

## **UN'APPLICAZIONE ATIPICA DEL VACUUM CONSOLIDATION PER IL CONSOLIDAMENTO RAPIDO DI TERRENI ARGILLOSI NELLA VASCA DI COLMATA DI GAETA**

Armando de Lillis

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, "Sapienza" Università di Roma*

*armando.delillis@uniroma1.it*

Salvatore Miliziano

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, "Sapienza" Università di Roma*

*salvatore.miliziano@uniroma1.it*

### **Sommario**

La nota presenta un adattamento della classica tecnica del vacuum consolidation per la sua applicazione in condizioni subacquee, nell'ambito del consolidamento dei terreni a grana fine della vasca di colmata di Gaeta (LT). L'approfondimento dei fondali antistanti il Porto richiede l'escavo di circa 360 000 m<sup>3</sup> di sedimenti prevalentemente a grana fine che saranno refluiti in una vasca di colmata già esistente, il cui volume è stato preliminarmente incrementato mediante un sovrizzo arginale. La principale problematica geotecnica affrontata nello studio è legata al modesto volume della vasca rispetto ai volumi di terreno interessati dall'escavo. La soluzione ideata prevede l'utilizzo di sistemi drenanti accoppiati ad un sistema di vacuum consolidation che hanno lo scopo di incrementare la capacità ricettiva della vasca accelerando i processi di consolidazione e aumentando lo stato tensionale efficace.

### **1. Introduzione**

La progettazione della vasche di colmata prevede tipicamente la realizzazione di vasche di volume nominale ben maggiore rispetto al volume di escavo. In tal modo gli eventuali interventi finalizzati all'accelerazione dei tempi di consolidazione ed al consolidamento dei materiali, necessari per il riutilizzo delle superfici, possono essere rimandati ad un secondo momento.

Nell'ambito di una convenzione di ricerca tra l'Autorità Portuale di Civitavecchia, Fiumicino e Gaeta e il Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica della Sapienza è stato studiato il problema della vasca di colmata di Gaeta, la quale, a seguito di un primo intervento di dragaggio ed al successivo sovrizzo degli argini, sarà utilizzata per refluire i volumi di escavo derivanti da una seconda campagna di dragaggio che approfondirà ulteriormente i fondali antistanti la Banchina Cicconardi.

La vasca, parzialmente riempita di materiale a grana fine attualmente in fase di consolidazione sotto il peso proprio, ha un volume nominale inferiore al volume di escavo e, inoltre, il progetto prevede il dragaggio mediante sistemi aspiranti refluenti che comportano l'aumento del volume occupato dal materiale. Al fine di rendere possibile il dragaggio in tempi rapidi è stato ideato un sistema composito per l'ottimizzazione della gestione dei sedimenti. In particolare verrà impiegata la tecnica del vacuum consolidation, per incrementare lo stato tensionale efficace del materiale refluito in vasca, e sarà predisposto un articolato sistema di accelerazione della consolidazione che permetterà la dissipazione delle sovrappressioni interstiziali contestualmente alle operazioni di dragaggio, incrementando virtualmente la capacità della vasca.

Data la complessità del sistema geotecnico risultante dall'inserimento di contorni drenanti e di

contorni di suzione, la modellazione è avvenuta mediante la suddivisione in sottosistemi con condizioni di carico, applicate al contorno, semplificate. I processi di consolidazione sono stati simulati tenendo conto delle grandi deformazioni utilizzando un codice di calcolo alle differenze finite in grado di considerare oltre alle variazioni di geometria (altezza di drenaggio) l'evoluzione della compressibilità e permeabilità al variare dell'indice dei vuoti.

I risultati mostrano che l'utilizzo congiunto dei sistemi drenanti e di vacuum consolidation permetterà l'immissione in vasca della totalità del materiale.

Nel seguito tutte le quote sono riferite al livello medio marino.

## **2. Stato attuale e sviluppi in progetto**

La vasca di colmata di Gaeta ha un'estensione di circa 60 000 m<sup>2</sup>, ha forma trapezoidale ed è delimitata da rilevati arginali in terra rinforzata con quote sommitali pari a +6.5 m. Allo stato attuale la vasca è riempita fino alla quota media di +1 m da materiale a grana fine in fase di consolidazione sotto il peso proprio derivante da una precedente campagna di dragaggio che ha portato i fondali alla quota di -10 m. Nella zona sud è presente un accumulo di materiale a granulometria più grossolana, circa 30 000 m<sup>3</sup>, che sarà asportato, uniformando il livello e la tipologia di materiale all'interno della vasca, e successivamente reimpiiegato nel progetto.

La vasca è dotata di un doppio sistema di sfioratori sul lato nord, il primo dei quali, che separa la vasca principale da una vasca di sedimentazione secondaria di dimensioni minori, si trova alla quota di +6 m. La vasca ha quindi un volume nominale pari a circa 300 000 m<sup>3</sup>. In Figura 1 è riportato uno stralcio planimetrico dell'area della vasca.

L'adeguamento Tecnico Funzionale al Piano Regolatore del Porto di Gaeta prevede l'ulteriore approfondimento dei fondali fino alla quota di -12 m. Il materiale di escavo, complessivamente stimato in 366 000 m<sup>3</sup>, sarà refluito all'interno della vasca di colmata, la cui capacità è stata incrementata fino a raggiungere la configurazione attuale mediante un sovrizzo arginale. L'area attualmente occupata dalla vasca di colmata è destinata a piazzali che dovranno essere realizzati alla quota media di circa +2.5 m.

## **3. Modello geotecnico dei terreni in posto, in vasca e di escavo**

Il modello geotecnico di riferimento è stato ricavato a partire da numerose campagne di indagine svolte nell'ultimo decennio e completato recentemente con indagini integrative volte da un lato a definire lo stato e le caratteristiche fisiche e meccaniche del materiale all'interno della vasca e dall'altro a individuare le caratteristiche chimiche, fisiche e microbiologiche dei sedimenti di escavo al fine di determinare le opzioni di gestione compatibile. Sono state inoltre eseguite numerose prove di sedimentazione con lo scopo di valutare la velocità di sedimentazione dei terreni e avere indicazioni sullo stato del materiale al termine del processo (volume specifico).

Lo strato più superficiale si sviluppa a partire dalla quota media di +1 m fino a profondità di -4 m ÷ -6 m ed è costituito prevalentemente da terreni a grana fine derivanti dalla precedente campagna di dragaggio e ancora in fase di consolidazione sotto il peso proprio. Sono caratterizzati da un indice di consistenza mediamente pari a 0.

Lo strato sottostante, originariamente costituente il fondale marino, si estende fino alla profondità di -8 m ÷ -11 m ed è costituito da argille limose normalmente consolidate (litotipo LAS), mediamente plastiche e di scarsa consistenza.

Al di sotto di questo strato si trova un deposito di sabbie limose (litotipo S/SL) di spessore compreso tra 8 m e 10 m; si tratta di un terreno mediamente addensato dotato di discrete caratteristiche meccaniche.

Negli strati più profondi si ritrova un'alternanza di terreni a granulometria fine sovraconsolidati e

consistenti (litotipo AL/LA) e di livelli di terreno a granulometria più grossolana, sabbie e sabbie limose addensate (S/SL). In Figura 2 si riporta la sezione stratigrafica 4-4, orientata perpendicolarmente alla linea di costa.

I sedimenti di escavo sono costituiti per l'83% da limi e argille, per il 12 % da sabbie e per il 5% da ghiaie. L'indice di plasticità medio è pari a 32.

Nella Tabella 1 sono illustrate le principali caratteristiche fisiche e meccaniche dei terreni presenti all'interno e al di sotto della vasca di colmata.

#### **4. Principali problematiche geotecniche e soluzione adottata**

Il progetto prevede di garantire in tempi brevi l'operatività di circa 350 m di banchina con fondale alla quota di -12 m. A tal fine si prevede il reflimento dei sedimenti dragati nella cassa di colmata mediante una draga di tipo aspirante refluyente con una produzione di circa 500 m<sup>3</sup>/h di materiale in posto.

Tale obiettivo presenta delle criticità in quanto il volume nominale della vasca è minore del volume di escavo ed inoltre le modalità previste per il dragaggio comportano un iniziale significativo incremento del volume occupato dal materiale solido. Le prove di sedimentazione eseguite sul materiale di escavo mostrano, infatti, che al termine del processo di sedimentazione l'indice dei vuoti assunto dal materiale è pari a circa 3 volte l'indice dei vuoti in sito.

Al fine di incrementare la capacità ricettiva della vasca è necessario accelerare i processi di consolidazione all'interno di tutto il volume significativo; è stata quindi prevista l'implementazione di un articolato sistema di drenaggio composto di dreni a nastro verticali, geogriglie drenanti e tubazioni microfessurate.

I dreni verticali a nastro, infissi con interasse 2 m, andranno a interessare i terreni attualmente presenti in vasca ed il sottostante deposito LAS, anch'esso altamente compressibile, intestandosi nel sottostante livello sabbioso presente alla profondità di -8 m e -11 m, rispettivamente per il lato terra ed il lato mare. I dreni saranno di tipo corrugato in modo da poter accompagnare le grandi deformazioni che interesseranno il materiale senza perdere di funzionalità. Al di sopra dei dreni sarà posta in opera una geogriglia drenante orizzontale che ricoprirà tutta la superficie della vasca (Figura 3).

Successivamente avranno inizio le attività di dragaggio che saranno suddivise in tre fasi uguali; al termine della prima e della seconda fase saranno installate, all'interno di un letto di sabbia di 25 cm appositamente realizzato utilizzando parte del materiale già presente nella vasca di colmata e precedentemente asportato, delle tubazioni drenanti microfessurate in HDPE con interasse 4 m (Figura 4).

Al fine di incrementare lo stato tensionale efficace del materiale all'interno della vasca, e quindi ridurre il più possibile il volume occupato dal materiale, e di fornire un effetto di precarica necessario per la futura funzionalità dei piazzali, è previsto l'utilizzo di un sistema di vacuum consolidation (*Masse, Wong, Spaulding, & Varaskin, 2001*). Le pompe a vuoto, in grado di indurre la rimozione parziale della pressione atmosferica da un mezzo confinato e quindi, riducendo le pressioni interstiziali a parità di tensione totale, di incrementare le tensioni efficaci, saranno connesse alle tubazioni drenanti microfessurate e mediante tale connessione permetteranno la diffusione del vacuum negli strati superficiali della vasca di colmata.

#### **5. Valutazione dei cedimenti**

Considerate le grandi deformazioni attese, stimate con un  $\varepsilon_{v,max} \approx 30\%$ , a cui si accompagna un  $\Delta e_{max} \approx 5$ , che comportano significative variazioni della compressibilità e della permeabilità oltre che dell'altezza di drenaggio, si è scelto di utilizzare la teoria della consolidazione monodimensionale in grandi deformazioni (*Gibson & Hussey, 1967*). Pertanto, sono state adottate le seguenti funzioni di

permeabilità e compressibilità al variare dell'indice dei vuoti (Figg. 5 e 6).

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

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

Dove  $A$ ,  $B$ ,  $C$  [m/s],  $D$  e  $Z$  [kPa] sono delle costanti empiriche.

La legge di compressibilità è stata calibrata a bassi stati tensionali utilizzando i risultati delle prove di sedimentazione eseguite con rapporti volumetrici acqua:solido simili a quelli propri delle draghe aspiranti refluenti ( $V_w/V_s = 8 \div 10$ ).

Data la complessità del sistema geotecnico risultante dall'inserimento di contorni drenanti e di punti di suzione, l'analisi è stata effettuata con il programma alle differenze finite CONDES0 (Yao & Znidarcic, 1997) mediante sottosistemi con condizioni di carico applicate al contorno semplificate. In particolare, la vasca di colmata è stata suddivisa in tre sottosistemi, A, B e C, rappresentativi delle tre fasi di dragaggio, costituiti da circa 120 000 m<sup>3</sup> di materiale di escavo, e di un quarto sottosistema, P, costituito dai terreni già presenti all'interno della vasca fino al tetto del livello sabbioso. A causa delle sensibili variazioni stratigrafiche fra il profilo lato terra e il profilo lato mare sono state analizzate due diverse configurazioni.

Per ogni sottosistema è stata modellata l'immissione graduale in vasca, innescando sin dalle prime fasi la consolidazione per peso proprio, e successivamente sono stati applicati i carichi indotti dai terreni sovrastanti e dal sistema di vacuum consolidation, il cui effetto è stato valutato come un incremento di tensioni efficaci cautelativamente pari a 60 kPa. La deposizione del materiale e le condizioni di carico sono state modellate coerentemente con i tempi imposti dal cronoprogramma di progetto.

In Figura 7 si riportano a titolo d'esempio i risultati relativi al sottosistema A, corrispondente al primo terzo di dragaggio. La deposizione del materiale in condizioni non drenate darebbe luogo ad uno strato di circa 5 m di spessore ma l'effetto combinato dei sistemi implementati fa sì che la massima altezza raggiunta durante il refluento sia pari a circa 3 m, mentre lo spessore finale del materiale è pari a circa 1.5 m. In questo caso l'effetto del vacuum è stato valutato pari a soli 30 kPa in quanto la suzione sarà applicata solamente al contorno superiore dello strato. Le condizioni drenate finali vengono raggiunte circa 3.5 mesi dopo il termine del dragaggio.

## **6. Risultati**

L'altezza complessiva del materiale all'interno della vasca è stata ottenuta sommando nel tempo le altezze dei diversi sottosistemi a partire dalla quota del tetto dello strato sabbioso, considerata fissa. I risultati confermano la validità della soluzione progettuale adottata. L'utilizzo combinato di sistemi di drenaggio e del vacuum consolidation, infatti, permette il sostanziale esaurimento dei fenomeni di consolidazione in tempi rapidi, confrontabili con i tempi di esecuzione dell'opera, e la riduzione del volume occupato in vasca dal materiale solido, garantendo l'immissione in vasca della totalità del materiale di escavo (Figura 8).

La quota massima raggiunta in vasca durante le operazioni di refluento è pari a +4.58 m. Una volta raggiunte le condizioni drenate la quota del materiale in vasca è pari a +2.58 e +2.91 m rispettivamente per il lato mare ed il lato terra.

Al termine delle operazioni di dragaggio, il progetto prevede la realizzazione di un rilevato di precarica di altezza pari a 3 m. I cedimenti indotti porteranno il materiale all'interno della vasca ad una quota stimata di +2.06 per il lato mare e +2.47 per il lato terra; considerando che parte del materiale potrà essere rimosso e collocato nella vasca secondaria, sarà quindi possibile realizzare i piazzali alla quota di progetto di +2.50 m.

## 7. Conclusioni e sviluppi futuri

Il lavoro presentato nella nota illustra un adattamento della tecnica del vacuum consolidation alle condizioni subacquee. L'applicazione descritta del vacuum consolidation, unitamente ai sistemi drenanti, permette di ottimizzare la gestione dei terreni di escavo a grana fine riducendo i tempi di consolidazione e le lavorazioni necessarie per il riutilizzo delle superfici.

Gli sviluppi futuri prevedono il completamento di un modello numerico alle differenze finite e l'utilizzo di un legame costitutivo più avanzato (Cam Clay modificato). Tale modello potrà essere utilizzato per le back analysis e affinato grazie all'articolato sistema di monitoraggio che sarà attivo durante i lavori e permetterà di rilevare l'evoluzione dei cedimenti e delle pressioni interstiziali nei terreni a grana fine presenti all'interno della vasca.

Tabella 1 – Caratteristiche fisiche e meccaniche dei terreni in posto

Da (m)	A (m)	Unità (-)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$e_0$ (-)	$c_c$ (-)	$c_s$ (-)	OCR (-)	$E'$ (MPa)
1	-4 ÷ -6	Mat. Colmata	15	2.2÷2.6	0.4	0.08	1	-
-4 ÷ -6	-8 ÷ -11	LAS	15.5	1.6	0.4	0.08	1	-
-8 ÷ -11	-16 ÷ -20	SL	19	0.9	-	-	-	35

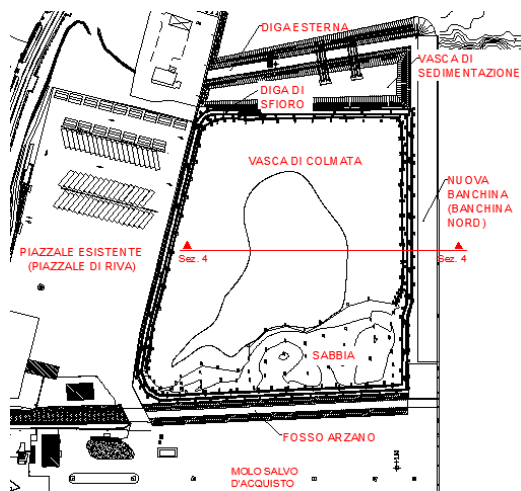


Fig 1. Stralcio planimetrico dell'area della vasca

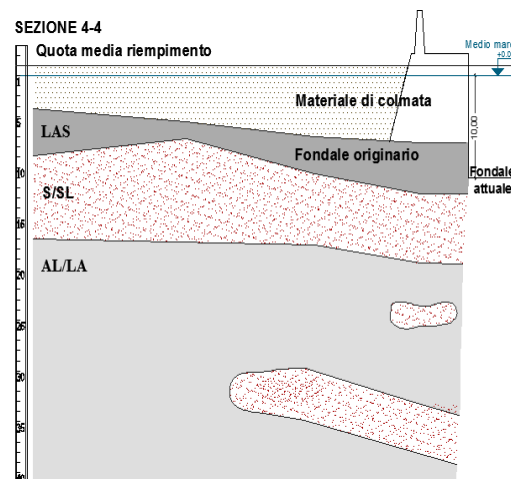


Fig 2. Sezione stratigrafica 4-4

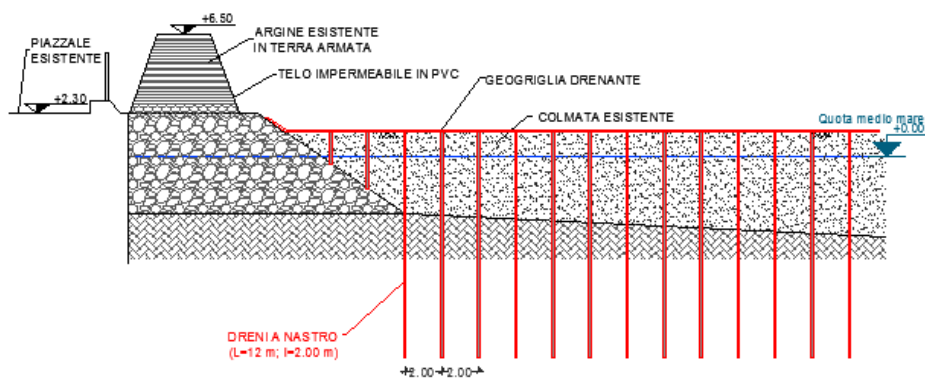


Fig 3. Infissione dei dreni verticali e posa in opera della geogriglia drenante

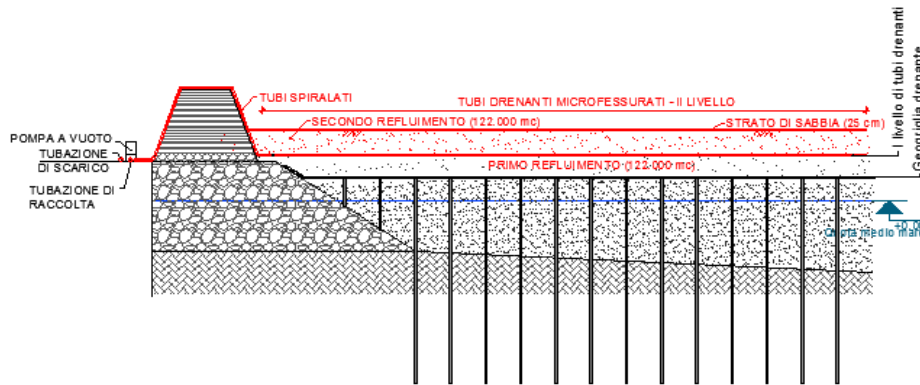


Fig 4. Installazione delle tubazioni microfessurate e connessione con il sistema di vacuum consolidation (Lo spessore degli strati refluiti è indicativo)

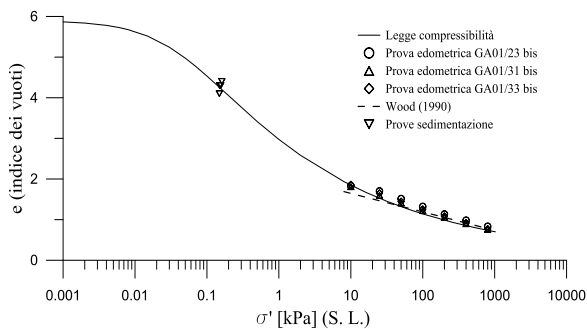


Fig 5. Legge di compressibilità

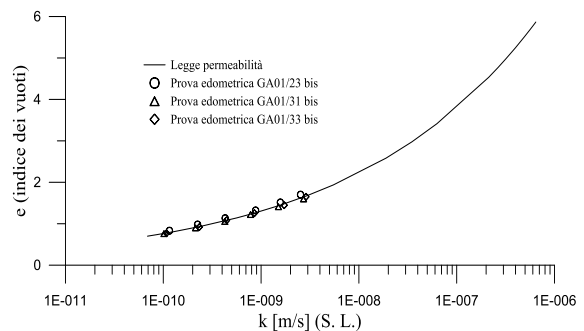


Fig 6. Relazione indice dei vuoti : permeabilità

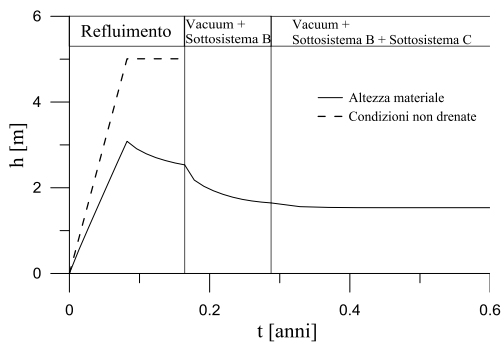


Fig 7. Analisi sottosistema A

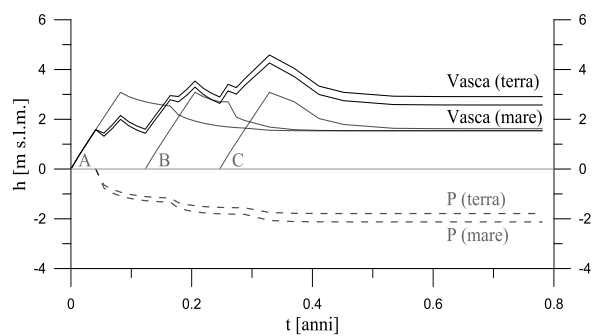


Fig 8. Altezza del materiale all'interno della vasca

## Bibliografia

- Gibson, R. E., & Hussey, M. (1967). The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: part I, finite non-linear consolidation of thin homogeneous layers. *Géotechnique*, (17), 261–273.
- Krizek, R. J., & Somogyi, F. (1984). Perspectives on Modelling Consolidation of Dredged Materials. In *Sedimentation Consolidation Models—Predictions and Validation* (pp. 296–332). ASCE.
- Liu, J. C., & Znidarcic, D. (1991). Modeling One Dimensional Compression Characteristics of Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(1), 162–169.
- Masse, F., Wong, I. C., Spaulding, C. A., & Varaskin, S. (2001). Vacuum Consolidation: A review of 12 years of successful development. In *Geo-Odyssey*.
- Yao, D. T. C., & 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 (CONDES0)*.