

CICLO DI SEMINARI SUL MIGLIORAMENTO DEI TERRENI

Cassino, 9-11 Marzo 2016

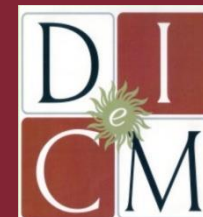
Aspetti geotecnici nella progettazione delle casse di colmata marine

Salvatore Miliziano

MASTER
Progettazione Geotecnica



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA



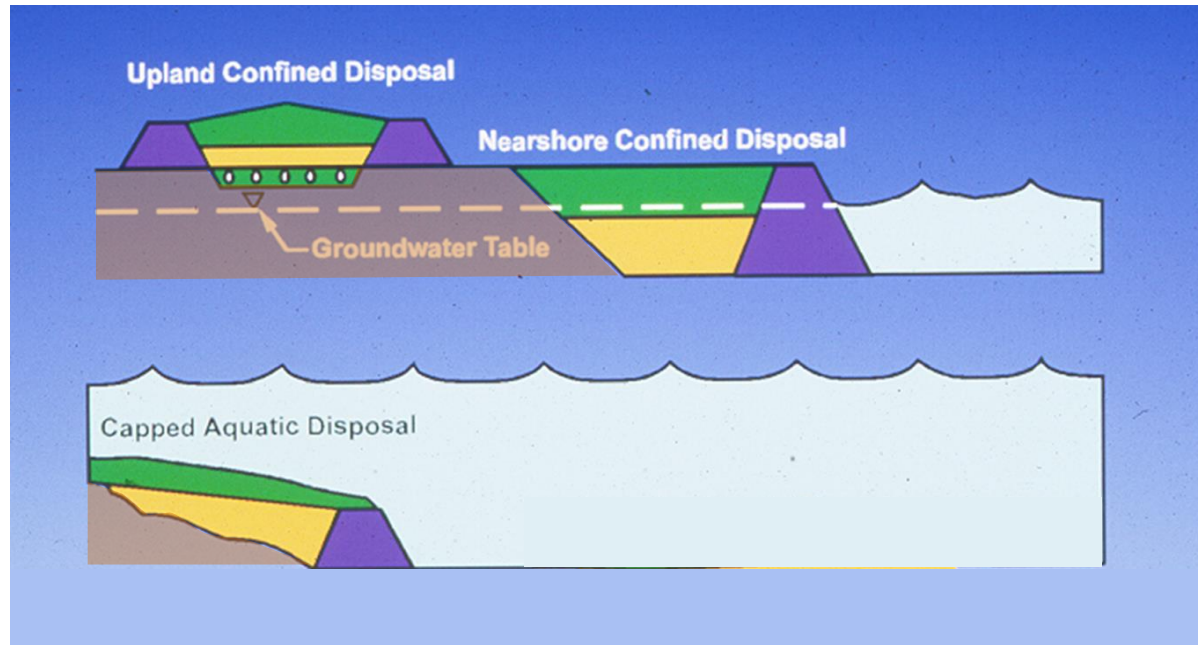
11 Marzo 2016

Sommario

- ✓ Casse di colmata marine e loro utilizzo
- ✓ Aspetti geotecnici di rilevanza progettuale (sabbie – argille)
 - ✓ Dimensionamento volumetrico delle vasche
 - ✓ Consolidamento dei terreni conferiti in vasca
- ✓ Impiego degli argini di sovralzso provvisori in presenza di sedimenti a grana fine
- ✓ Considerazioni conclusive

Vasche di colmata marine

Le casse di colmata marine sono delle vasche realizzate nei pressi della costa, delimitate da argini generalmente in terra, destinate ad accogliere la terra derivante dalle attività di dragaggio



Comuni tipologie di casse di colmata

Vasche di colmata marine

Necessità di eseguire dragaggi deriva da diverse esigenze

- ✓ Manutenzione dei porti e dei canali (interrimento)
- ✓ Approfondimento dei fondali per mutate esigenze funzionali
- ✓ Realizzazione di nuove opere portuali
- ✓ Escavi per bonifiche, posa in opera di condotte sottomarine e scanni di imbasamento



Porto di Gladstone, Australia



Porto di Civitavecchia

Opzioni di gestione dei fanghi di dragaggio



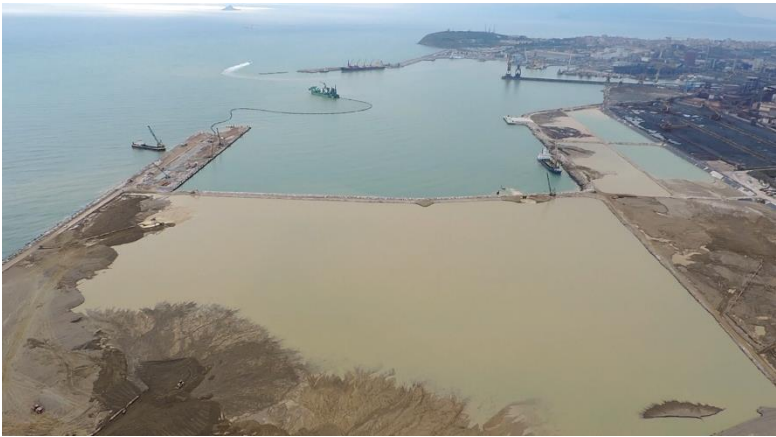
Riutilizzo (ripascimenti)



Scarico a mare



Conferimento in cassa di colmata



Piombino



Civitavecchia



Vasche di colmata - Land reclamation

Il conferimento in casse di colmata *nearshore* presenta il vantaggio che l'area occupata dalla vasca può essere utilmente impiegata come terra recuperata al mare (valorizzazione)

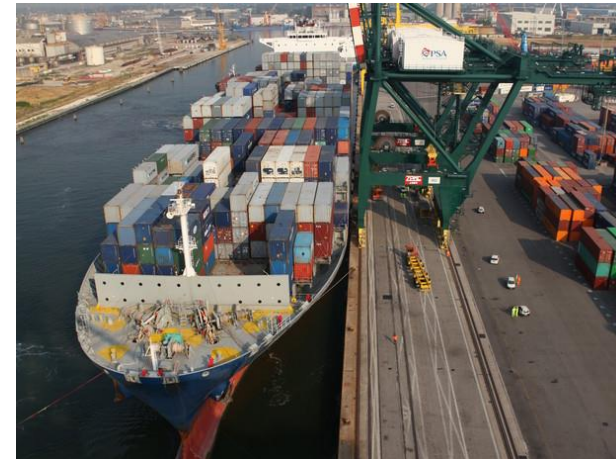
A questo fine è necessario consolidare/trattare il terreno refluito in vasca allo scopo di conferire al materiale le caratteristiche meccaniche di resistenza e rigidità necessarie per soddisfare le verifiche di sicurezza e garantire un buon comportamento in esercizio



Meedhoo island, Maldives

Vasche di colmata - Land reclamation

L'intensità e il tipo di consolidamento sono funzione dello specifico uso cui i piazzali sono destinati (prestazioni)



Aspetti geotecnici nella progettazione delle casse di colmata marine



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Aspetti geotecnici di rilevanza progettuale

- ✓ Stabilità degli argini
- ✓ Permeabilità del sistema cassa (argini e fondo): fanghi inquinati, ritorno del fango a mare attraverso gli argini (eventuale impermeabilizzazione)
- ✓ **Dimensionamento volumetrico delle vasche per accogliere il materiale previsto dal dragaggio**
- ✓ **Consolidamento dei terreni conferiti in vasca per rendere i piazzali idonei alle destinazioni d'uso previste**

Dimensionamento del volume della cassa

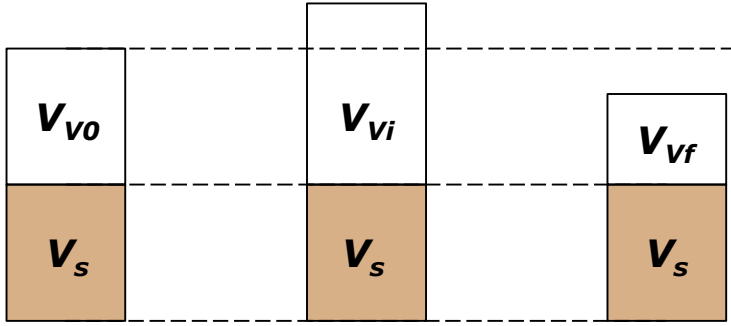
Le informazioni necessarie per il dimensionamento volumetrico della vasca sono:

- Il volume di terreno in posto da dragare, V_0
- Il volume, V_i , inizialmente occupato dal materiale in vasca subito dopo il conferimento
La movimentazione del materiale (dragaggio, trasporto e conferimento in vasca), a parità di volume di solido, V_s , generalmente produce un aumento del volume dei vuoti, V_v e, conseguentemente, il volume totale iniziale $V_i > V_0$
- Il volume occupato dal terreno in vasca al termine dei processi di consolidamento, V_f
 V_f è minore rispetto al volume appena conferito e, comunque, generalmente differente dal volume del terreno in posto
- La quota finale di progetto e lo spessore del pacchetto di finitura (sottofondo e pavimentazione)

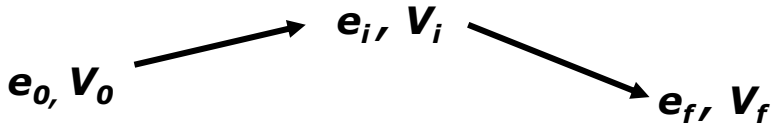
Dimensionamento del volume della cassa

Il volume del solido è costante mentre il volume totale varia al variare del volume dei vuoti che il terreno presenta nelle diverse fasi del processo

- Volume in posto $V_0 = V_s + V_{V0}$
- Volume iniziale in vasca $V_i = V_s + V_{Vi}$
- Volume finale in vasca $V_f = V_s + V_{Vf}$



$$e = V_v / V_s$$



Dimensionamento cassa – **sabbie**

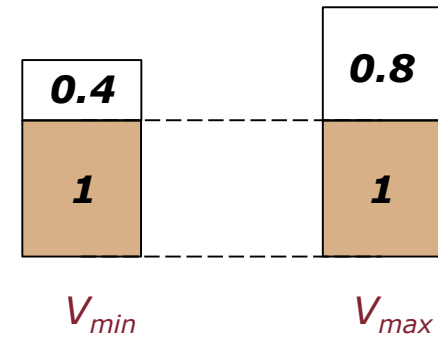
Il volume iniziale dipende dallo stato di addensamento in sito del materiale

$$e = V_v / V_s$$

$$0.4 < e < 0.8$$

$$D_r(\%) = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \cdot 100$$

$$100 \% \geq D_r \geq 0 \%$$



$$\Delta V_{max} = \frac{V_{max} - V_{min}}{V_{min}} = \frac{1.8 - 1.4}{1.4} \approx 30\%$$

La massima variazione possibile del volume occupato dal terreno è pari a circa il 30% passando da uno stato di massimo addensamento ad uno di minimo addensamento

Determinazione dell'indice dei vuoti in sito

Necessario per la determinazione del volume di solido da trasferire nella vasca

- ✓ Essenzialmente metodi **indiretti** quali correlazioni con i risultati delle prove penetrometriche statiche e dinamiche e la densità relativa
- ✓ Prove di **laboratorio** su campioni granulometricamente rappresentativi per la determinazione degli indici dei vuoti corrispondenti al minimo e al massimo grado di addensamento
- ✓ Dalla definizione di D_r , infine, si può ricavare l'indice dei vuoti in sito, il volume dei vuoti e il volume della componente solida

$$e_0 = e_{max} - D_r (e_{max} - e_{min})$$

$$V_s = V_0 / (1 + e_0)$$

- ✓ La geofisica

Determinazione dell'indice dei vuoti in vasca subito dopo il conferimento

- ✓ dipende dalle modalità di dragaggio e soprattutto dalle modalità di conferimento in vasca - nel caso di refluento idraulico ha grande rilevanza se l'immissione avviene

in acqua o fuori acqua
 ↓ ↓
 $D_r = 30 \div 60\%$ $D_r = 60 \div 80\%$



Determinazione dell'indice dei vuoti in vasca subito dopo il conferimento

Dalla densità relativa (stimata in funzione delle modalità di reflimento) è possibile risalire all'indice dei vuoti e quindi al volume inizialmente occupato dal materiale in vasca, V_i

Per terreni a grana grossa, potendosi formare accumuli di materiale a quote maggiori rispetto alla sommità arginale, la vasca può inizialmente contenere un volume maggiore di quello nominale

Il volume finale occupato dal terreno refluito in vasca, in ogni caso, dovrà essere compatibile con la posa in opera delle finiture (sottofondo e pavimentazione) → valutazione della riduzione di volume del materiale in seguito ai consolidamenti

Consolidamento della colmata

Nel caso di immissione del materiale in acqua, la densità relativa difficilmente supera il 50%
A bassi valori di D_r si associano caratteristiche meccaniche di resistenza scadenti e compressibilità elevate, oltre ad elevati rischi di liquefazione sotto sisma

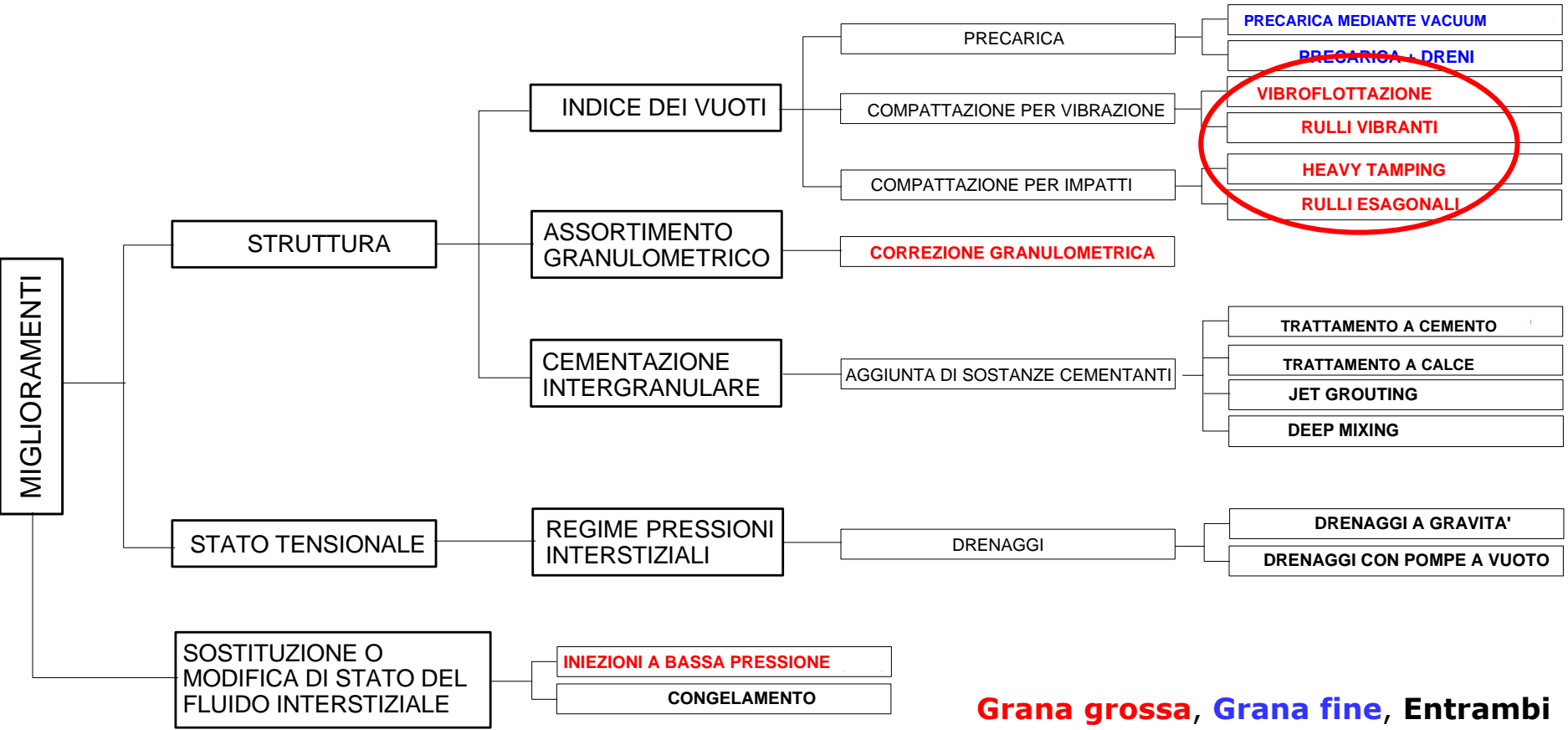


Fenomeni di instabilità indotti da liquefazione: terremoto di Niigata, 1964

→ al fine di rendere i piazzali sovrastanti la colmata idonei alla loro destinazione d'uso è necessario consolidare i terreni conferiti in vasca

Trattamenti di miglioramento

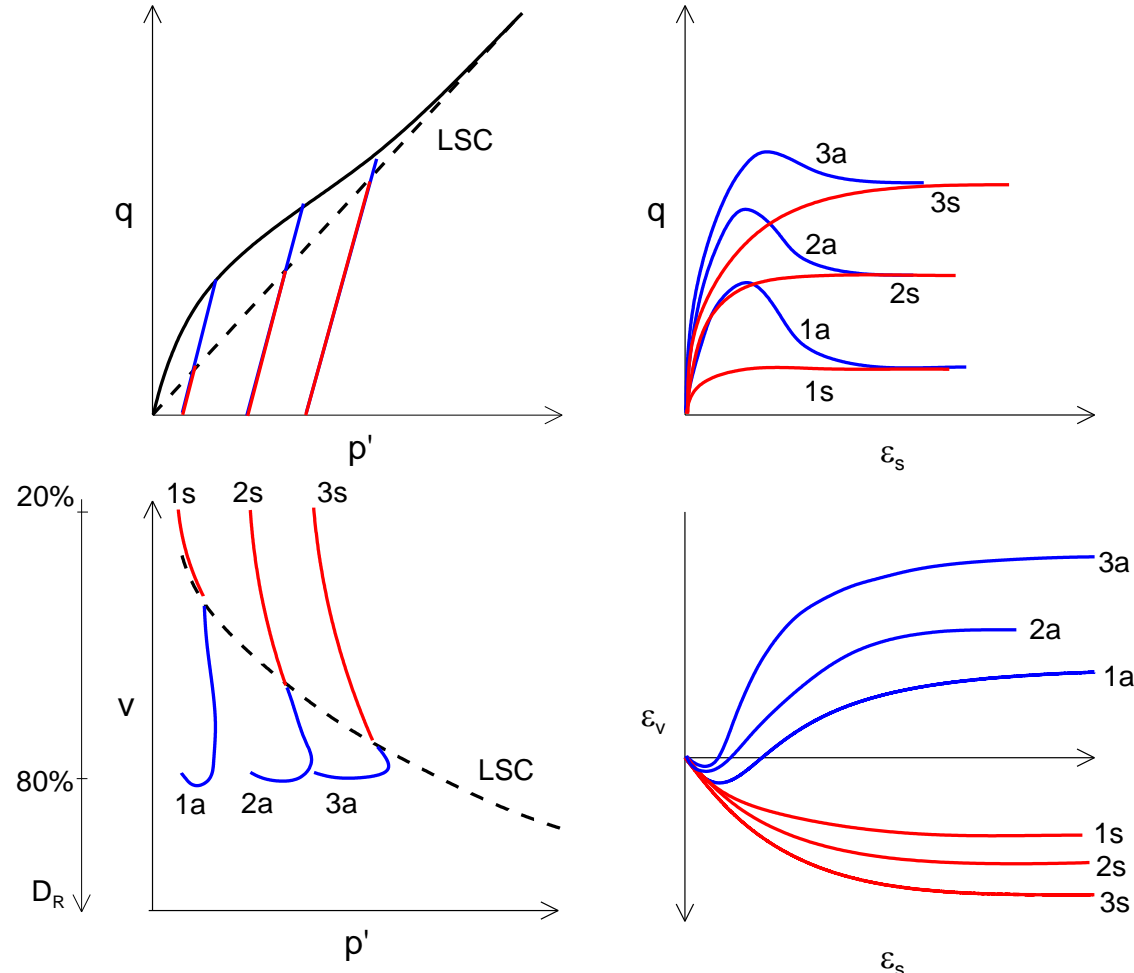
I **trattamenti di miglioramento** sono interventi che modificano il **comportamento meccanico** dei terreni trattati



Grana grossa, Grana fine, Entrambi

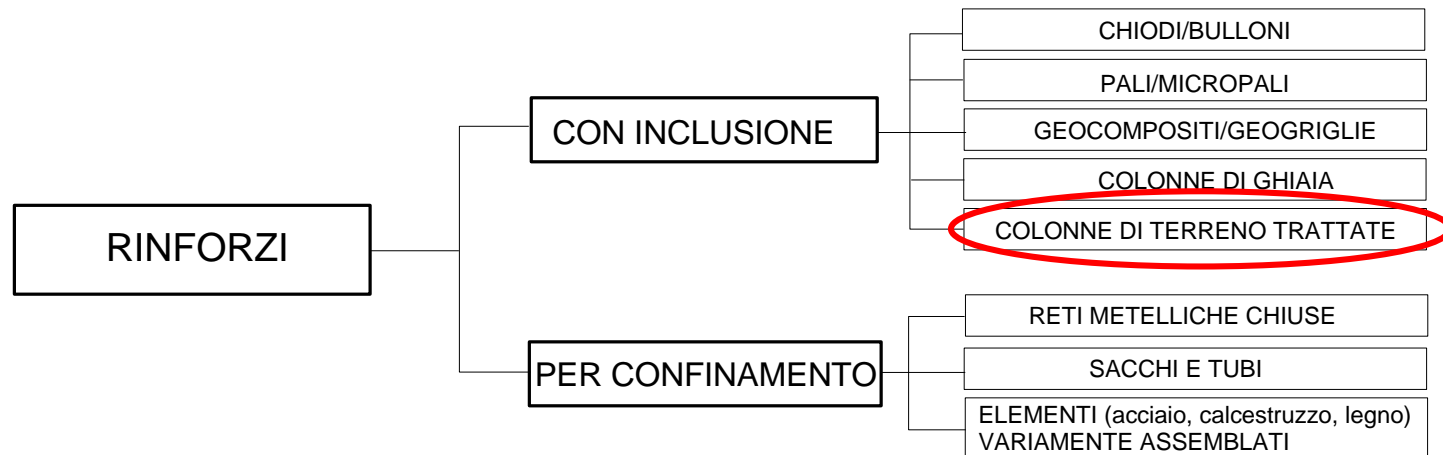
Consolidamento della colmata - **sabbie**

Per i terreni sabbiosi nella gran parte delle applicazioni si ricorre a tecniche di consolidamento in grado di produrre un addensamento



Trattamenti di rinforzo

I **rinforzi** sono **elementi strutturali** inseriti all'**interno** (rinforzi con inclusione) o all'**esterno** (rinforzo per confinamento) del **terreno**



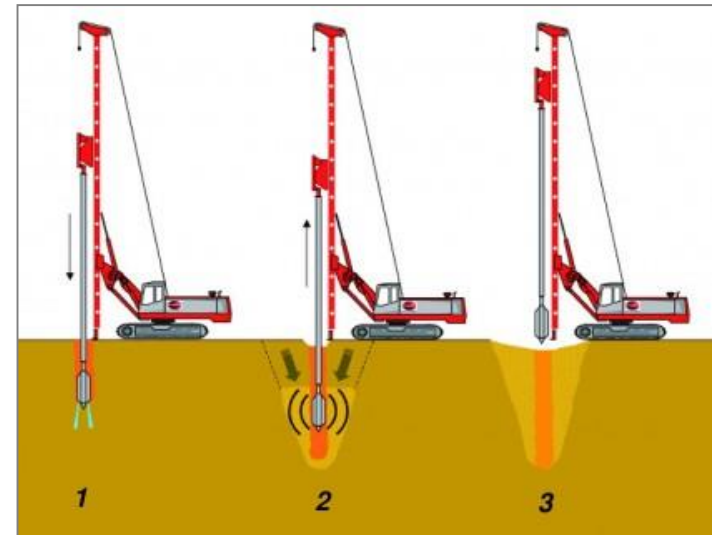
Consolidamento della colmata - **sabbie**

Trattamenti di miglioramento

- **Compattazione per impatti**
(heavy tamping, rulli sagomati)
- **Compattazione per vibrazione**
(Vibroflottazione, rulli vibranti)

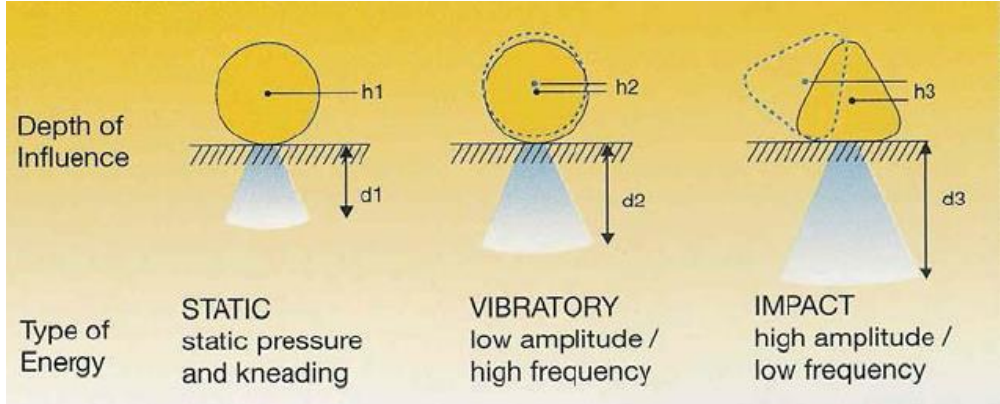
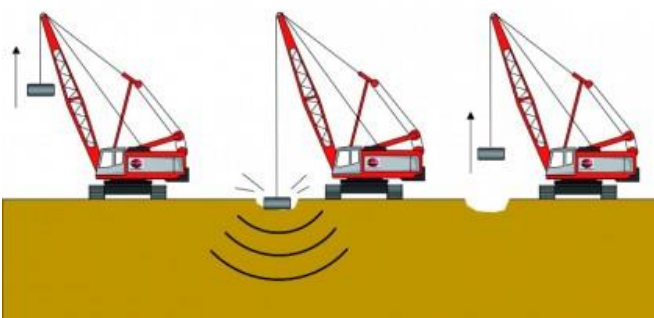
Trattamenti di rinforzo

- **Colonne di terreno trattate**
(deep mixing/jet grouting)
(colonne in ghiaia vibro-compattate)



Vibroflottazione (compattazione profonda)

Progettazione su base empirica (campi prova)

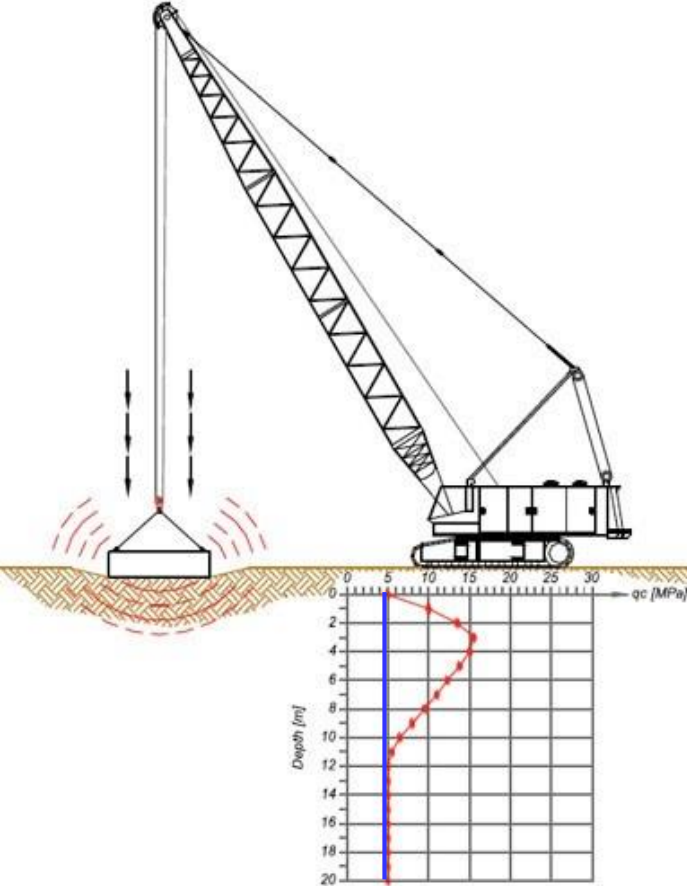


Sistemi per la compattazione superficiale

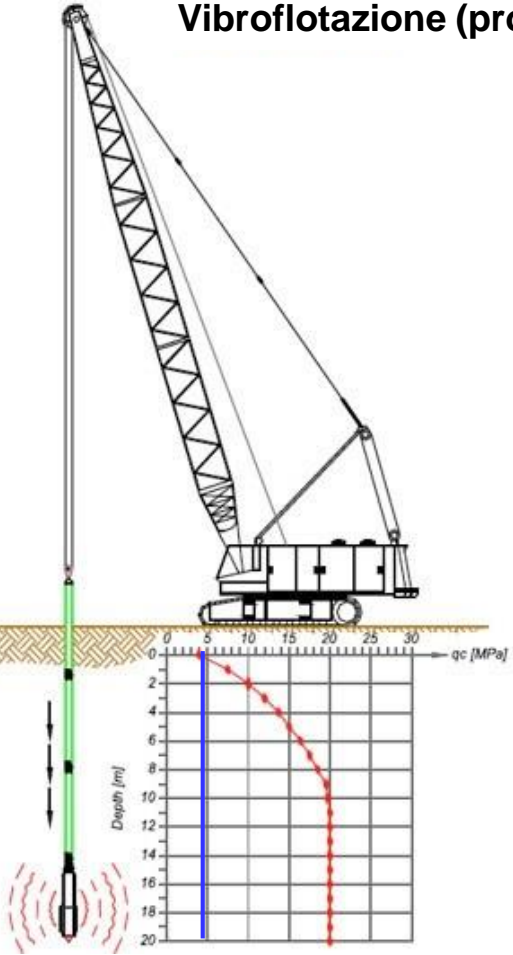


Consolidamento - sabbie

Compattazione dinamica (superficiale)



Vibroflotazione (profonda)



Sono trattamenti complementari

Dimensionamento del volume della cassa – argille

L'indice dei vuoti in sito presenta un campo di variabilità ben maggiore rispetto a quello dei terreni a grana grossa

Per argille sature vale la relazione

$$e = V_v/V_s = \frac{P_w \gamma_s}{\gamma_w P_s} = G_s w \cong 2.6 w$$

Poiché nei fondali marini si riscontra spesso la presenza di fanghi normalmente consolidati di scarsa consistenza

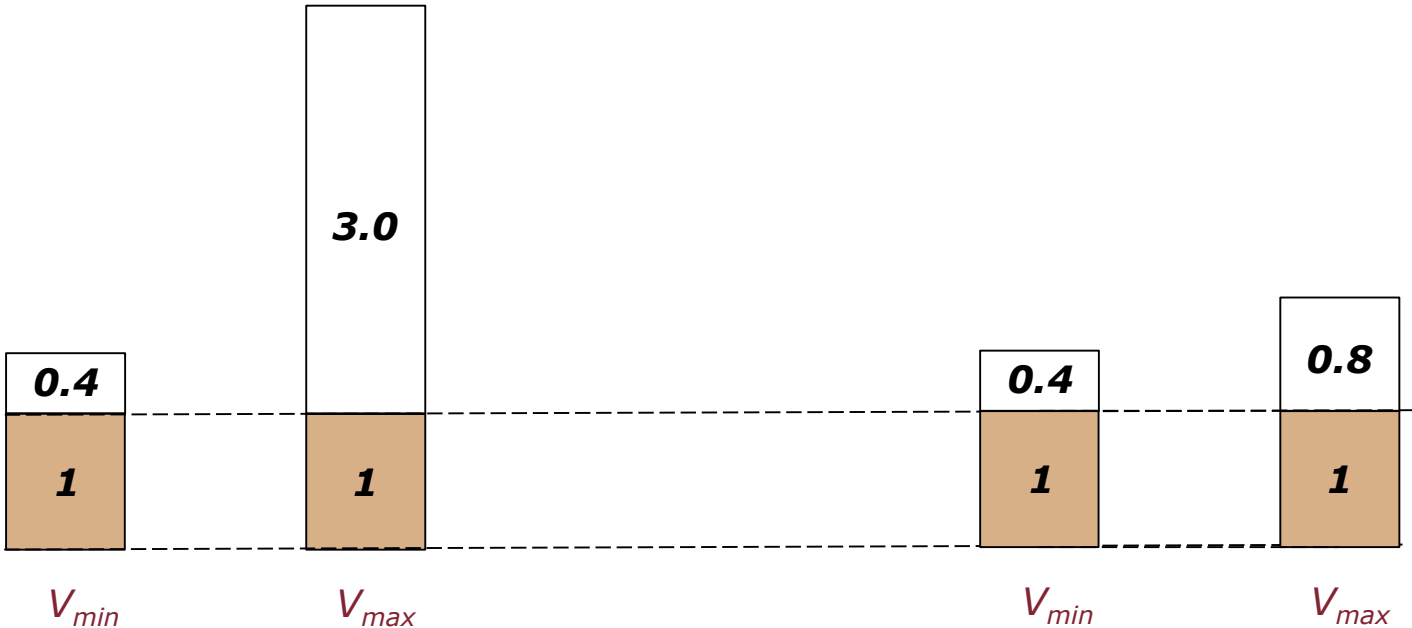
$$w = w_L = 50 \div 100 \%$$

l'indice dei vuoti può raggiungere valori massimi pari a $1.3 \div 2.6$

Per terreni sovraconsolidati l'indice dei vuoti può scendere a valori di $0.4 \div 0.6$

Dimensionamento cassa – argille

Subito dopo l'immissione in vasca l'indice dei vuoti iniziale può assumere valori ancora più elevati (3-4-5) → le variazioni di volume per le **argille** sono >> rispetto alle **sabbie**



Argille: variazioni possibili anche del 200 ÷ 300%

Sabbie: massima variazione 30%



Determinazione dell'indice dei vuoti in sito

Necessario per la determinazione del volume di solido da trasferire nella vasca

- ✓ Essenzialmente metodi **diretti**: determinazioni di laboratorio su campioni indisturbati
- ✓ $V_s = V_0 / (1 + e_0)$ essendo V_0 il volume di terreno da dragare (in sito)



Porto di Piombino, 2014

Dimensionamento cassa – argille

Nella pratica, spesso, si ricorre all'impiego di draghe aspiranti-refluenti (elevata produzione); la sospensione fangosa presenta elevati rapporti tra il volume di acqua e il volume di solido:

$$V_w / V_s = 6 \div 12$$

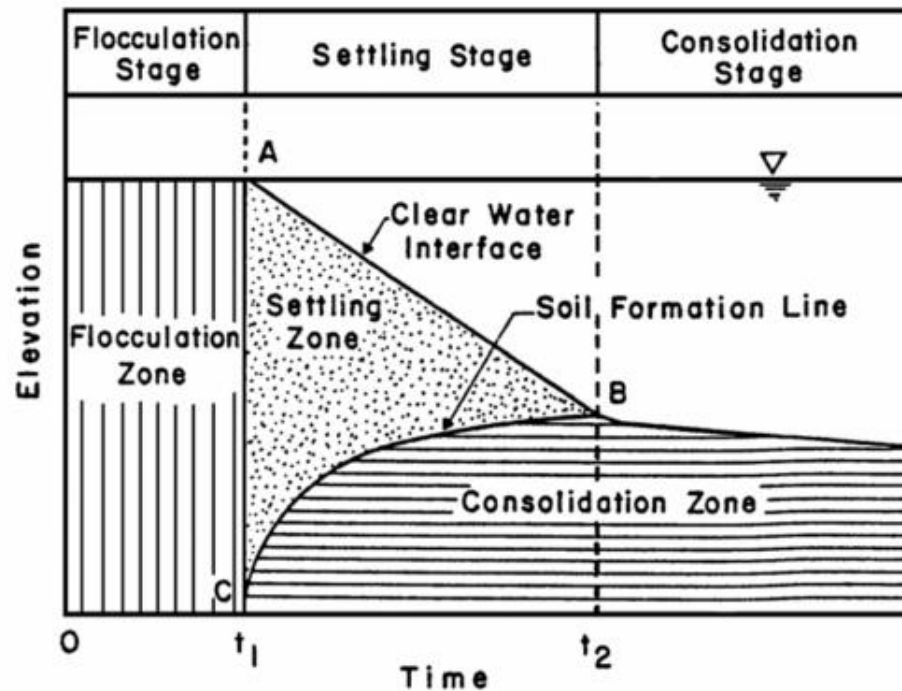
La porzione solida che sedimenta in vasca generalmente assume una struttura molto aperta e occupa un volume significativamente maggiore di quello che occupava in posto

Argille	≠	Sabbie
Grandi variazioni di volume		Piccole variazioni di volume

La progettazione delle vasche di colmata destinate ad accogliere terreni a grana fine richiede lo studio dei processi di **sedimentazione**, dei susseguenti processi di **consolidazione** e, infine, dei **sistemi di consolidamento**

Aspetti fenomenologici – sedimentazione e consolidazione

A seguito dell'immissione in vasca, il terreno sperimenta un processo schematizzabile in tre fasi: flocculazione, sedimentazione e consolidazione per peso proprio



Processo di sedimentazione/consolidazione

Aspetti fenomenologici – prove di sedimentazione

Il fenomeno può essere riprodotto in laboratorio mediante prove di sedimentazione eseguite inserendo una miscela con rapporti volumetrici acqua/terreno coincidenti con quelli della draga

Fase iniziale del processo



Fine sedimentazione



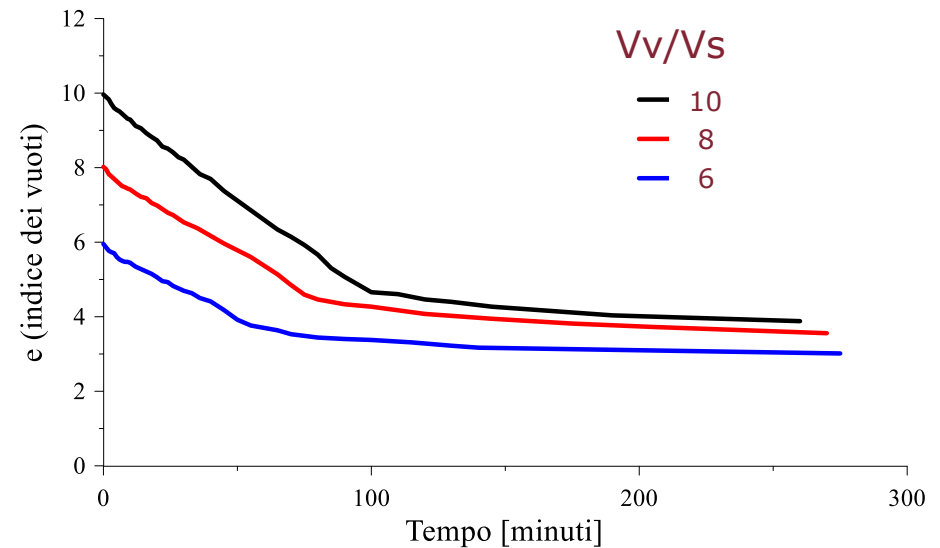
*Prove di sedimentazione: limi-argillosi porto di Gaeta
(acqua di mare – Gaeta)*

Aspetti fenomenologici – prove di sedimentazione

Misurando nel tempo lo spessore dell'acqua chiara (spessore del fango) alla base è possibile ricavare:

- velocità di sedimentazione → dimensionamento idraulico
- evoluzione dell'indice dei vuoti nel tempo

$$e = V_v / V_s$$

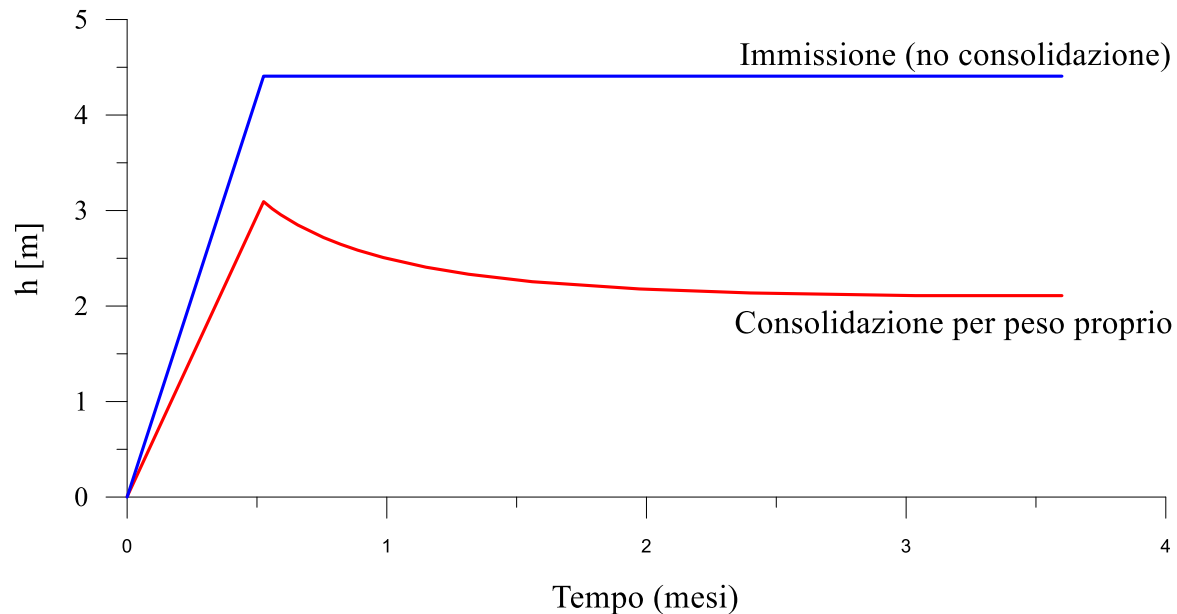


Prove di sedimentazione argilla di Gaeta, 2013

Al termine dei processi di sedimentazione l'indice dei vuoti medio è molto elevato e lo stato tensionale efficace medio è molto basso

Aspetti fenomenologici - consolidazione

Durante la prova di sedimentazione, il processo di consolidazione per peso proprio si esaurisce rapidamente mentre all'interno della vasca di colmata può protrarsi per mesi/anni

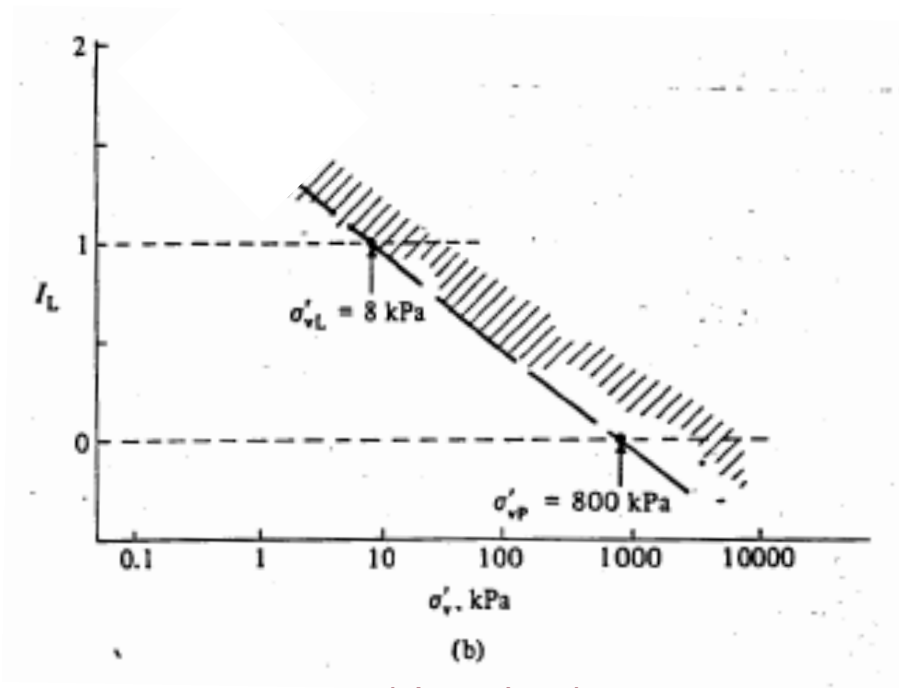


La rilevante variazione di volume evidenzia la necessità di studiare il processo in **grandi deformazioni**

Aspetti fenomenologici - compressibilità

Nei campi tensionali tipici di questi problemi il materiale sperimenta significative variazioni dell'indice dei vuoti alle quali si accompagnano sensibili variazioni delle caratteristiche meccaniche e idrauliche

Nei campi tensionali usuali le leggi di compressibilità sono ben note (logaritmiche)



Wood (1990), adattata

$$I_L = \frac{W_n - W_P}{W_L - W_P}$$

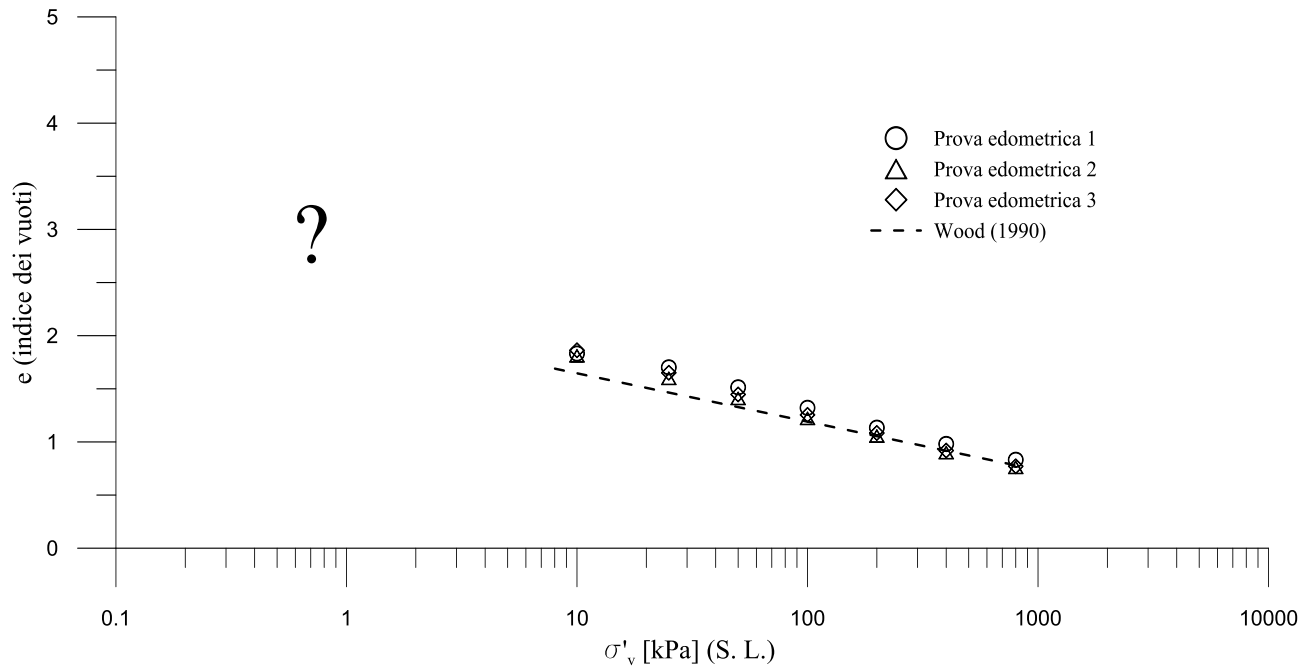
$$e = e_L \rightarrow \sigma'_v = 8 \text{ kPa}$$

$$e = e_P \rightarrow \sigma'_v = 800 \text{ kPa}$$

Aspetti fenomenologici - compressibilità

La Linea di Consolidazione Normale edometrica è facilmente individuabile mediante prove di laboratorio convenzionali (prova edometrica)

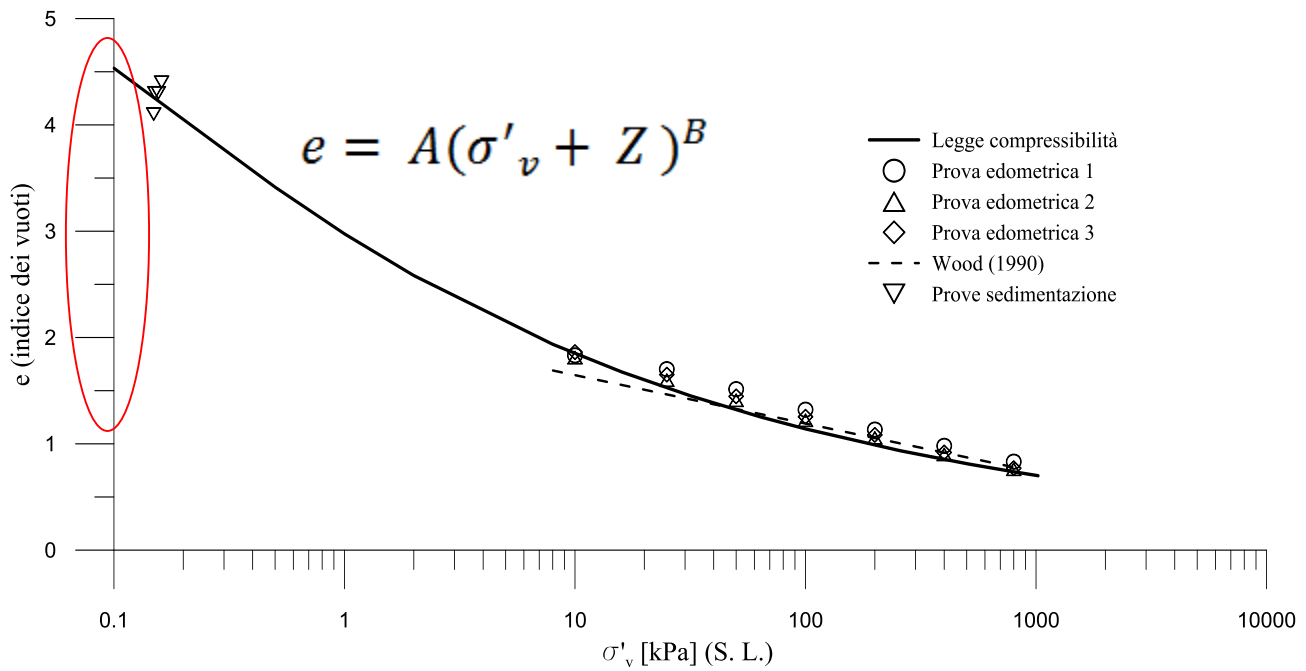
Cosa succede al termine dei processi di sedimentazione, quando lo stato tensionale è ancora significativamente inferiore?



Aspetti fenomenologici - compressibilità

Assegnando un peso di volume *medio* al terreno presente all'interno della colonna di sedimentazione è possibile ricavare una coppia di valori indice dei vuoti - tensione efficace.

In tal modo è possibile calibrare una delle leggi di compressibilità presenti in letteratura



Legge di compressibilità (Liu & Znidarcic, 1991)

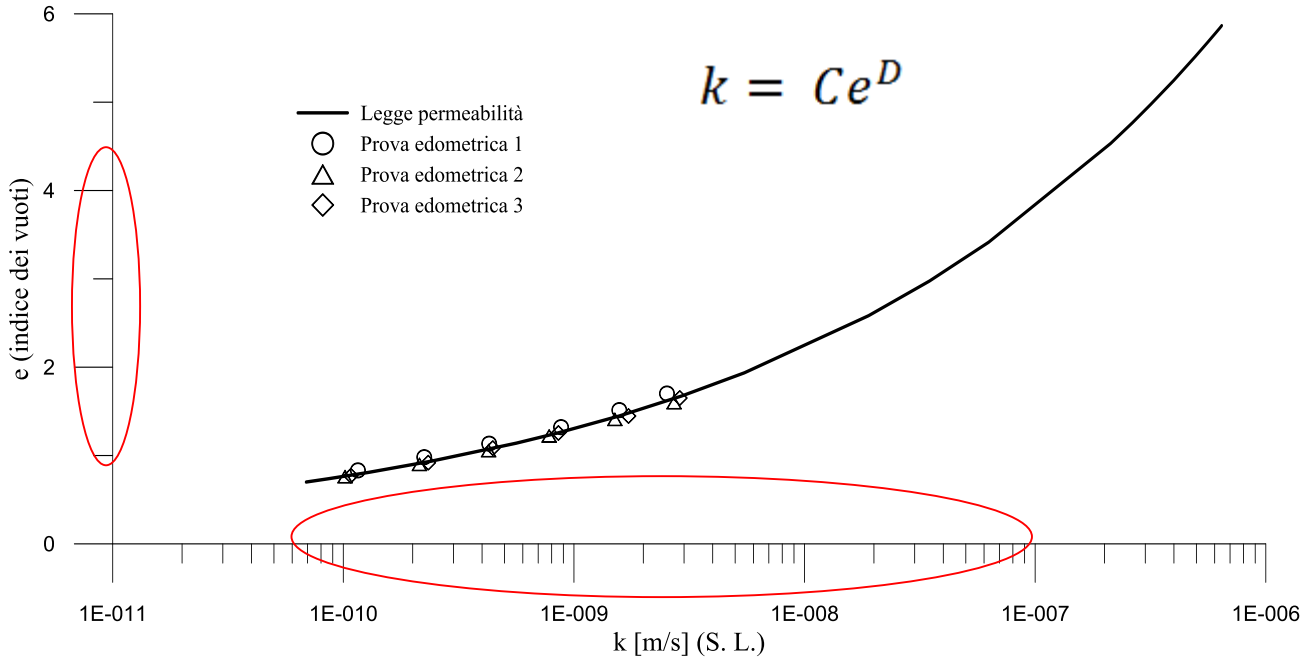


Aspetti fenomenologici - permeabilità

La determinazione della permeabilità ad alti valori dell'indice dei vuoti (bassi stati tensionali) richiede apparecchiature di laboratorio non convenzionali

Tuttavia è possibile utilizzare i risultati delle classiche prove edometriche/permeabilità per calibrare le leggi di permeabilità con dell'indice dei vuoti ($k=Ce^D$)

La variazione di indice dei vuoti sperimentata dal materiale durante il processo di consolidazione fa sì che la permeabilità possa variare di 3 ÷ 4 ordini di grandezza



Relazione indice dei vuoti - permeabilità (Krizek & Somogy, 1984)



Modellazione consolidazione in grandi deformazioni

Le ipotesi alla base della teoria della consolidazione monodimensionale di Terzaghi sono in larga parte disattese

E' quindi necessario utilizzare la teoria della consolidazione monodimensionale delle argille (*Gibson & Hussey, 1967*) che tiene in considerazione la variazione della compressibilità e della permeabilità al variare dell'indice dei vuoti, oltre all'evoluzione geometrica del mezzo (grandi deformazioni)

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

Dove

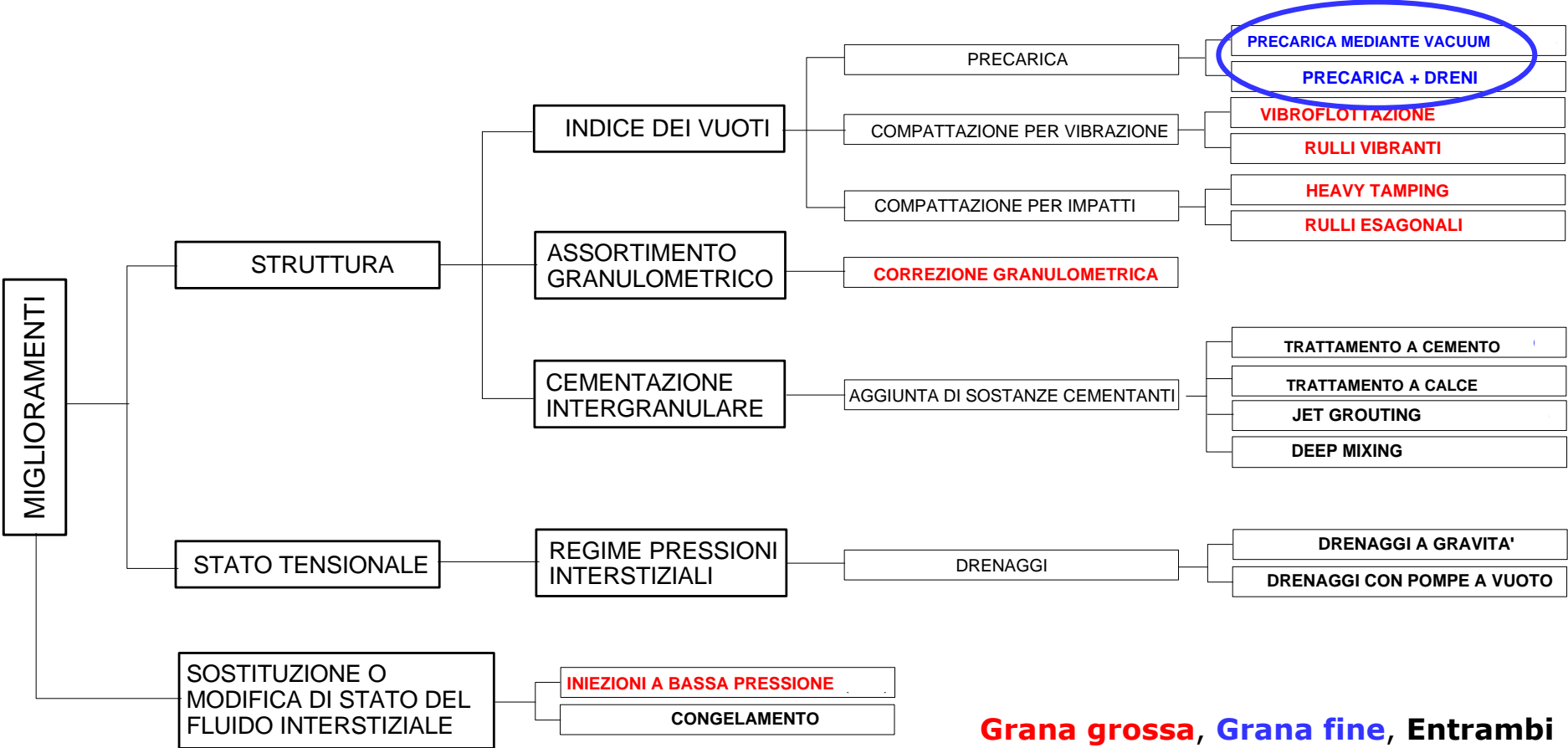
z è la variabile geometrica

k è il coefficiente di permeabilità

$d\sigma'/de$ è la compressibilità

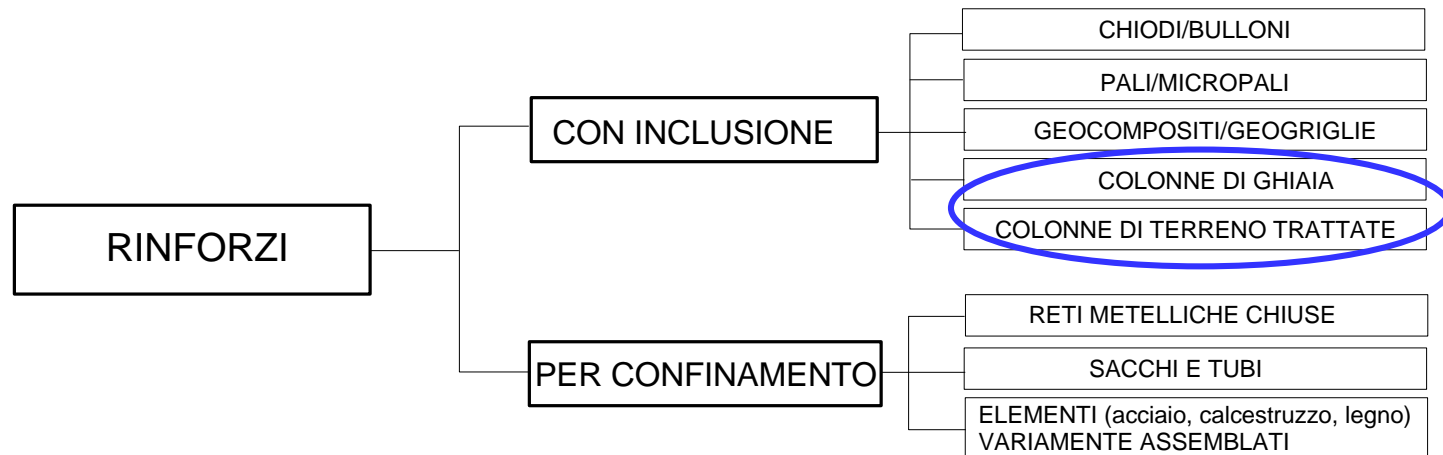
La teoria è implementata nel codice di calcolo alle differenze finite CONDES0 (*Yao & Znidarcic, 1997*)

Trattamenti di miglioramento



Al fine di rendere il materiale di colmata idoneo alla sua destinazione d'uso finale risulta quasi sempre necessario accelerarne la consolidazione e migliorarne le caratteristiche meccaniche. Usualmente si ricorre alla precarica associata all'uso di dreni

Trattamenti di rinforzo



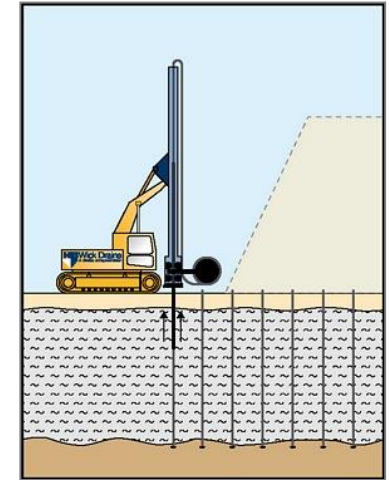
Trattamenti/Consolidamenti – argille

Trattamenti di miglioramento

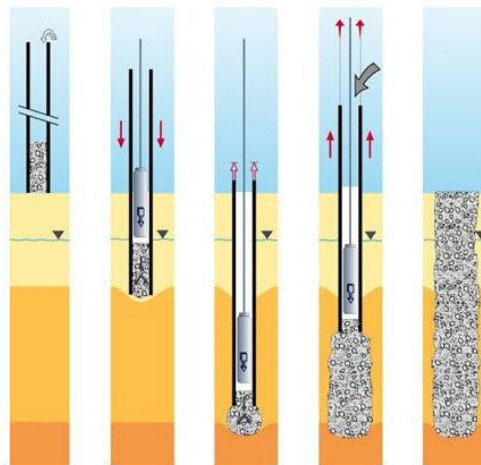
- *Precarica*
- *Vacuum consolidation*

Trattamenti di rinforzo

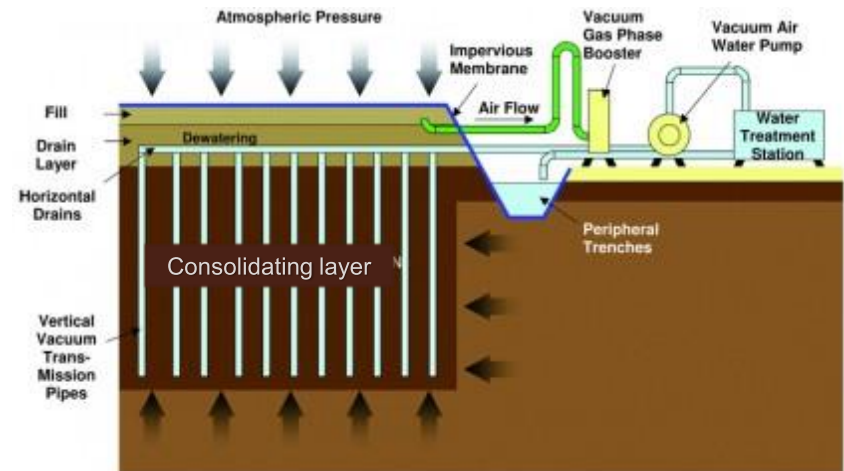
- *Pali in ghiaia*
- *Colonne di terreno trattato*
(*deep mixing/jet grouting*)



Precarica e dreni verticali prefabbricati



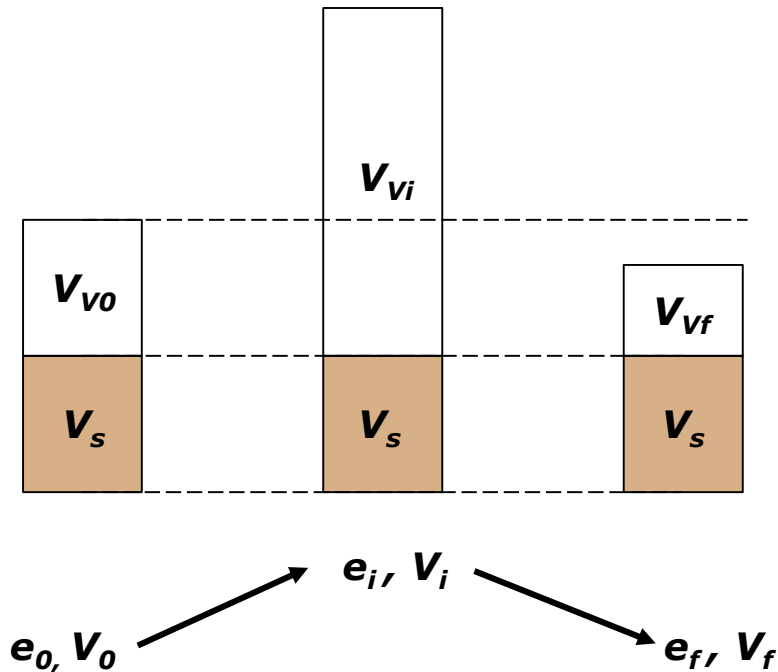
Pali in ghiaia



Vacuum consolidation

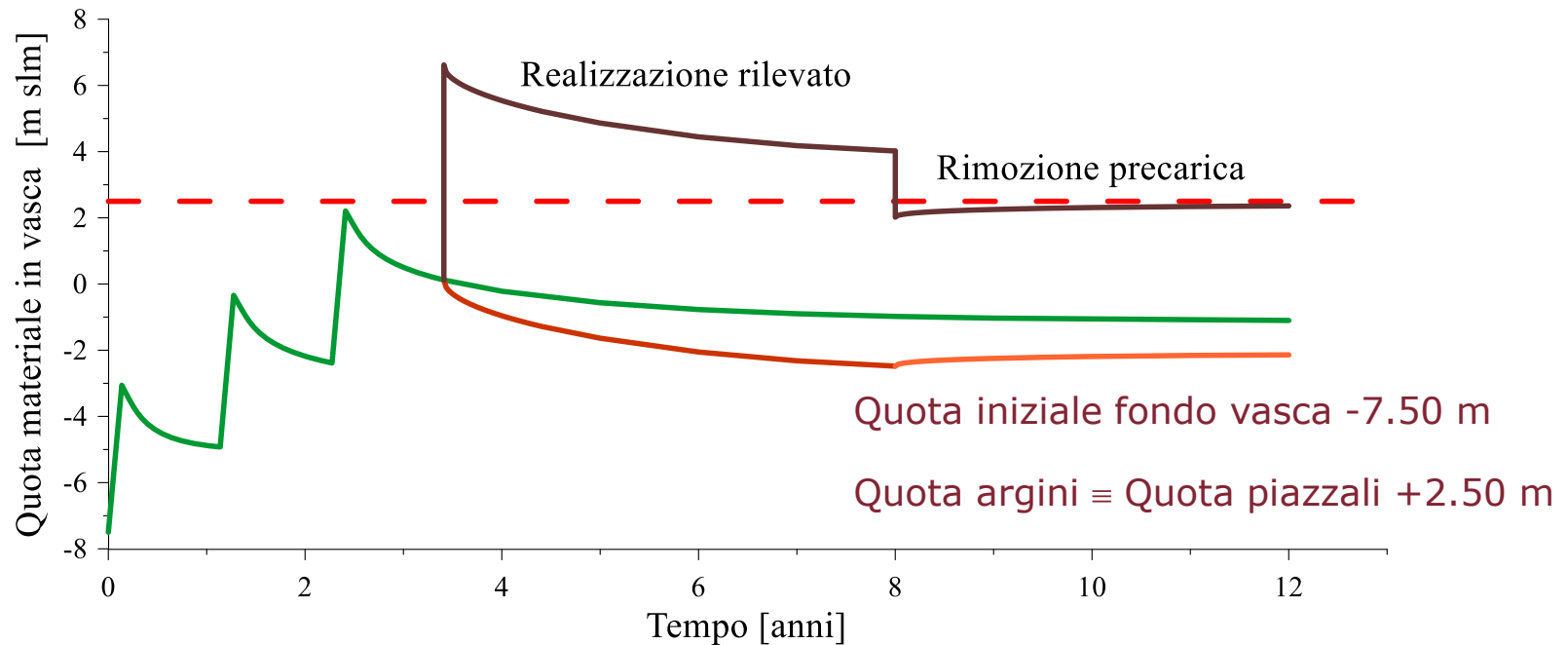
Impiego degli argini si sovralzato nella progettazione delle casse di colmata – sedimenti argillosi

Quando i terreni di dragaggio da conferire in cassa di colmata sono di natura argillosa, il progetto della cassa può trarre grande giovamento dall'impiego dei cosiddetti argini di sovralzato provvisori



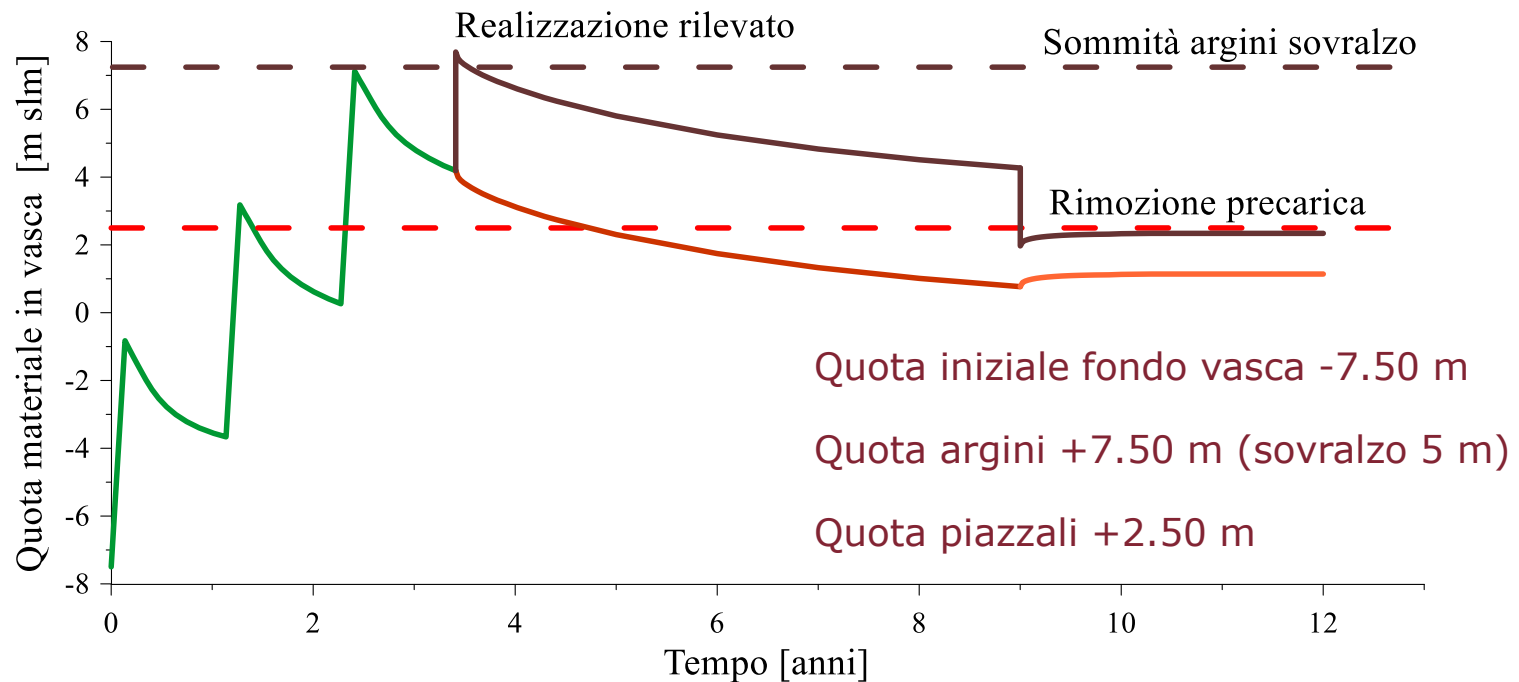
Porto di Dunkirk, France

Esempio di argini a quota di progetto dei piazzali sedimenti argillosi



Alla fine del processo, la vasca è riempita per circa il 50% dell'argilla dragata e per il rimanente 50% di materiali di apporto: **soluzione progettuale poco efficiente**

Esempio di argini rialzati rispetto alla quota di progetto dei piazzali sedimenti argillosi



Considerata una vasca di superficie ridotta del 30% è sufficiente realizzare un rilevato di soli 3.5 m per ottenere l'effetto di precarica desiderato (30 kPa) e raggiungere la quota finale di progetto

La vasca è quasi del tutto riempita con l'argilla dragata (modesti volumi di materiali di apporto)

Considerazioni conclusive

✓ ASPETTI GEOTECNICI DI RILEVANZA PROGETTUALE

- ✓ Stabilità degli argini e impermeabilizzazione della vasca
- ✓ Dimensionamento volumetrico della cassa e consolidamento del materiale dragato

✓ TERRENI A GRANA GROSSA

- ✓ Variazioni di volume contenute
- ✓ Attività sperimentale limitata e prevalentemente in sito
- ✓ Consolidamenti mirati soprattutto all'aumento della densità relativa
- ✓ Progettazione dei trattamenti su base empirica (campi prova e controlli in opera)

✓ TERRENI A GRANA FINE

- ✓ Variazioni di volume rilevanti
- ✓ Attività sperimentale di laboratorio (permeabilità, compressibilità, sedimentazione,...)
- ✓ Modellazione non convenzionale dei processi di consolidazione (grandi deformazioni)
- ✓ Necessario accelerare la consolidazione e conferire consistenza al materiale di dragaggio mediante sistemi di precarica associati all'impiego di dreni verticali
- ✓ Impiego di argini provvisori di sovralzato

CICLO DI SEMINARI SUL MIGLIORAMENTO DEI TERRENI

Cassino, 9-11 Marzo 2016

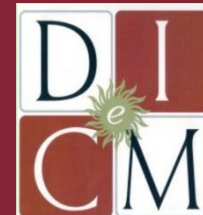
Aspetti geotecnici nella progettazione delle casse di colmata marine

Salvatore Miliziano

MASTER
Progettazione Geotecnica



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA



11 Marzo 2016