terreni argillosi nella vasca di colmata di Gaeta, Armando de Lillis e Salvatore Miliziano Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, "Sapienza" Università di Roma.
- Validation of Desiccation Theory for Mining Waste by Centrifuge Modeling, Waldyr Lopes de Oliveira Filho, Universidade Federal de Ouro Preto, Dobroslav Znidarcic, University of Colorado, Colorado, USA.
- Determination of consolidation parameters of a sludge using the "Seepage Induced Consolidation Test" La détermination des paramètres de consolidation d'une boue utilisant le "Seepage Induced Consolidation Test" Barbetti Luca Laboratory of Geotechnics – Ghent University.
- Sediment and Ecohydraulics INTERCOH 2005; Edited by Tetsuya Kusuda, University of Kitakyushu, Japan; Hiroyuki Yamanishi, Saga University, Japan; Jeremy Spearman, HR Wallingford Ltd., Wallingford, UK; Joseph Gailani, US Army Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi, USA.



Autorità Portuale di Taranto

Interventi per il dragaggio di 2,3 M m³ di sedimenti in area Molo Polisettoriale e per la realizzazione di un primo lotto della cassa di colmata funzionale all'ampliamento del V Sporgente del Porto di Taranto

Relazione di calcolo impianto di dewatering - pozzi

Data 05/2016
Rev. B
c.d.c.: C296B
360B.docx