

MODELLAZIONE NUMERICA DEI PROCESSI DI CONSOLIDAZIONE DEI FANGHI DI DRAGAGGIO NELLA VASCA DI COLMATA DI GAETA

Armando de Lillis

Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Sapienza Università di Roma
armando.delillis@uniroma1.it

Giada M. Rotisciani

Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Sapienza Università di Roma
giada.rotisciani@uniroma1.it

Salvatore Miliziano

Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Sapienza Università di Roma
salvatore.miliziano@uniroma1.it

Sommario

L'immissione in vasca di colmata è una delle principali e più efficienti opzioni di gestione dei materiali di dragaggio. Quando vengono impiegate draghe aspiranti-refluenti, il terreno viene immesso in vasca ad alti rapporti volumetrici acqua:solido e subisce poi significative variazioni di stato, delle proprietà meccaniche e di permeabilità. Nella nota, con riferimento alla vasca di colmata di Gaeta (LT), si illustrano due strategie di modellazione numerica messe a punto impiegando codici di calcolo di diversa complessità per simulare le peculiarità di questa classe di problemi al finito. I risultati ottenuti mostrano che, anche utilizzando un modello semplice, formulare oculatamente le ipotesi necessarie alla modellazione e identificare correttamente le condizioni di carico permette di descrivere i fenomeni in modo ingegneristicamente soddisfacente.

1. Introduzione

Il continuo incremento di dimensioni delle navi commerciali richiede fondali portuali sempre più profondi e, quindi, intense attività di dragaggio, che mettono in risalto la necessità di ottimizzare la gestione dei sedimenti. Nella maggior parte dei casi, se i volumi coinvolti sono ingenti, si opta per l'immissione del materiale in vasche di colmata mediante l'utilizzo di draghe aspiranti-refluenti. L'impiego di questa tipologia di draghe fa sì che il terreno venga immesso in vasca ad alti rapporti volumetrici acqua:solido, si depositi a bassi stati tensionali e alti indici dei vuoti, e sperimenti poi significative variazioni di stato con lo sviluppo della consolidazione per peso proprio. Inoltre, specialmente nel caso di terreni a grana fine, il riutilizzo dell'area della vasca (tipicamente per attività di movimentazione e stoccaggio merci) richiede un preventivo consolidamento.

Nel seguito si descrive brevemente il progetto della vasca di colmata di Gaeta, illustrandone le peculiarità, e si evidenziano gli elementi distintivi che devono essere implementati nella modellazione numerica di questa classe di problemi al finito. Successivamente, si descrivono due modelli sviluppati impiegando codici di calcolo di complessità decisamente diversa, sottolineando le ipotesi di volta in volta necessarie alla simulazione, e si confrontano i risultati ottenuti.

Nella nota l'attenzione è rivolta ai processi di immissione e consolidazione dei terreni di dragaggio, pertanto non vengono affrontate le problematiche relative all'evoluzione dei cedimenti dei terreni di fondazione della vasca. Tutte le quote sono espresse in metri sul livello medio marino.

2. La vasca di colmata di Gaeta

Il progetto di espansione del porto di Gaeta (LT) ha previsto il dragaggio di 366 000 m³ di sedimenti a grana fine e la loro immissione in una vasca di colmata preesistente mediante l'utilizzo di una draga aspirante-refluente. La vasca di colmata ha forma trapezoidale, è delimitata da argini perimetrali la cui quota sommitale è pari a +6.50 m e dotata di uno sfioratore laterale a quota +6 m. La vasca occupa una superficie di circa 6 ettari e prima dell'inizio dei lavori era parzialmente riempita, fino alla quota media di +1 m, di materiale a grana fine proveniente da una precedente campagna dragaggio e ancora in fase di consolidazione sotto il peso proprio. Il volume nominale della vasca *ante operam* era quindi pari a 300 000 m³, significativamente inferiore a quello del materiale di dragaggio. I terreni di fondazione sono costituiti per i primi 6 metri circa da terreni a grana fine normalmente consolidati, originariamente costituenti il fondale marino, al di sotto dei quali si trova un'alternanza di terreni sabbiosi ben addensati e terreni argillosi sovraconsolidati.

Al fine di consentire l'immissione di tutto il materiale di dragaggio all'interno della vasca è stata messa a punto una strategia articolata, schematicamente rappresentata in Figura 1, che ha previsto l'uso di sistemi accoppiati di drenaggio e di *vacuum consolidation* (Chu *et al.*, 2000; Shang *et al.*, 1998), utilizzato in una configurazione atipica. I processi di consolidazione dei terreni in posto sono stati accelerati mediante l'infissione di dreni verticali prefabbricati disposti a quinconce, con interasse 2 m e di lunghezza 12 m, sufficiente ad assicurare una adeguata penetrazione nello strato sabbioso sottostante, idraulicamente connesso con il livello marino. La consolidazione del materiale di escavo è stata accelerata mediante la posa in opera di 3 piani drenanti orizzontali costituiti da un geocomposito drenante, la cui installazione ha richiesto la suddivisione delle operazioni di dragaggio in 3 fasi, ciascuna da 122 000 m³. Il primo piano drenante è stato collocato direttamente al di sopra dei terreni in posto, assicurando la connessione idraulica con i dreni verticali. Gli altri due piani drenanti, realizzati rispettivamente dopo il refluito del primo e del secondo terzo di dragaggio, sono integrati con delle tubazioni microfessurate disposte parallelamente al lato corto della vasca con interasse 4 m e connesse ad un sistema di pompe a vuoto in grado di generare una depressione dell'ordine di 60÷80 kPa. In tal modo si è raggiunto il duplice obiettivo di accelerare i processi di consolidazione e di aumentare lo stato tensionale efficace del materiale di escavo, riducendo il volume da esso occupato già durante le operazioni di dragaggio.

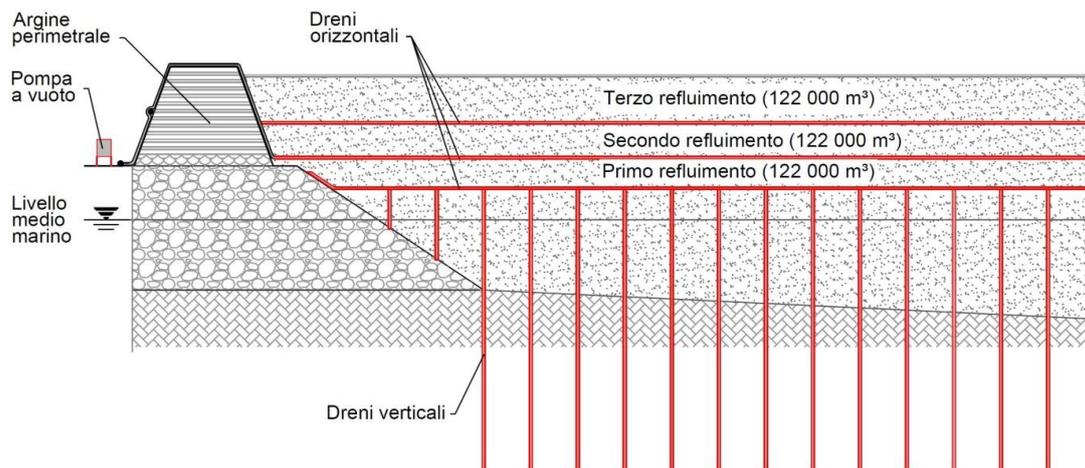


Fig 1. Rappresentazione schematica dei sistemi di drenaggio e di vacuum consolidation.

Le fasi finali del progetto prevedono l'applicazione di una precarica, realizzata in tre fasi successive per ridurre l'apporto di materiale di cava, e a seguire il completamento dei piazzali operativi cui è destinata l'area della vasca. Maggiori dettagli riguardanti gli aspetti geotecnici della progettazione della vasca di colmata di Gaeta sono riportati in de Lillis e Miliziano (2016). Il dragaggio è stato completato con successo nel maggio 2016 e attualmente è in corso la fase di precarica.

3. Modellazione numerica

L'evoluzione dello spessore del fango di dragaggio è stata studiata mettendo a punto dei modelli numerici in grado di simulare adeguatamente le caratteristiche peculiari del problema al finito, sia dal punto di vista meccanico sia da quello costruttivo. In particolare, l'utilizzo di una draga aspirante-refluente, immettendo in vasca una miscela fangosa caratterizzata da elevati valori del rapporto volumetrico acqua:solido (8÷10), comporta il verificarsi di fenomeni di sedimentazione e consolidazione associati a rilevanti variazioni dell'indice dei vuoti. La consolidazione è stata quindi simulata in grandi deformazioni (Gibson *et al.*, 1954), introducendo relazioni costitutive adatte a descrivere le significative variazioni di compressibilità e permeabilità, oltre a quelle geometriche, che si verificano durante lo sviluppo del processo. L'equazione di governo è:

$$\pm \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} - 1 \right) \frac{d}{de} \left[\frac{k}{1+e} \right] \frac{\partial e}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{k}{\rho_f (1+e)} \frac{d\sigma'_v}{de} \frac{\partial e}{\partial z} \right] + \frac{\partial e}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

dove z è la variabile geometrica, ρ_s e ρ_f sono la densità dei granuli e del fluido interstiziale, e è l'indice dei vuoti, k è il coefficiente di permeabilità e σ'_v è la tensione verticale efficace. Le analisi sono state condotte in condizioni monodimensionali, ben rappresentative del comportamento del materiale all'interno della vasca.

In accordo con il cronoprogramma di progetto, ciascuna fase di dragaggio richiede 30 giorni e la posa in opera dei piani drenanti orizzontali viene eseguita in 15 giorni.

3.1 Modello numerico semplice

In un primo momento la modellazione numerica è stata eseguita con il codice di calcolo alle differenze finite Condes0 (Yao e Znidarcic, 1997). Si tratta di un software semplice, sviluppato *ad hoc*, in grado di modellare l'immissione graduale del materiale di dragaggio all'interno della vasca e di risolvere l'equazione differenziale di governo della consolidazione in grandi deformazioni (eq. 1). Le relazioni costitutive impiegate per descrivere la legge di compressibilità e l'evoluzione della permeabilità con l'indice dei vuoti sono le seguenti:

$$e = A(\sigma'_v + Z)^B \quad (\text{Liu e Znidarcic, 1991}) \quad (2)$$

$$k = C e^D \quad (\text{Krizek e Somogyi, 1984}) \quad (3)$$

nelle quali le costanti A , B , C , D e Z sono state determinate mediante l'interpretazione dei risultati di prove edometriche e di sedimentazione (Fig. 2). Nel problema al finito il coefficiente di permeabilità ricavato in laboratorio è stato incrementato di 5 volte per tenere conto degli effetti di sito (Burghignoli e Calabresi, 1975).

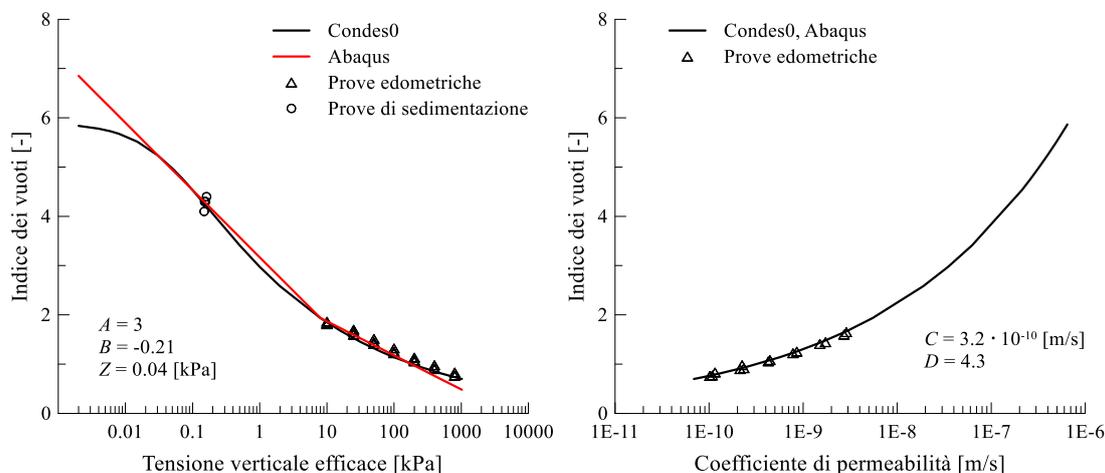


Fig 2. Calibrazione delle relazioni costitutive.

Il software risente di alcune limitazioni relative alle condizioni al contorno e, inoltre, non permette l'inserimento di contorni drenanti interni né l'applicazione di pressioni interstiziali negative o di carichi variabili nel tempo. Per queste ragioni il sistema vasca è stato modellato suddividendolo in tre sottosistemi semplificati, ciascuno rappresentativo di una fase di dragaggio. Per ciascuno dei tre sottosistemi è stata simulata l'immissione graduale in vasca adottando un tasso di riempimento di 0.167 m/giorno, in accordo con la produzione stimata della draga e del rapporto volumetrico acqua:solido di immissione del fango.

In seguito alla fase di refluitamento, il materiale è sottoposto ai carichi trasmessi dal terreno sovrastante e dal sistema di pompe a vuoto. Il peso di ogni sottosistema è stato stimato pari a 35 kPa e la depressione indotta dal sistema di *vacuum* è stata simulata come un carico di 30 kPa nel primo sottosistema e di 60 kPa nel secondo e terzo (Fig. 3). Nel primo sottosistema il carico rappresentativo della depressione corrisponde al valor medio di suzione nella colonna di terreno, avendo assunto una variazione lineare di pressione dell'acqua tra -60 kPa, applicati al contorno superiore, e 0 kPa, al contorno inferiore. Nel terzo sottosistema, 15 giorni dopo il termine del dragaggio è stato applicato in testa un carico di 60 kPa rappresentativo della diffusione sino al piano campagna della suzione indotta dal sistema di *vacuum* e degli effetti dell'evaporazione della lama d'acqua. Lo spessore complessivo dei sedimenti refluiti in vasca è stato calcolato sovrapponendo nel tempo gli spessori assunti dai tre sottosistemi (Fig. 3).

Per ciascun sottosistema si osserva un periodo iniziale di 30 giorni di aumento di spessore, legato all'immissione graduale di materiale, seguito da una fase di consolidazione per peso proprio e successivamente per l'applicazione di carichi. Lo spessore massimo del materiale di colmata è 6.33 m.

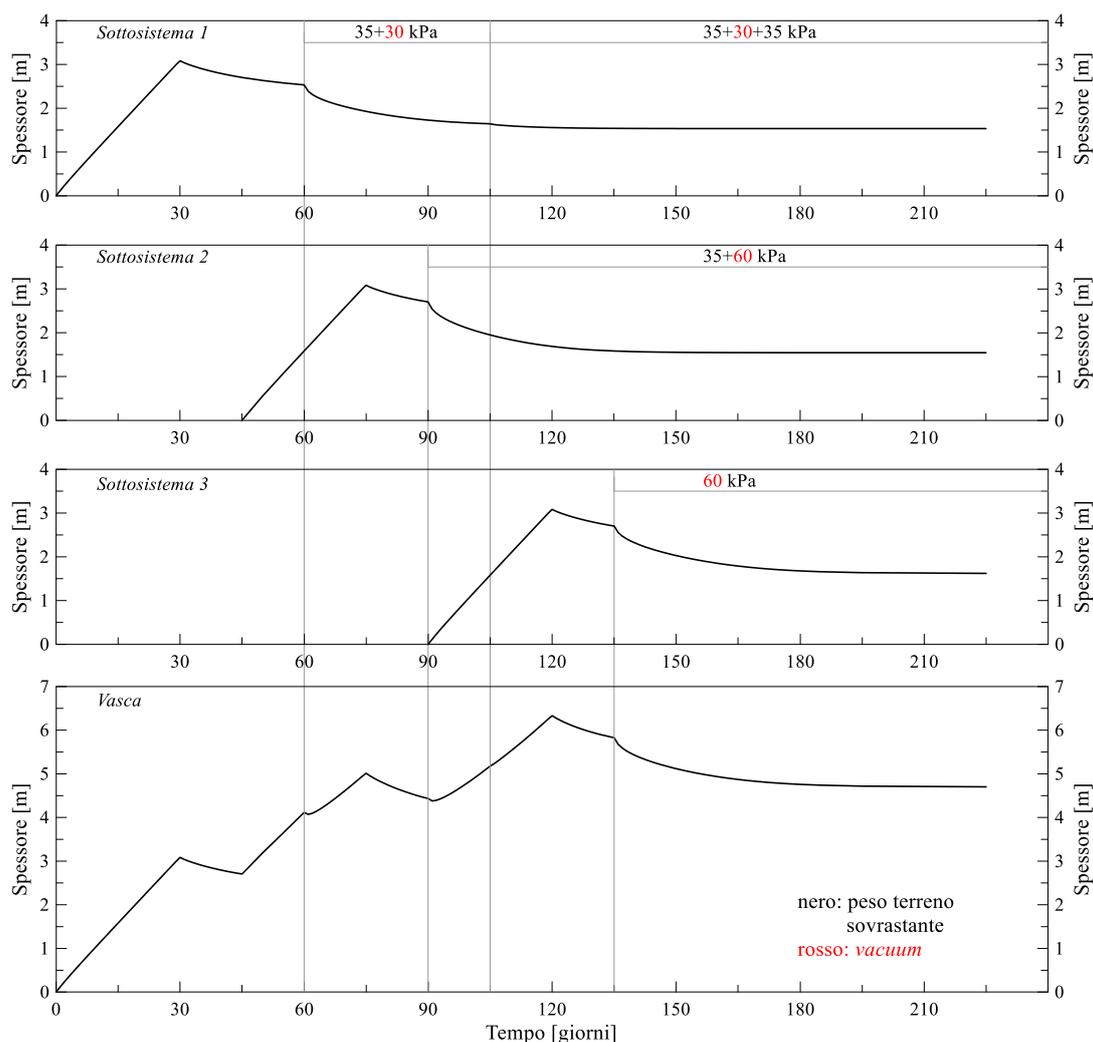


Fig 3. Condes0: Modellazione della vasca di colmata mediante sottosistemi.

3.2 Modello numerico avanzato

Al fine di valutare l'influenza delle ipotesi introdotte nella modellazione semplificata, il processo di riempimento della vasca di colmata è stato simulando utilizzando il codice di calcolo agli elementi finiti Abaqus/Standard.

Il comportamento meccanico del terreno è stato descritto adottando il modello di Cam-clay modificato, nel quale l'elevata compressibilità a bassi stati tensionali è stata simulata introducendo una variazione della pendenza della Linea di Consolidazione Normale, λ , in corrispondenza dell'indice dei vuoti associato al limite liquido, $e_L = 1.936$ (Fig. 2):

$$e > e_L \rightarrow \lambda = 0.59 \quad e \leq e_L \rightarrow \lambda = 0.30$$

La relazione indice dei vuoti:permeabilità è identica a quella utilizzata in Condes0.

Il riempimento è stato simulato mediante un'immissione a step, suddividendo in 5 parti – la prima e l'ultima pari alla metà delle altre – ciascun terzo di dragaggio. Le condizioni iniziali non sono drenate ma rappresentative dello stato del terreno al termine della sedimentazione ($\sigma'_v = 0.1$; $e = 4.53$). Alla base della colonna, in virtù della presenza dei dreni verticali idraulicamente connessi con il livello marino, è stato imposto un contorno drenante a pressione interstiziale nulla, mentre in testa alla colonna è stata mantenuta una lama d'acqua. In corrispondenza delle interfacce interne tra i tre terzi di dragaggio sono stati inseriti ulteriori contorni drenanti; questi ultimi sono posti in depressione (-60 kPa) una volta che la fase di reflimento successiva è circa al 40%. Anche in questo caso si è assunto che la suzione indotta dal sistema di *vacuum* si diffonda sino al piano campagna – e che la lama d'acqua superficiale evapori – a partire da 15 giorni dopo il termine del dragaggio. Nella figura 4 sono riportati i risultati dell'analisi in termini di spessore del terreno dragato; lo spessore massimo è pari a 6.10 m.

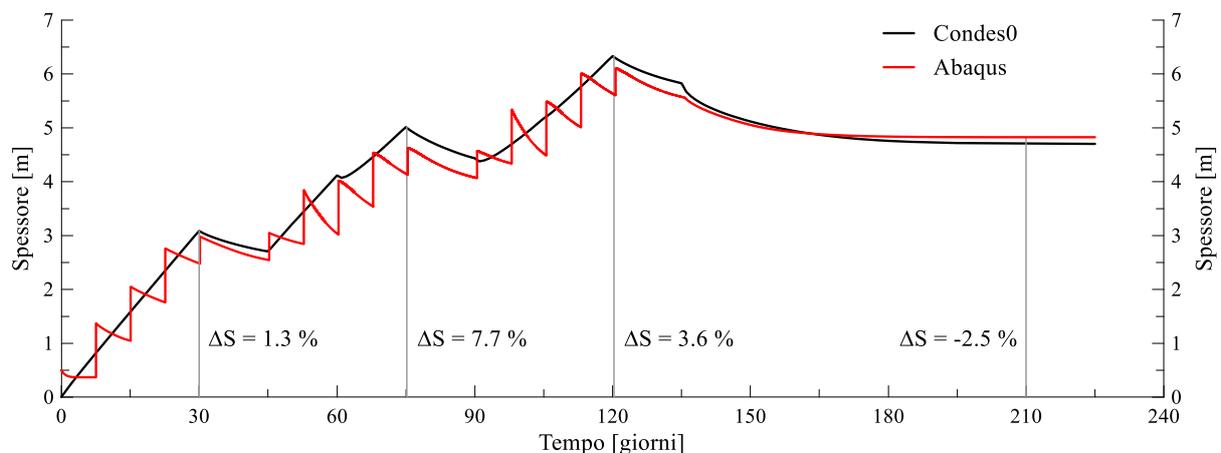


Fig 4. Evoluzione dello spessore del materiale di colmata nel tempo.

3.3 Confronto dei risultati

In figura 4 si può osservare anche il confronto tra i due risultati: eccezion fatta per le diverse modalità di immissione, che localmente creano delle differenze significative tra i modelli, globalmente il confronto è molto soddisfacente. Confrontando lo spessore del materiale di colmata nei momenti più significativi delle analisi, si nota una differenza massima di spessore ΔS inferiore all'8%.

Nella figura seguente, si riportano i profili di pressione interstiziale, tensione verticale efficace e indice dei vuoti lungo l'altezza della colonna al termine della consolidazione. I risultati ottenuti con Condes0 sono rappresentati da tre curve distinte, ciascuna relativa a un sottosistema. Le grandi differenze che si possono osservare in termini di pressione interstiziale sono ovviamente causate dalle diverse modalità di simulazione. Tuttavia, grazie alla specifica scelta dei carichi applicati nel modello semplificato, è stato possibile ottenere distribuzioni di tensioni efficaci relativamente simili, tali da garantire differenze contenute dell'indice dei vuoti.

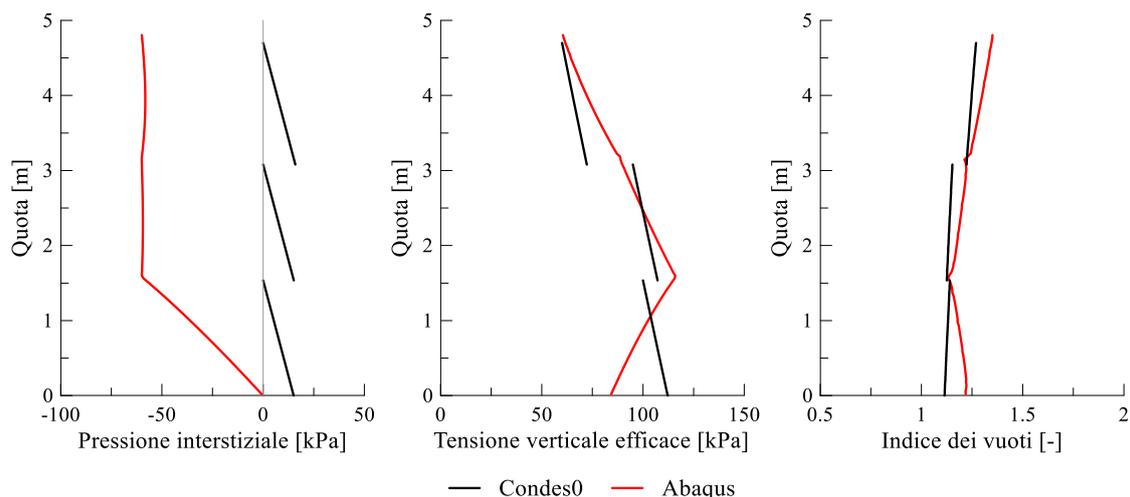


Fig 5. Profili verticali di pressione interstiziale, tensione efficace e indice dei vuoti.

4. Conclusioni

Nella nota sono state illustrate, in relazione alla vasca di colmata di Gaeta, alcune peculiarità del comportamento dei terreni di dragaggio. L'evoluzione dello spessore dei fanghi è stata studiata impiegando due codici di calcolo di complessità crescente, e sono state illustrate le modalità di simulazione dei principali aspetti, sia meccanici sia costruttivi, dei processi di immissione e consolidazione. I risultati ottenuti mostrano che anche utilizzando codici di calcolo semplici, nonostante le forti limitazioni, l'oculata formulazione delle ipotesi e delle condizioni di carico permetta di ottenere una soddisfacente rappresentazione dei fenomeni.

Bibliografia

- Burghignoli A., Calabresi G. (1975). "Determinazione del coefficiente di consolidazione di argille tenere su campioni di grandi dimensioni". Atti del XII Convegno Italiano di Geotecnica.
- Chu J., Yan S.W., & Yang H. (2000). "Soil improvement by the vacuum preloading method for an oil storage station", *Géotechnique*, 50 (6), 623-632.
- de Lillis A., Miliziano S. (2016). "Aspetti geotecnici della progettazione della vasca di colmata di Gaeta", *Rivista Italiana di Geotecnica*, 50(4), 3-22.
- Gibson R.E., England G.L., & Hussey M.J.L. (1954). "The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: 1. Finite non-linear consolidation of thin homogeneous layers", *Géotechnique*, 17 (3), 261-273.
- Krizek R.J., Somogyi F. (1984). "Perspectives on modelling consolidation of dredged materials". Proc. of the Symp. on Sedimentation-Consolidation Models: Predictions and Validation, ASCE, San Francisco, 296-332.
- Liu J.C., Znidarcic D. (1991). "Modeling one-dimensional compression characteristics of soils", *Journal of Geotechnical Engineering*, 117 (1), 162-169.
- Shang J.Q, Tang M., & Miao Z. (1998). "Vacuum preloading consolidation of reclaimed land: a case study", *Canadian Geotechnical Journal*, 35 (5), 740-749.
- Yao D.T, Znidarcic D. (1997). User's manual for computer program CONDES0: Numerical solution guide to one-dimensional large strain consolidation and desiccation by the finite difference implicit method. Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering. University of Colorado, Boulder.