

CICLO DI SEMINARI SUL MIGLIORAMENTO DEI TERRENI

Cassino, 9-11 Marzo 2016

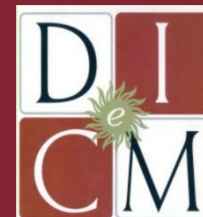
## Illustrazione del progetto della vasca di colmata di Gaeta

*Armando de Lillis*

**MASTER**  
Progettazione Geotecnica



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA



11 Marzo 2016

# Sommario

---

- Introduzione e storia recente del porto commerciale di Gaeta
- Descrizione stato ante operam
- Progetto di ampliamento
- Problematiche geotecniche
- Inquadramento geotecnico
- Soluzione progettuale
- Modellazione
- Piano di monitoraggio

# Introduzione

L'Autorità Portuale di Civitavecchia, Fiumicino e Gaeta ha in corso da anni una serie di interventi volti all'ampliamento del porto commerciale di Gaeta al fine di consolidare il suo ruolo nella rete portuale del Lazio e aumentare il traffico commerciale dell'Italia centro meridionale (PRP 2006; ATF 2012)



Area di studio: Gaeta (LT)

Porto Commerciale  
Molo Salvo D'Acquisto  
SS213 'Flacca', Km 31

# Fotostoria della vasca di colmata - 2003



Illustrazione del progetto della vasca di colmata di Gaeta



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA



# Fotostoria della vasca di colmata - 2005



Illustrazione del progetto della vasca di colmata di Gaeta



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

# Fotostoria della vasca di colmata - 2009



Illustrazione del progetto della vasca di colmata di Gaeta



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA



# Fotostoria della vasca di colmata - 2011



Illustrazione del progetto della vasca di colmata di Gaeta



**SAPIENZA**  
UNIVERSITÀ DI ROMA

# Fotostoria della vasca di colmata - 2013



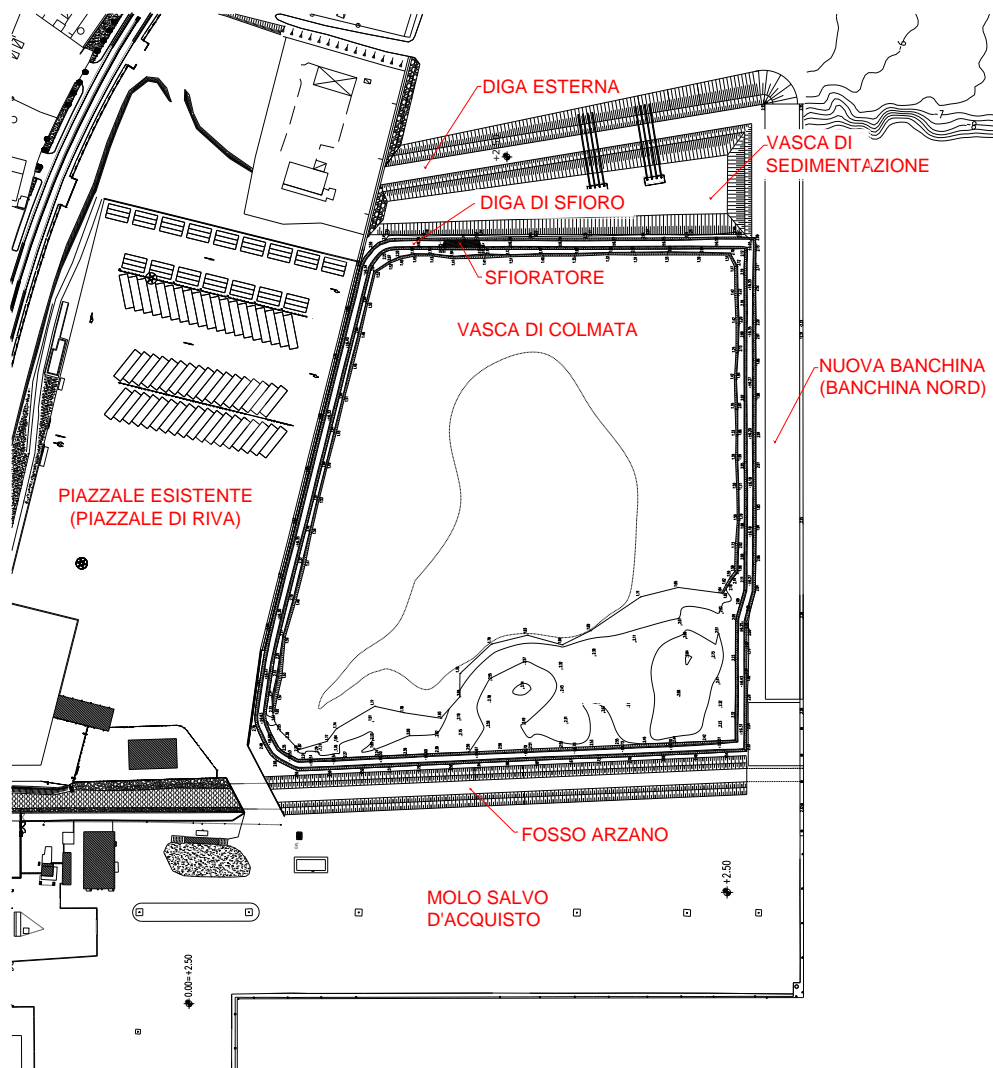
Illustrazione del progetto della vasca di colmata di Gaeta



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA



# Stato ante operam



## Vasca di colmata

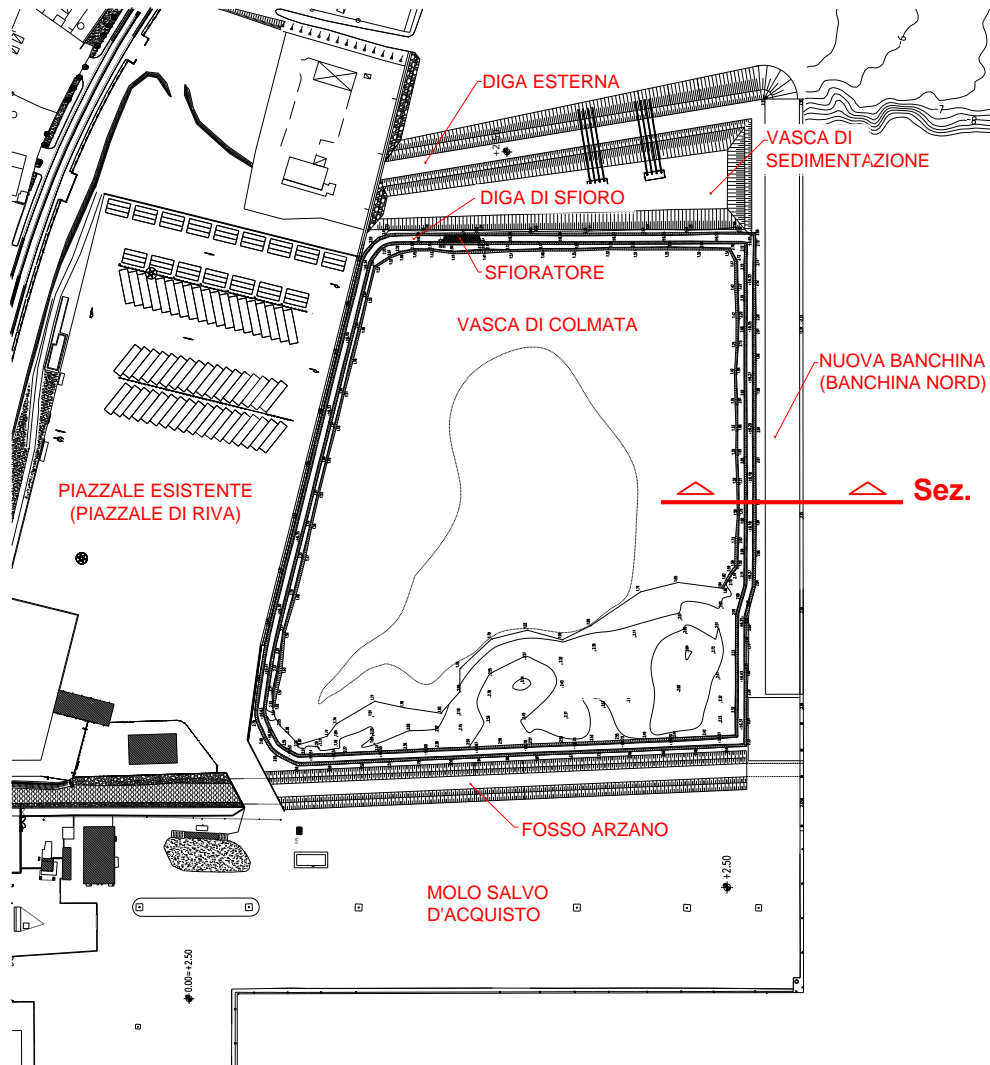
- Estensione superficiale: **60 000 m<sup>2</sup>**
- Volume nominale: **300 000 m<sup>3</sup>**
- Non impermeabilizzata sul fondo

## Doppio sistema di sfioro

- Vasca di colmata → Vasca secondaria  
Sfioratore: **+5.70 m slm**

- Vasca secondaria → Mare  
Pozzi metallici connessi a tubazioni che attraversano la diga esterna

# Stato ante operam



## Vasca di colmata

- Estensione superficiale: **60 000 m<sup>2</sup>**
- Volume nominale: **300 000 m<sup>3</sup>**
- Non impermeabilizzata sul fondo

## Doppio sistema di sfioro

- Vasca di colmata → Vasca secondaria
- Sfiatore: **+5.70 m slm**
- Vasca secondaria → Mare
- Pozzi metallici connessi a tubazioni che attraversano la diga esterna

# Stato ante operam

## Argini perimetrali – Sezione lato banchina nord

- Quota sommitale pari a **+6.50 m slm**
- Realizzati in tout venant rinforzato da geogriglie
- Paramenti interni impermeabilizzati mediante guaina in PVC

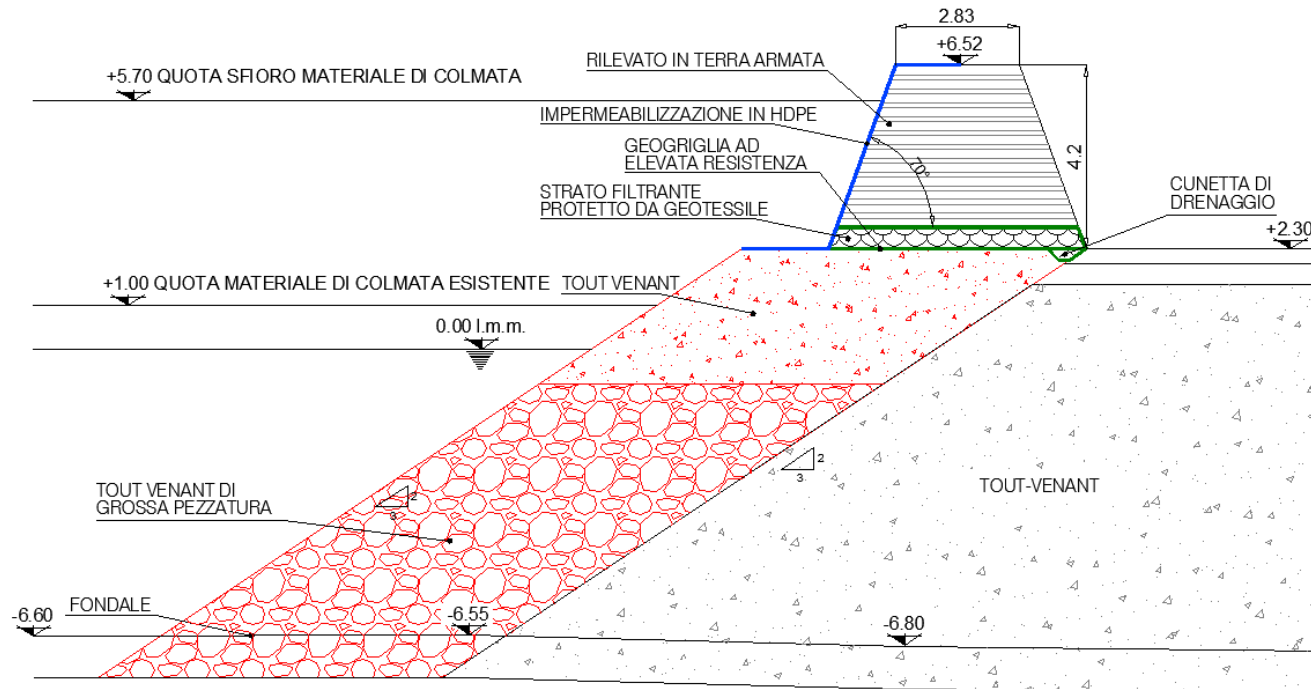


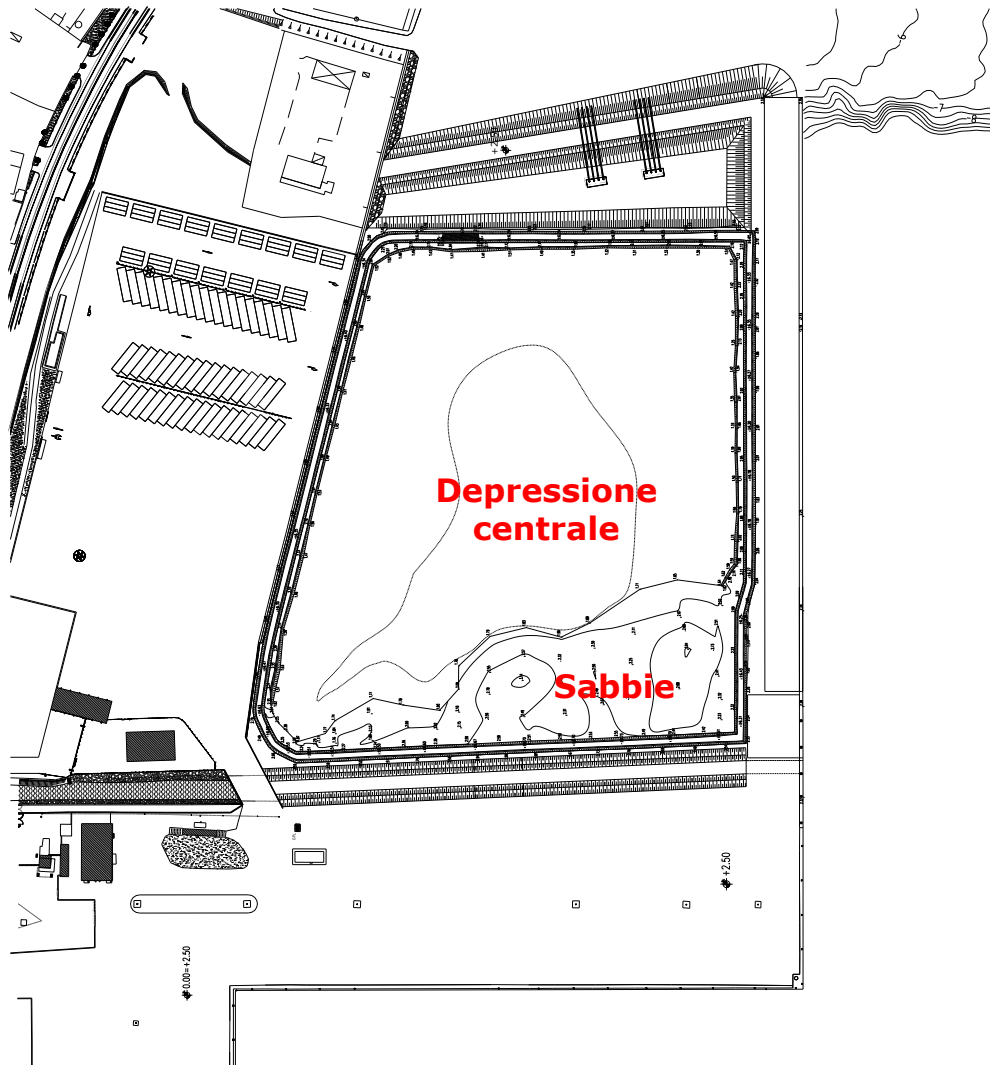
Illustrazione del progetto della vasca di colmata di Gaeta



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA



# Stato ante operam



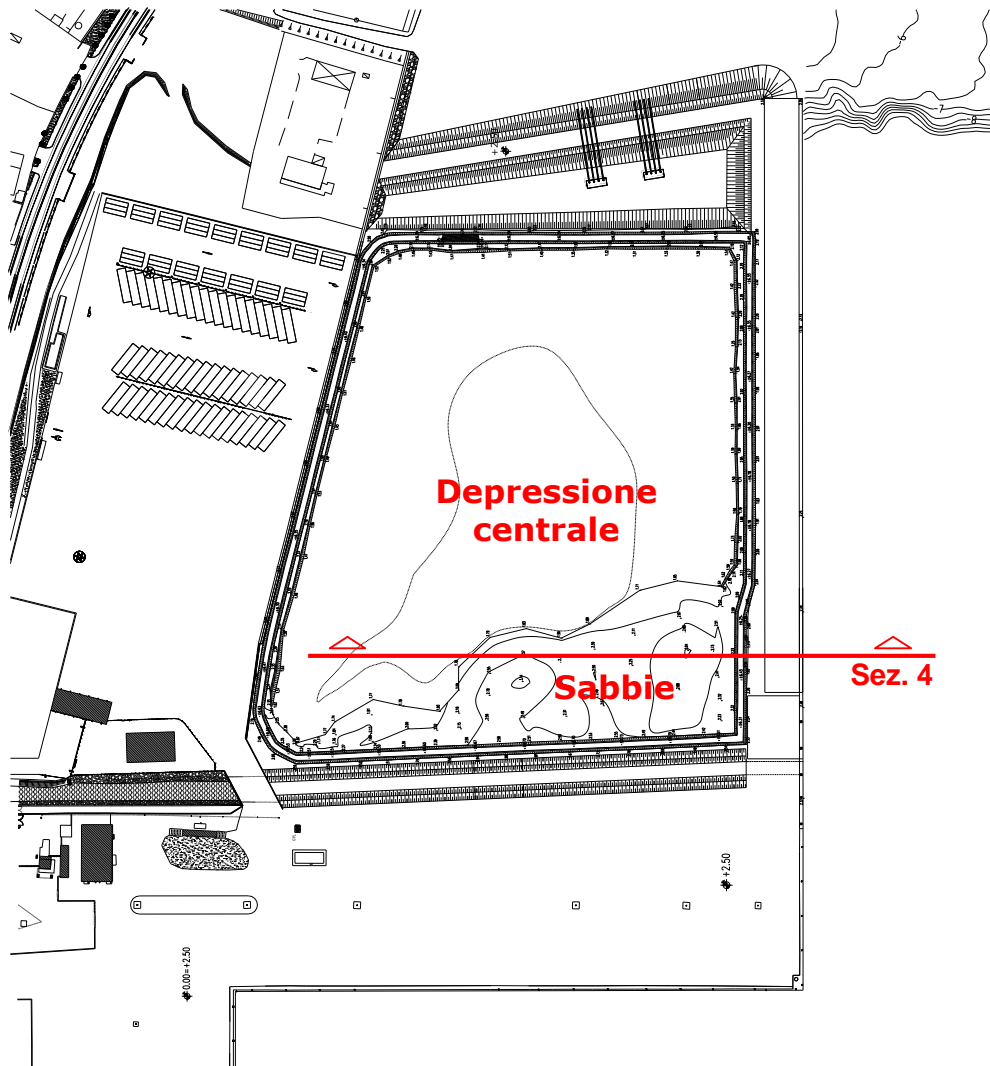
## Terreni di colmata

- Materiale limo-argilloso di **scarsa consistenza** proveniente dai dragaggi già eseguiti con draga di tipo aspirante-refluente **in fase di consolidazione** sotto il peso proprio
- Quota media di circa **+1 m**
- Spessore variabile tra 4 e 5 m
- Depressione nella zona centrale
- Accumulo di terreni sabbiosi nella zona sud (quota max  $\approx +3$  m)

## Vasca secondaria

- Materiale a grana fine ( $\approx 30\ 000\ m^3$ )

# Stato ante operam



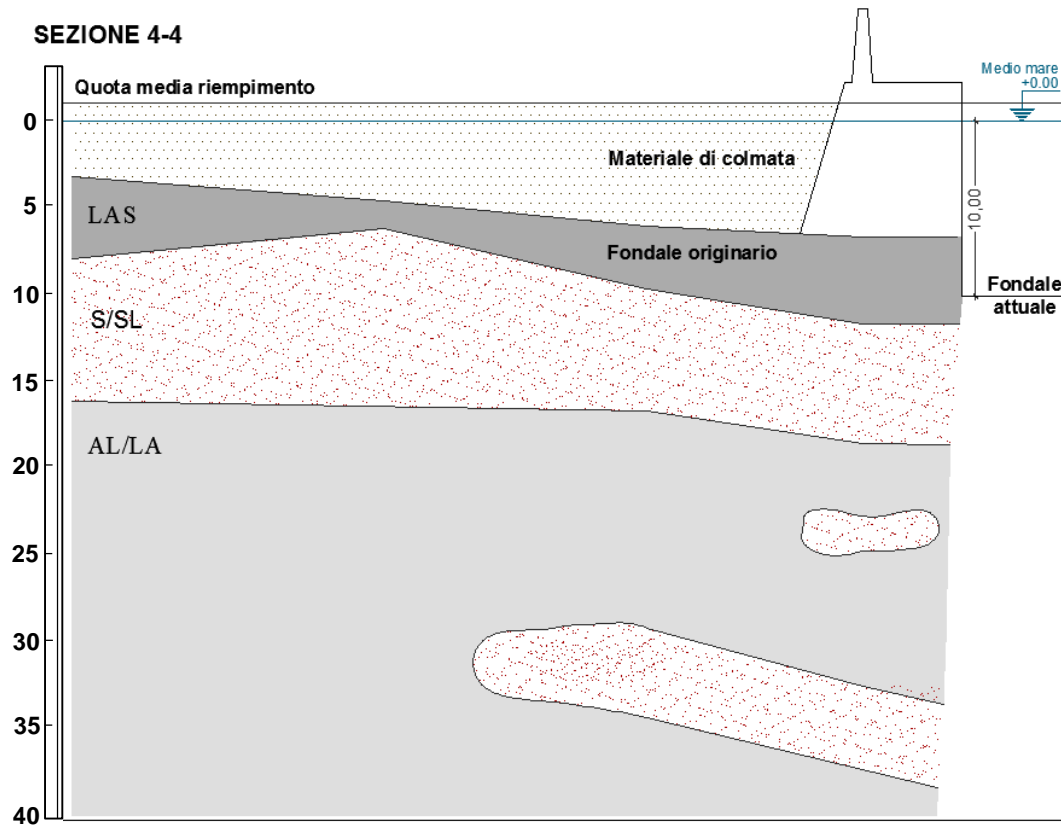
## Terreni di colmata

- Materiale limo-argilloso di **scarsa consistenza** proveniente dai dragaggi già eseguiti con draga di tipo aspirante-refluente **in fase di consolidazione** sotto il peso proprio
- Quota media di circa **+1 m**
- Spessore variabile tra 4 e 5 m
- Depressione nella zona centrale
- Accumulo di terreni sabbiosi nella zona sud (quota max  $\approx +3$  m)

## Vasca secondaria

- Materiale a grana fine ( $\approx 30\ 000\ m^3$ )

# Stato ante operam

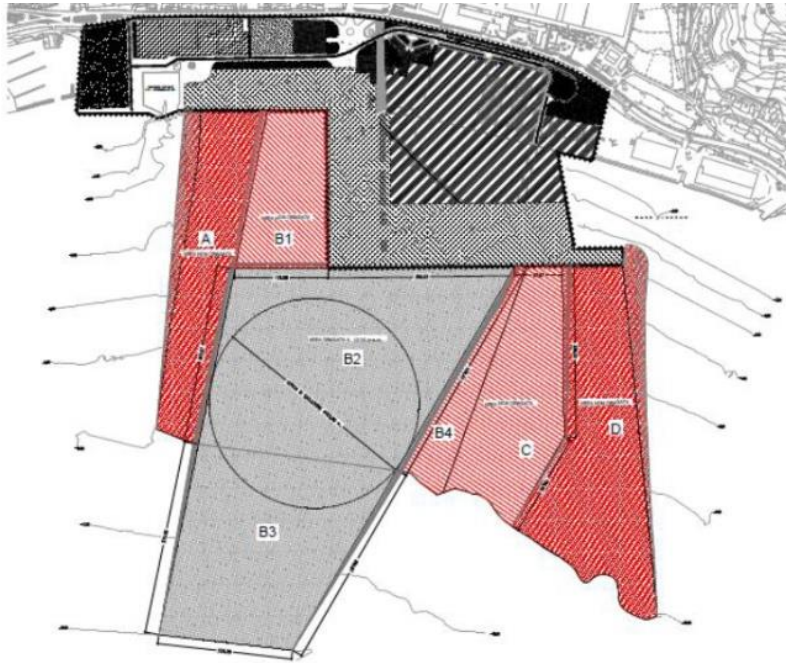


## Terreni di fondazione

Alternanze di limi argillosi superficialmente normalmente consolidati e, pertanto, alquanto compressibili e di terreni più francamente sabbiosi



# Progetto di ampliamento del porto



## Interventi in progetto

- Interventi area portuale
  - **Completamento escavo**

Garantire operatività di circa 350 m di banchina per imbarcazioni che richiedono fondale a -12 m

Volume complessivo da dragare: **366 000 m<sup>3</sup>**

Dragaggio con aspirante refluyente:  $V_w/V_s = 8 \div 12$

# Progetto di ampliamento del porto



## Interventi in progetto

- Interventi area portuale
  - Completamento escavo
  - **Consolidamento vasca di colmata**
  - **Realizzazione piazzali operativi**
  - **Ponte di scavalco del Fosso Arzano**

Vasca di colmata destinata a piazzali operativi alla quota di circa **+2.30 m**

Completamento piazzali operativi: impianti fognari, elettrici, di illuminazione, di adduzione idrica e antincendio (vasche di accumulo)

Realizzazione ponte di collegamento Molo - Piazzali

# Progetto di ampliamento del porto



## Interventi in progetto

- Interventi area portuale
  - Completamento escavo
  - **Consolidamento vasca di colmata**
  - **Realizzazione piazzali operativi**
  - **Ponte di scavalco del Fosso Arzano**

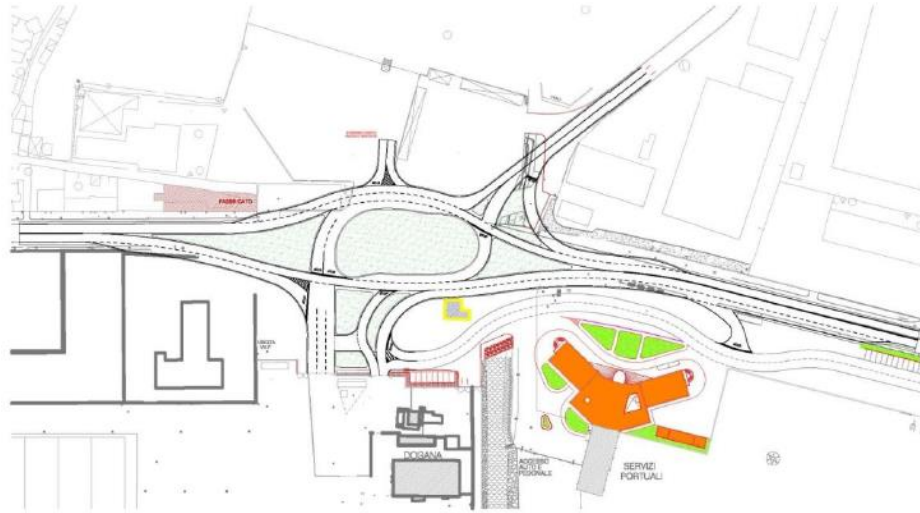
Vasca di colmata destinata a piazzali operativi alla quota di circa **+2.30 m**

Completamento piazzali operativi: impianti fognari, elettrici, di illuminazione, di adduzione idrica e antincendio (vasche di accumulo)

Realizzazione ponte di collegamento Molo - Piazzali



# Progetto di ampliamento del porto



## Interventi in progetto

- Interventi area portuale
  - Completamento escavo
  - Consolidamento vasca di colmata
  - Realizzazione piazzali operativi
  - Ponte di scavalco del Fosso Arzano
- **Adeguamento viabilità in ingresso**

## Soluzione a raso

L'efficacia funzionale è stata verificata per mezzo di un modello di microsimulazione, ossia mediante l'analisi di dettaglio delle singole manovre veicolari e degli effetti prodotti su tutte le correnti di traffico.

# Principali problematiche geotecniche

---

1. Prioritario garantire operatività banchine con fondale **-12 m**

# Principali problematiche geotecniche

---

1. Prioritario garantire operatività banchine con fondale -12 m

➤ Necessità di completare il dragaggio in tempi rapidi

- Volume di escavo (**366 000 m<sup>3</sup>**) maggiore del volume nominale della vasca (**300 000 m<sup>3</sup>**)
- Terreno sperimenta un significativo aumento di volume durante il processo di dragaggio ( $e_{vasca} \approx 3 * e_{mare}$ )

# Principali problematiche geotecniche

---

## 1. Prioritario garantire operatività banchine con fondale -12 m

### ➤ Necessità di completare il dragaggio in tempi rapidi

- Volume di escavo ( $366\ 000\ \text{m}^3$ ) maggiore del volume nominale della vasca ( $300\ 000\ \text{m}^3$ )
- Terreno sperimenta un significativo aumento di volume durante il processo di dragaggio ( $e_{vasca} \approx 3 * e_{mare}$ )

## 2. Quota finale dei piazzali a livello banchine ( $\approx +2.30\ \text{m}$ )

- Quota ante operam del materiale all'interno della vasca ( $\approx +1\ \text{m}$ )



# Principali problematiche geotecniche

---

1. Prioritario garantire operatività banchine con fondale -12 m
  - Necessità di completare il dragaggio in tempi rapidi
    - Volume di escavo ( $366\ 000\ m^3$ ) maggiore del volume nominale della vasca ( $300\ 000\ m^3$ )
    - Terreno sperimenta un significativo aumento di volume durante il processo di dragaggio ( $e_{vasca} \approx 3 * e_{mare}$ )
2. Quota finale dei piazzali a livello banchine ( $\approx +2.30\ m$ )
  - Quota ante operam del materiale all'interno della vasca ( $\approx +1\ m$ )
3. Conferire al sistema la **rigidezza** necessaria per sostenere carichi di 30 kPa senza esibire cedimenti differenziali e assoluti incompatibili con funzionalità dell'opera



*Distribuzione granulometrica superficiale all'interno del Golfo di Gaeta (modificato da Brondi et al. 1984)*

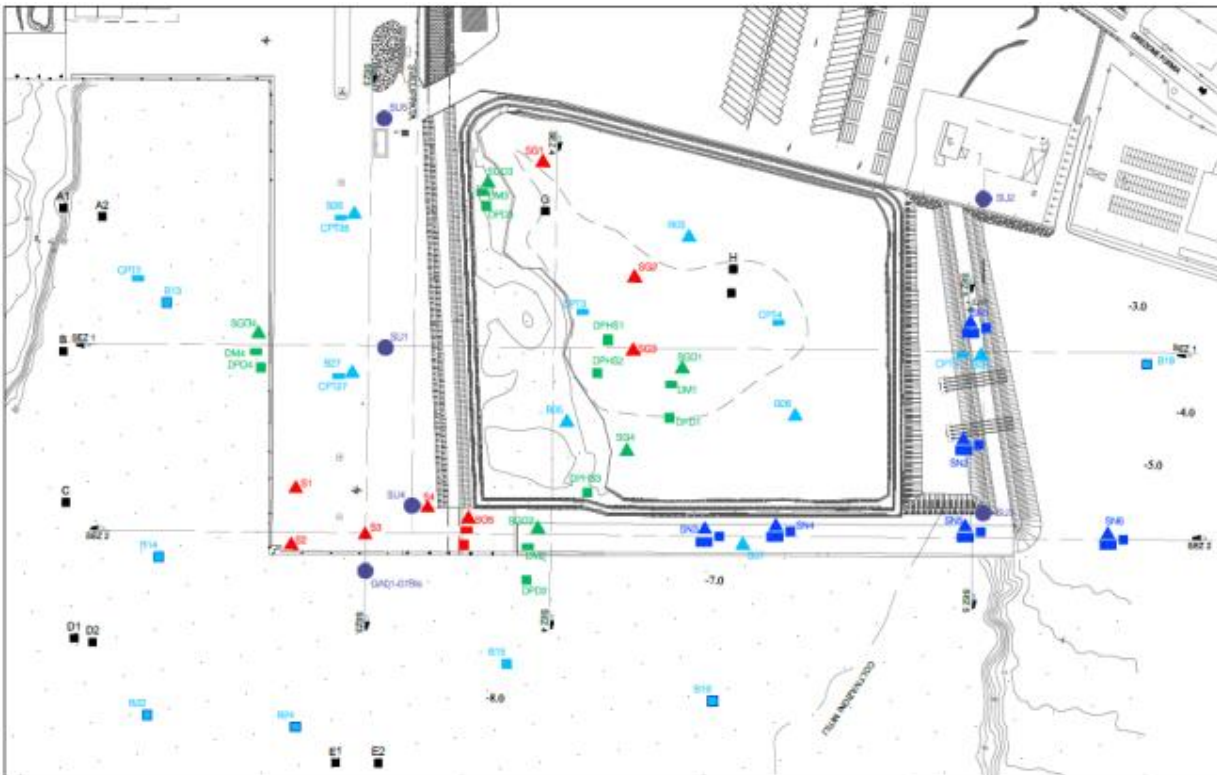
## ➤ Effetto baia

Sedimenti presenti nell'area in esame:

- Sabbie e sabbie limose
- Limi argillosi / Argille limose debolmente sabbiose
- Torba associata alla locale deposizione fluvio – lacustre

# Inquadramento geotecnico

## Quadro delle indagini pregresse



### CAMPAGNE GEOGNOSTICHE ANTECEDENTI AL 2004

- Prove penetrometriche d'nalamiche pesanti
- ▲ Sondaggi geognostici
- Prove con dilatometro piatto

### CAMPAGNA GEOGNOSTICA INVERNO - PRIMAVERA 2004

- Prove penetrometriche d'nalamiche pesanti
- ▲ Sondaggi geognostici
- Prove con dilatometro piatto

### CAMPAGNA GEOGNOSTICA PRIMAVERA - ESTATE 2006

- Prove penetrometriche d'nalamiche pesanti
- ▲ Sondaggi geognostici
- Prove con dilatometro piatto
- Sondaggi con Infissione da parte di sommozzatore

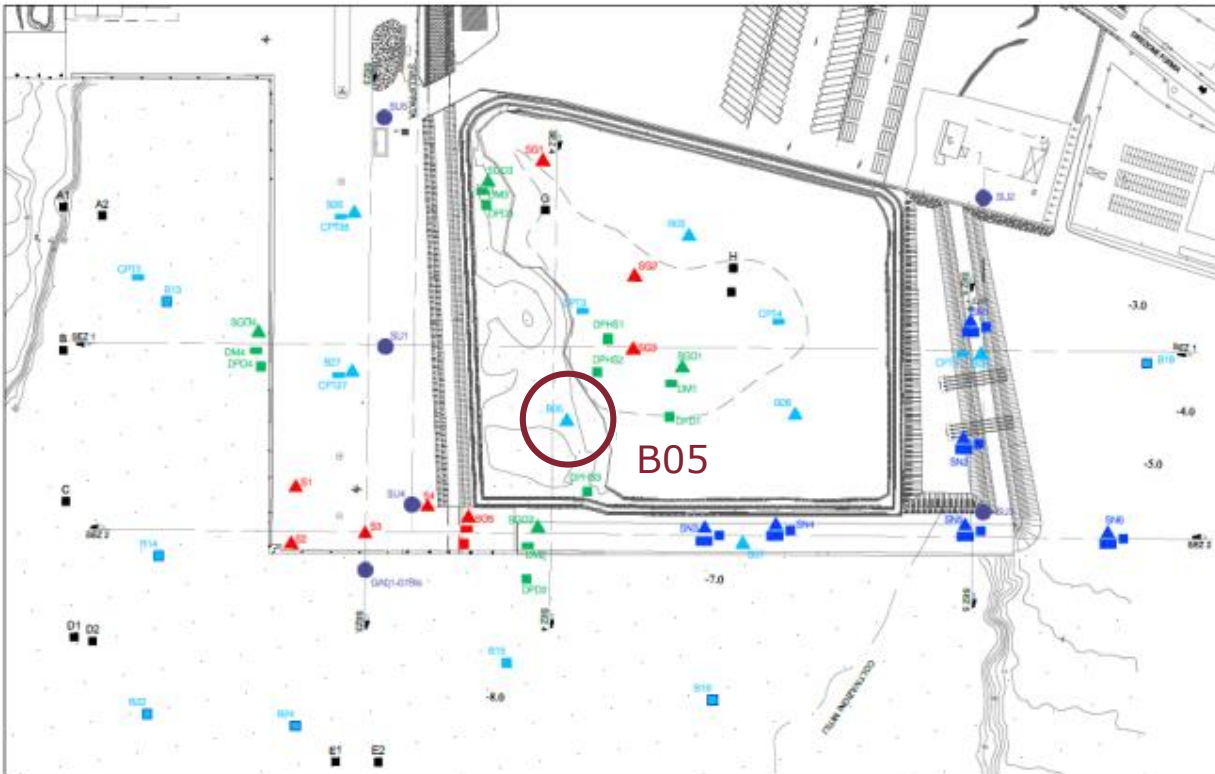
### CAMPAGNA GEOGNOSTICA C.M.C.

- Sondaggi geognostici superficiali
- ▲ Sondaggi geognostici
- Prove penetrometriche CPT

- Prove di identificazione e classificazione
- Prove edometriche
- Prove di taglio diretto e Tx-UU

# Inquadramento geotecnico

## Quadro delle indagini pregresse



### CAMPAGNE GEOGNOSTICHE ANTECEDENTI AL 2004

- Prove penetrometriche d'nalamiche pesanti
- ▲ Sondaggi geognostici
- Prove con dilatometro piatto

### CAMPAGNA GEOGNOSTICA INVERNO - PRIMAVERA 2004

- Prove penetrometriche d'nalamiche pesanti
- ▲ Sondaggi geognostici
- Prove con dilatometro piatto

### CAMPAGNA GEOGNOSTICA PRIMAVERA - ESTATE 2006

- Prove penetrometriche d'nalamiche pesanti
- ▲ Sondaggi geognostici
- Prove con dilatometro piatto
- Sondaggi con Infissione da parte di sommozzatore

### CAMPAGNA GEOGNOSTICA C.M.C.

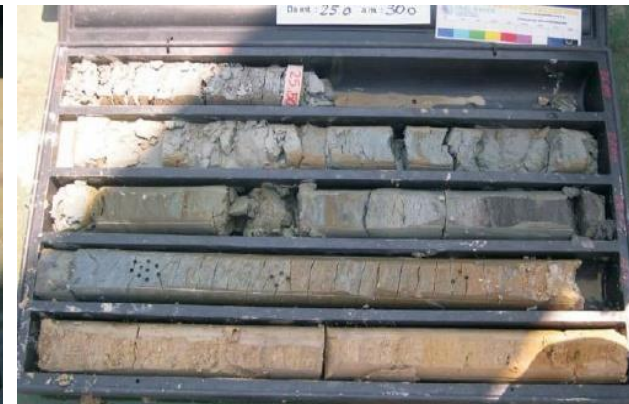
- Sondaggi geognostici superficiali
- ▲ Sondaggi geognostici
- Prove penetrometriche CPT

- Prove di identificazione e classificazione
- Prove edometriche
- Prove di taglio diretto e Tx-UU



# Inquadramento geotecnico

## Quadro delle indagini pregresse



*Cassette catalogatrici sondaggio B05*

# Inquadramento geotecnico

---

## Indagini integrative

- Materiale di escavo
- Materiale all'interno della vasca
- Terreni di fondazione

# Inquadramento geotecnico

## Indagini integrative

- **Materiale di escavo**
- Materiale all'interno della vasca
- Terreni di fondazione



## Caratterizzazione ambientale (ISPR)

34 carote (1-2 m), **124 campioni**

- Determinazione caratteristiche chimiche, microbiologiche ed ecotossicologiche

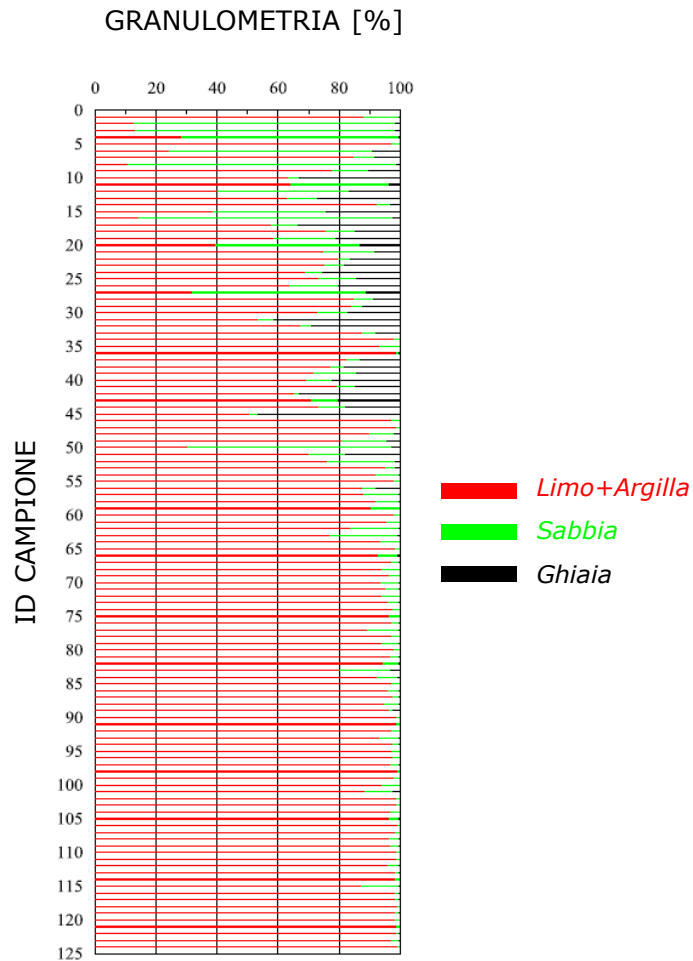
## Caratterizzazione geotecnica

**8 carote superficiali**

- Prove di identificazione e classificazione
- Prove di sedimentazione
- Prove edometriche

# Inquadramento geotecnico

## Indagini integrative



- **Materiale di escavo**
- Materiale all'interno della vasca
- Terreni di fondazione

## Caratterizzazione ambientale (ISPRA)

34 carote (1-2 m), **124 campioni**

- Determinazione caratteristiche chimiche, microbiologiche ed ecotossicologiche

## Caratterizzazione geotecnica

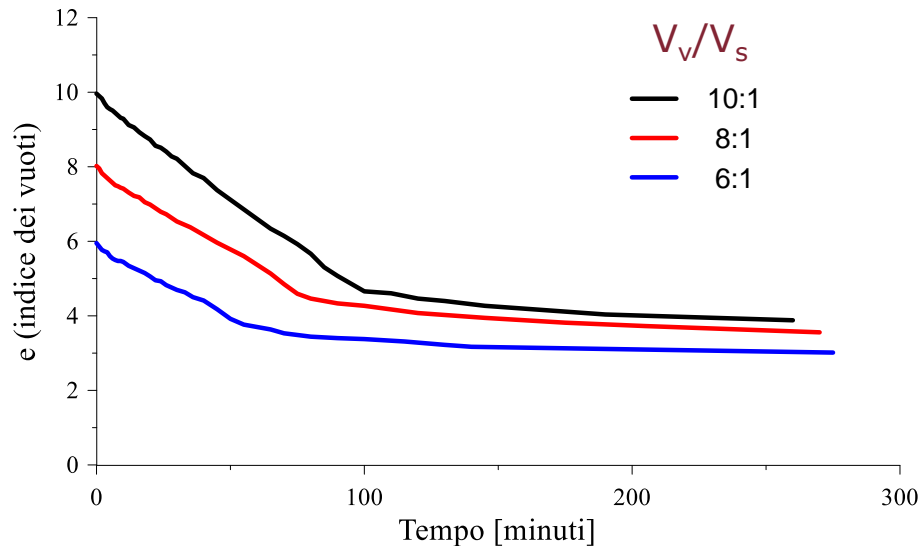
**8 carote superficiali**

- Prove di identificazione e classificazione
- Prove di sedimentazione
- Prove edometriche



# Inquadramento geotecnico

## Indagini integrative



- **Materiale di escavo**
- Materiale all'interno della vasca
- Terreni di fondazione

## Caratterizzazione ambientale (ISPRA)

34 carote (1-2 m), **124 campioni**

- Determinazione caratteristiche chimiche, microbiologiche ed ecotossicologiche

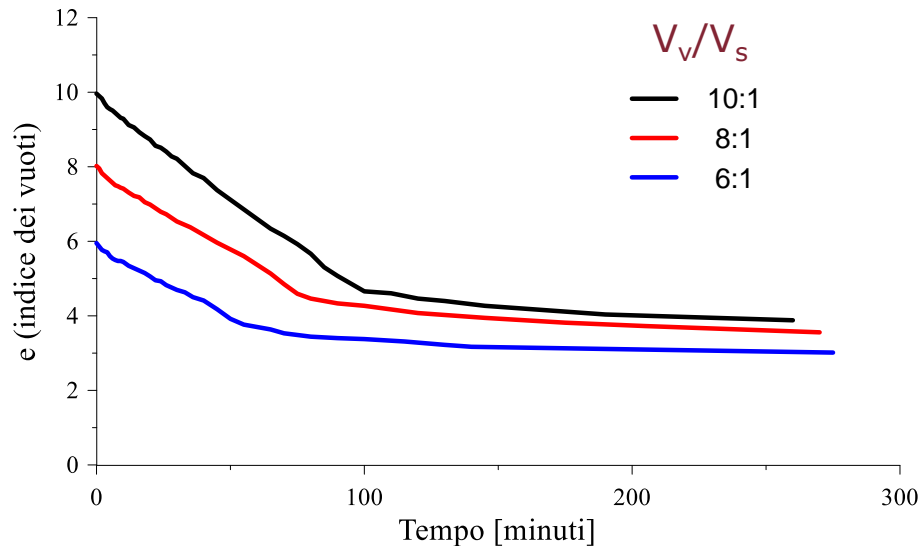
## Caratterizzazione geotecnica

**8 carote superficiali**

- Prove di identificazione e classificazione
- Prove di sedimentazione
- Prove edometriche

# Inquadramento geotecnico

## Indagini integrative



$\gamma$ ( $\text{Kn/m}^3$ )	$e$ (-)	$C_c$ (-)
16	1.5-2	0.4-0.5

- **Materiale di escavo**
- Materiale all'interno della vasca
- Terreni di fondazione

## Caratterizzazione ambientale (ISPRA)

34 carote (1-2 m), **124 campioni**

- Determinazione caratteristiche chimiche, microbiologiche ed ecotossicologiche

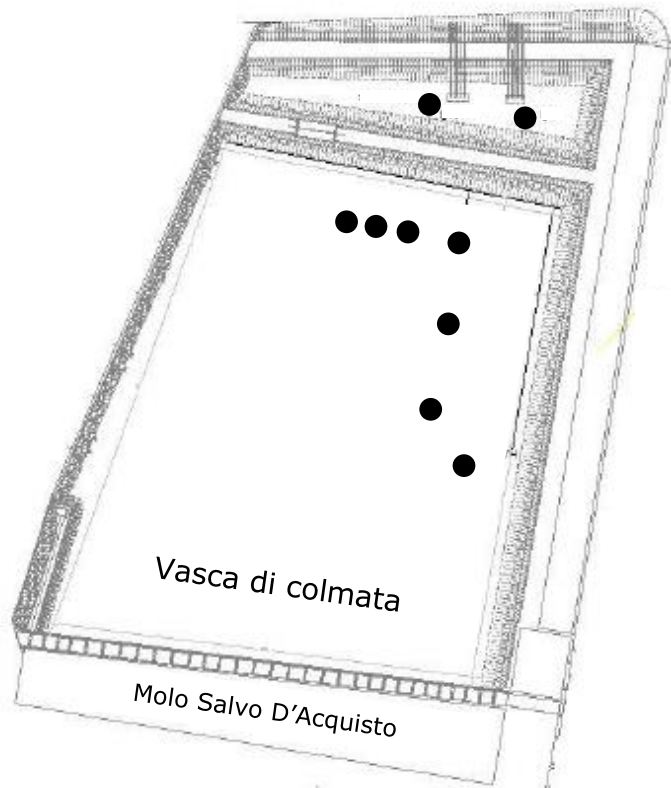
## Caratterizzazione geotecnica

**8 carote superficiali**

- Prove di identificazione e classificazione
- Prove di sedimentazione
- Prove edometriche

## Indagini integrative

- Materiale di escavo
- **Materiale all'interno della vasca**
- Terreni di fondazione



## 10 campioni superficiali disturbati

Prove di identificazione e classificazione

- Caratteristiche dei materiali e distribuzione all'interno della vasca

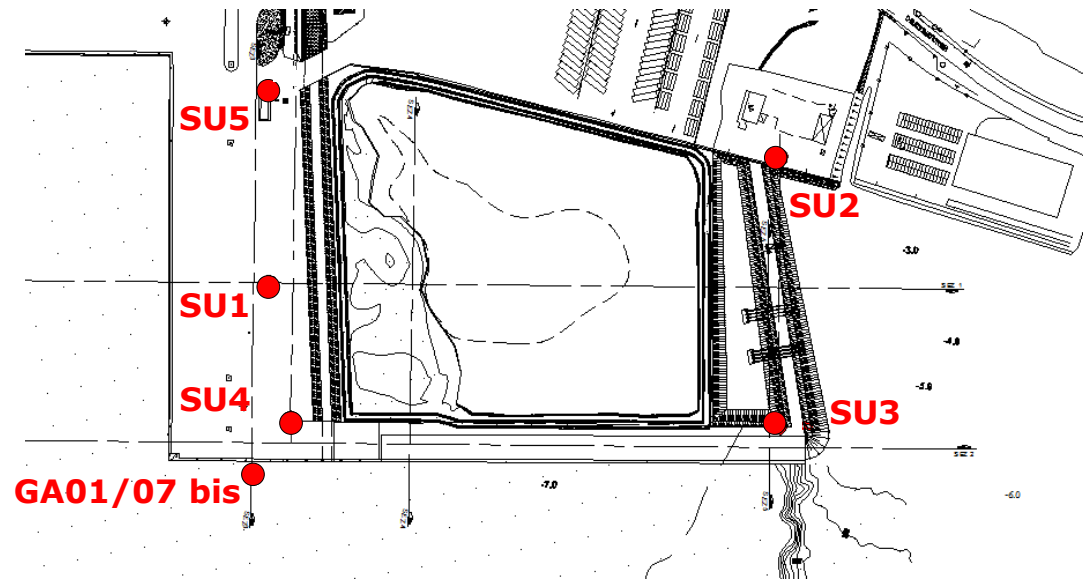
Prove di sedimentazione

- Velocità di sedimentazione
- Indice dei vuoti al termine del processo

# Inquadramento geotecnico

## Indagini integrative

- Materiale di escavo
- Materiale all'interno della vasca
- **Terreni di fondazione**



## 4 Sondaggi profondi (max 80 m)

- Prove penetrometriche statiche
- Prelievo di campioni indisturbati
- Prove di identificazione e classificazione
- Prove edometriche

1 Sondaggio in corrispondenza delle fondazioni del ponte di scavalco del Fosso Arzano

1 Sondaggio in corrispondenza della testata del molo Salvo D'Acquisto



# Modello geotecnico

## Quadro stratigrafico complesso

Strati di terreno di spessore variabile, spesso non continui e di forma lenticolare  
Successione stratigrafica eterogenea

Litotipo	LAS	AL/LA	S/SL
$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	15	17-18	19
$c'$ [kPa]	0	10	-
$\phi'$ [°]	24-25	25	35-45
$E'$ [MPa]	-	-	35-40
$c_c$ [-]	0.3-0.5	0.3	-
$c_s$ [-]	0.05-0.08	0.06	-

### ➤ LAS (limo argilloso sabbioso)

Terreni **normalmente consolidati** per storia geologica e di **scarsa consistenza**

### ➤ AL/LA (argilla limosa / limo argilloso)

Terreni a grana fine **sovraconsolidati** con grado di sovraconsolidazione decrescente con la profondità e presentano **buone caratteristiche meccaniche**

### ➤ S/SL (sabbia / sabbia limosa)

Terreni addensati di **buona resistenza e rigidità**

# Modello geotecnico

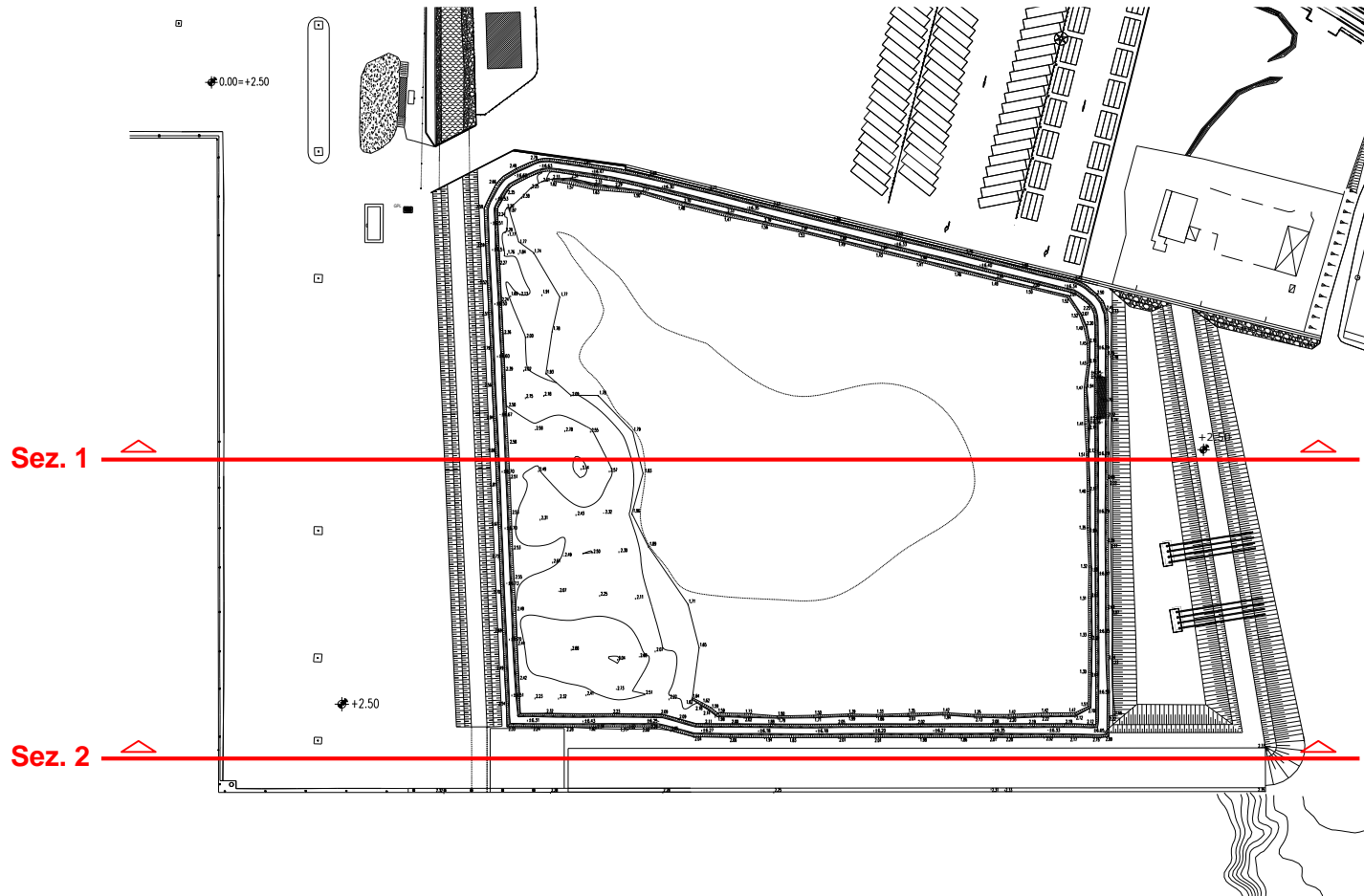
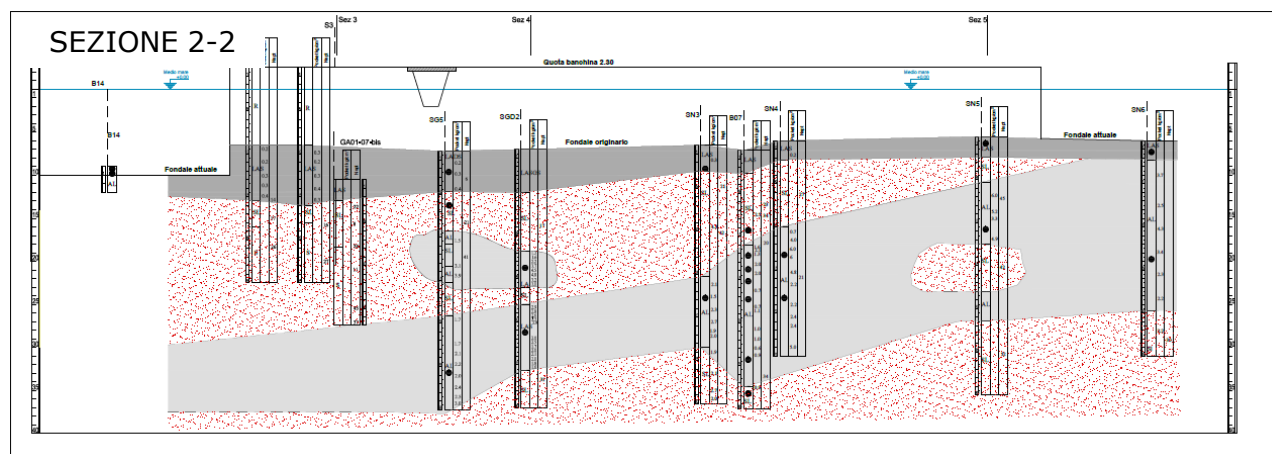
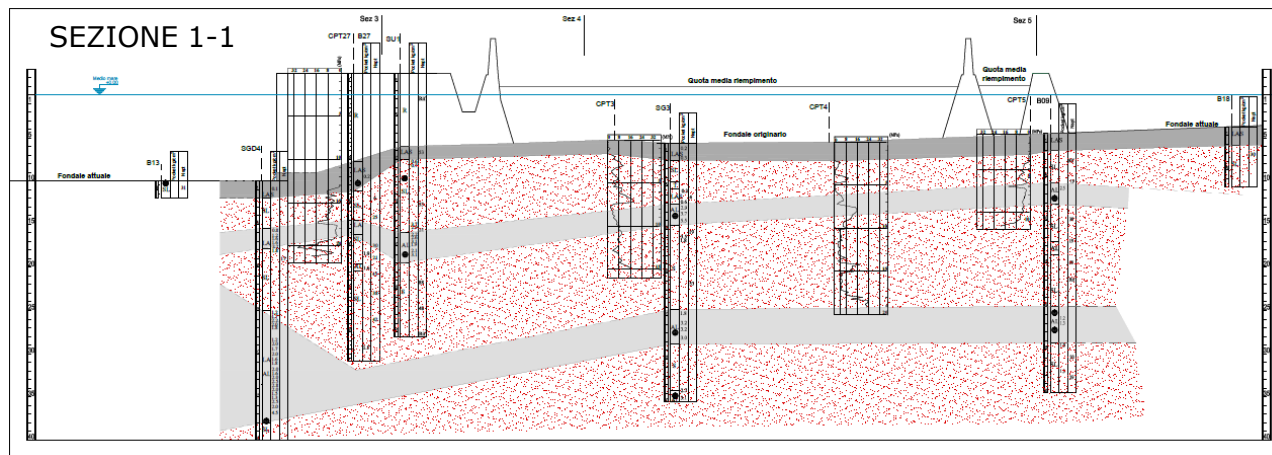


Illustrazione del progetto della vasca di colmata di Gaeta

# Modello geotecnico



Riporto (R)	
Limo argilloso sabbioso (LAS)	
Sabbia/Sabbia limosa (S/SL)	
Argilla limosa/Limo argilloso (AL/LA)	
Calcare/Ghiaia calcarea (CAL/G)	

# Soluzione progettuale

---

1. Prioritario garantire operatività banchine con fondale -12 m
  - Necessità di completare il dragaggio in tempi rapidi
    - Volume di escavo (**366 000 m<sup>3</sup>**) maggiore del volume della vasca (**300 000 m<sup>3</sup>**)
    - Aumento di volume durante il processo di dragaggio ( $e_{vasca} \approx 3 * e_{mare}$ )
2. Quota finale dei piazzali a livello banchine ( $\approx +2.30 m$ )
  - Quota ante operam del materiale all'interno della vasca  $\approx +1 m$
3. Conferire al sistema la **rigidezza** necessaria per sostenere carichi di 30 kPa senza esibire cedimenti differenziali e assoluti incompatibili con funzionalità dell'opera

# Soluzione progettuale

---

1. Prioritario garantire operatività banchine con fondale -12 m
  - Necessità di completare il dragaggio in tempi rapidi
    - Volume di escavo ( $366\ 000\ m^3$ ) maggiore del volume della vasca ( $300\ 000\ m^3$ )
    - Aumento di volume durante il processo di dragaggio ( $e_{vasca} \approx 3 * e_{mare}$ )
2. Quota finale dei piazzali a livello banchine ( $\approx +2.30\ m$ )
  - Quota ante operam del materiale all'interno della vasca  $\approx +1\ m$
3. Conferire al sistema la rigidità necessaria per sostenere carichi di 30 kPa senza esibire cedimenti differenziali e assoluti incompatibili con funzionalità dell'opera



- Accelerare processi di consolidazione → sistemi drenanti
- Incrementare stato tensionale efficace → vacuum e precarica

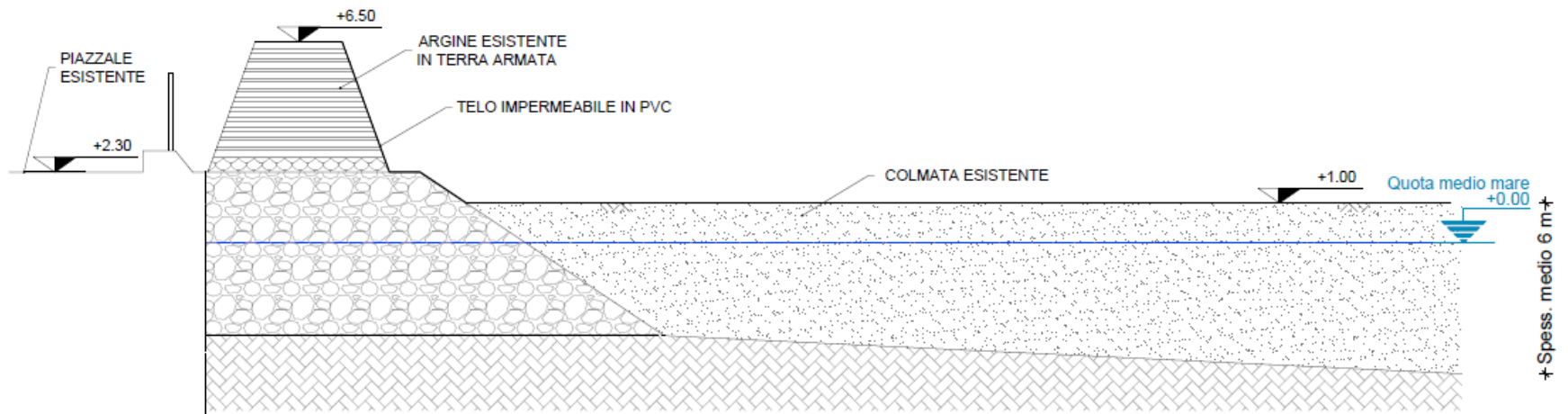
## **Aumentare la capacità ricettiva della vasca**



## FASE 0 - Stato ante operam

Il materiale dragato, versato all'interno della vasca di colmata, raggiunge una quota media di +1.00 m sul medio mare.

La vasca di sedimentazione è completamente riempita di terreni prevalentemente argillosi. Gli argini sono impermeabilizzati sul lato interno con un telo in PVC.



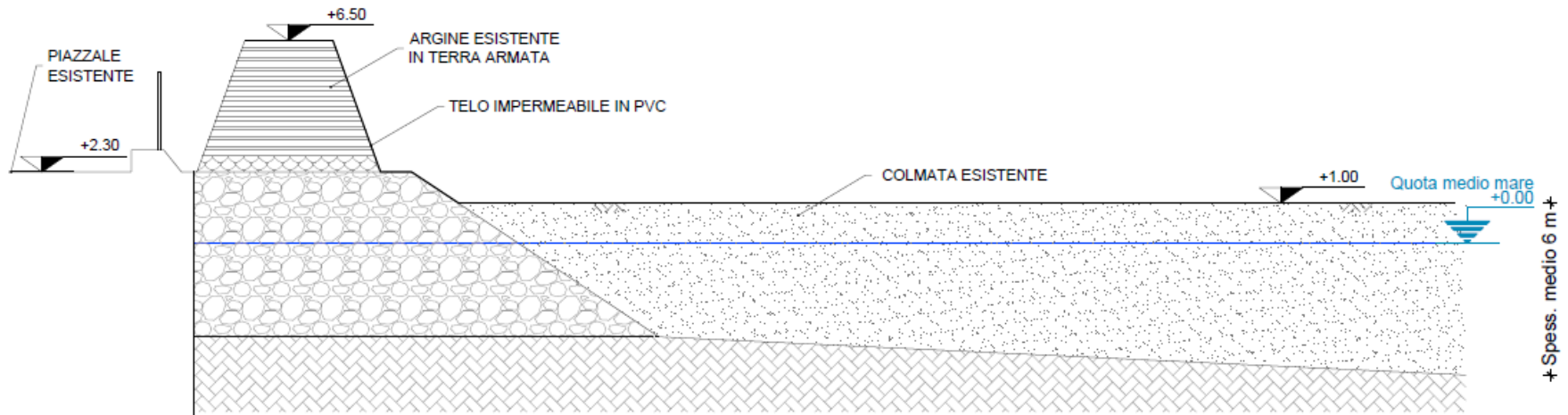
## FASE 1 - Attività preliminari

Parziale sostituzione della guaina in PVC con geotessile con funzione di filtro, in corrispondenza dell'argine lato fosso Arzano e dell'argine lato vasca di sedimentazione ( vedi planimetria attività preliminari) , a partire da quota +3.50 m.

Verifica dello stato della guaina lasciata in opera ed eventuale risarcitura.

Svuotamento vasca di sedimentazione mediante sistemi aspiranti e refluinto nella zona depressa della vasca principale ( circa 30.000 mc) .

Refluinto in vasca di sedimentazione di circa 30.000 mc di sabbia, aspirati dalla vasca principale.



## Planimetria: attività preliminari

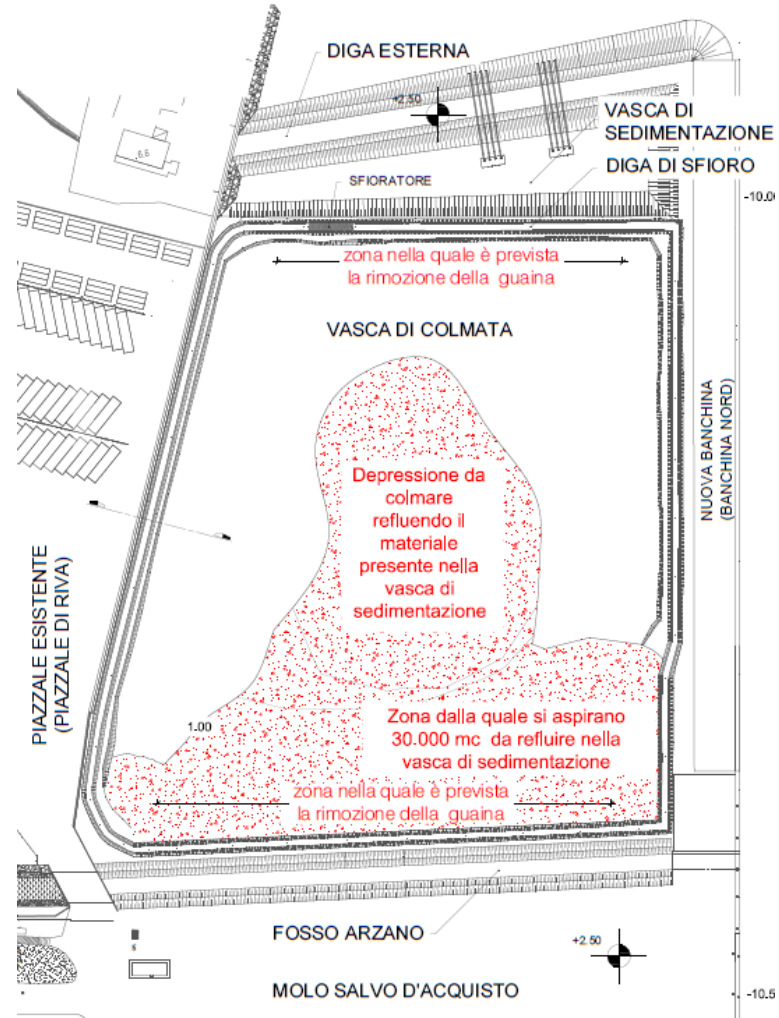


Illustrazione del progetto della vasca di colmata di Gaeta

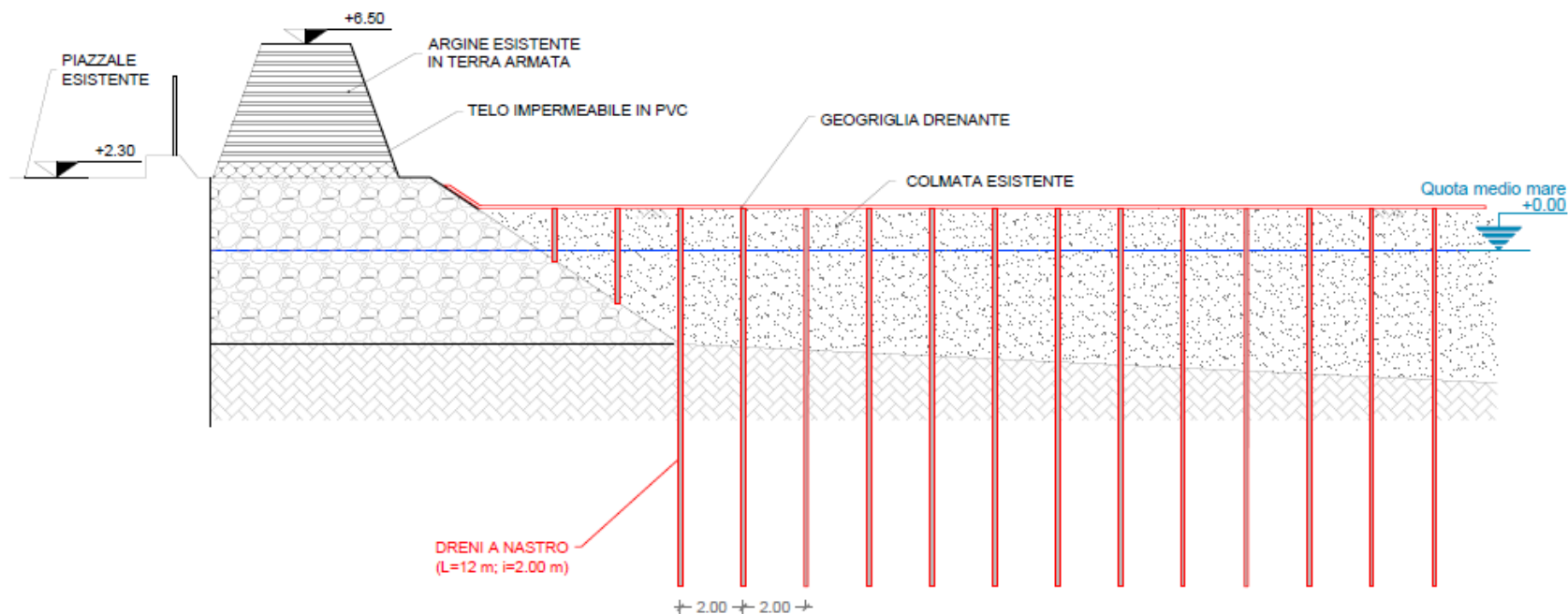


## FASE 2 - Installazione dreni verticali e posa in opera geogriglia drenante

Installazione geodreni a nastro mediante l'impiego di mezzi anfibi \ pontone.

I dreni sono disposti secondo una maglia a quinconce ad interasse di 2.0 m ed hanno lunghezza pari a 12 m, in maniera da interessare sia la colmata esistente ( per uno spessore medio di 6 m) sia i primi metri di terreno di fondazione di natura argillosa.

Posa in opera geogriglia drenante compartimentata risvoltata sugli argini perimetrali sino a quota +2.00 m.





## FASE 2 - Installazione dreni verticali e posa in opera geogriglia drenante

Installazione geodreni a nastro mediante l'impiego di mezzi anfibi \ pontone.

I dreni sono disposti secondo una maglia a quinconce ad interasse di 2.0 m ed hanno lunghezza pari a 12 m, in maniera da interessare sia la colmata esistente ( per uno spessore medio di 6 m) sia i primi metri di terreno di fondazione di natura argillosa.

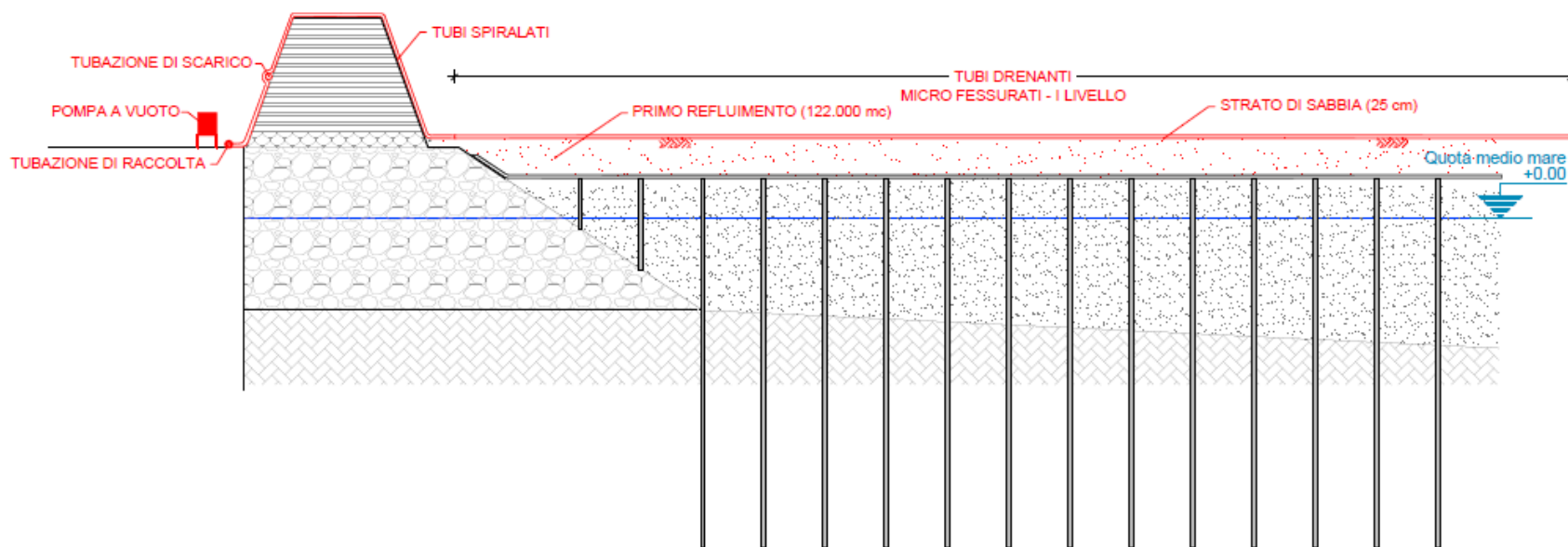
Posa in opera geogriglia drenante compartmentata risvoltata sugli argini perimetrali sino a quota +2.00 m.





## FASE 3 - Primo refluito in vasca e successiva messa in opera del I livello di tubi drenanti

Inizio delle operazioni di dragaggio, refluito di un terzo del materiale da dragare ( 122.000 mc) all'interno della vasca di colmata con le modalità definite dal Progetto (elaborato PR1) e realizzazione di uno strato drenante mediante la posa in opera del primo livello di tubi drenanti microfessurati. Prima della posa in opera dei tubi verrà pompata parte della sabbia già ricollocata in vasca di sedimentazione, per formare uno strato di circa 25 cm di spessore medio, quanto più uniforme possibile .



# Fasi esecutive

## Modalità di immissione

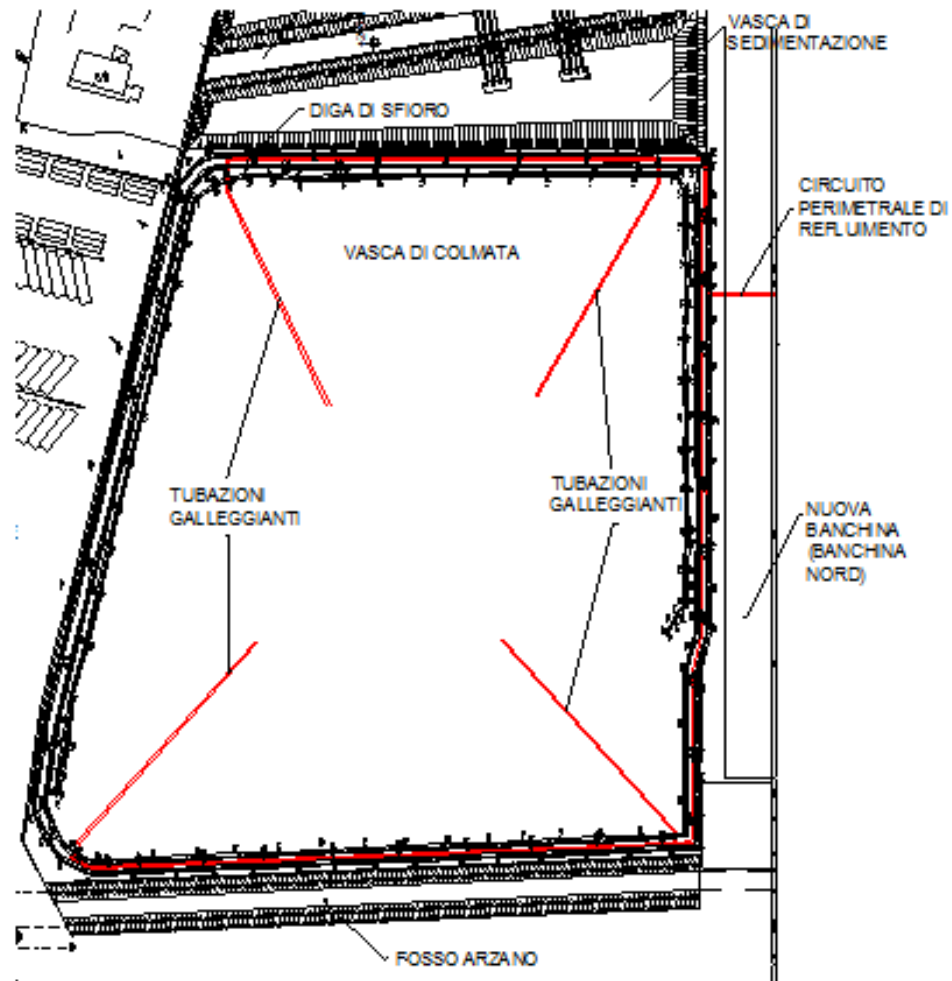


Illustrazione del progetto della vasca di colmata di Gaeta



# Fasi esecutive

## Modalità di immissione



Illustrazione del progetto della vasca di colmata di Gaeta



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

# Fasi esecutive

---

## Modalità di immissione



Illustrazione del progetto della vasca di colmata di Gaeta



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

## Planimetria: sistema vacuum

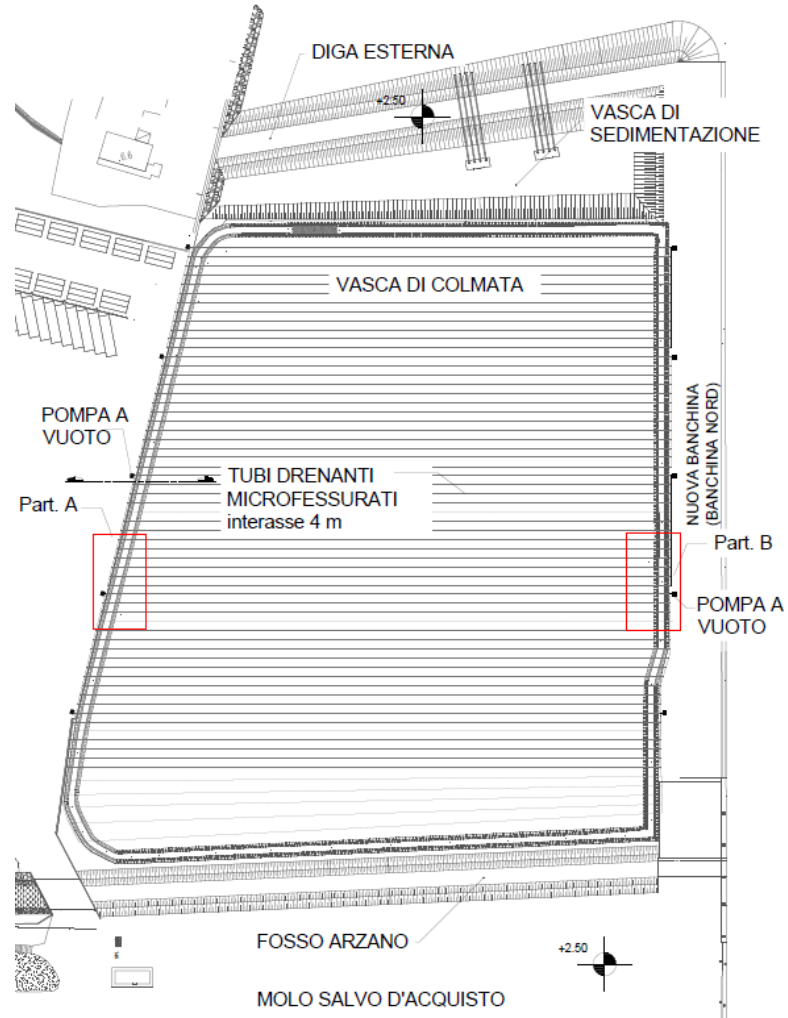


Illustrazione del progetto della vasca di colmata di Gaeta





# Fasi esecutive

## Sistema vacuum

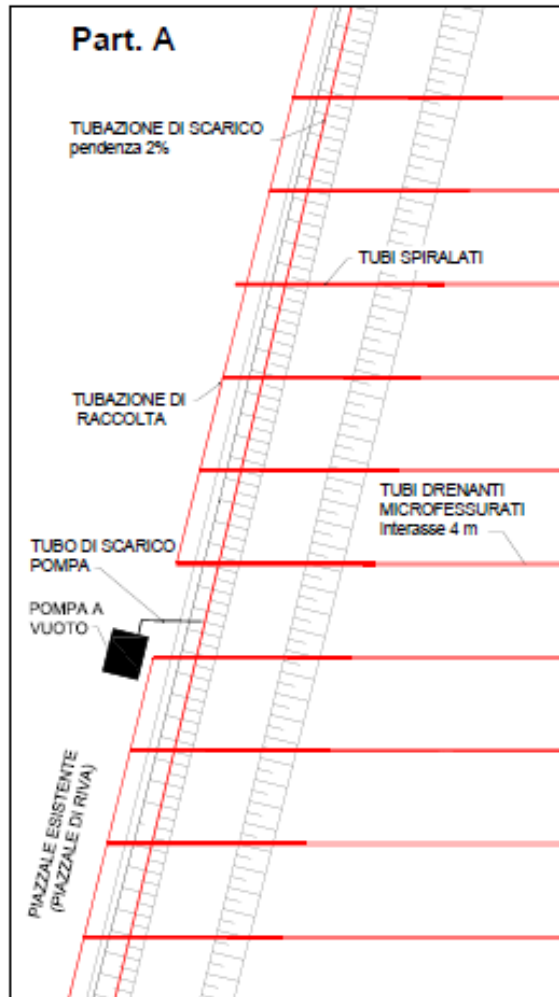


Illustrazione del progetto della vasca di colmata di Gaeta



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

# Fasi esecutive

## Sistema vacuum

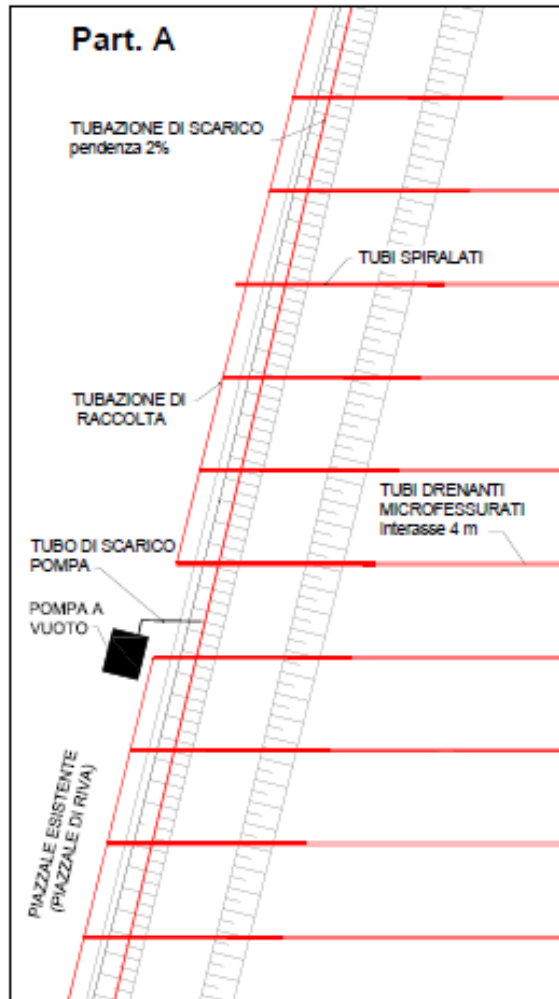


Illustrazione del progetto della vasca di colmata di Gaeta



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

# Fasi esecutive

## Sistema vacuum

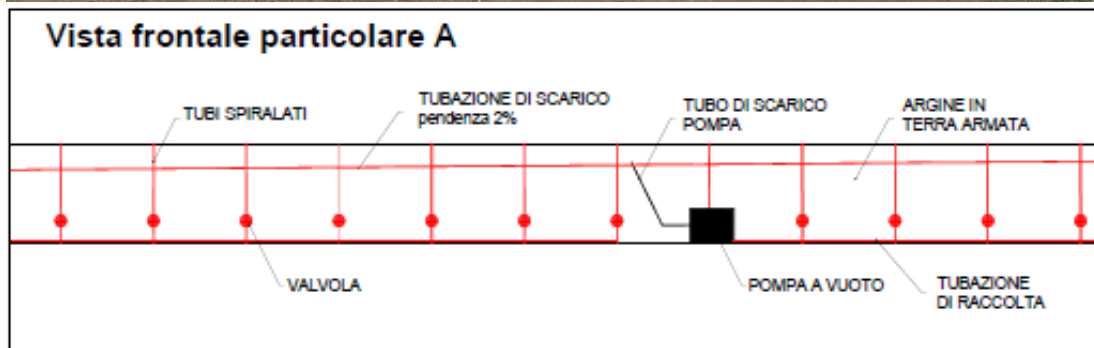


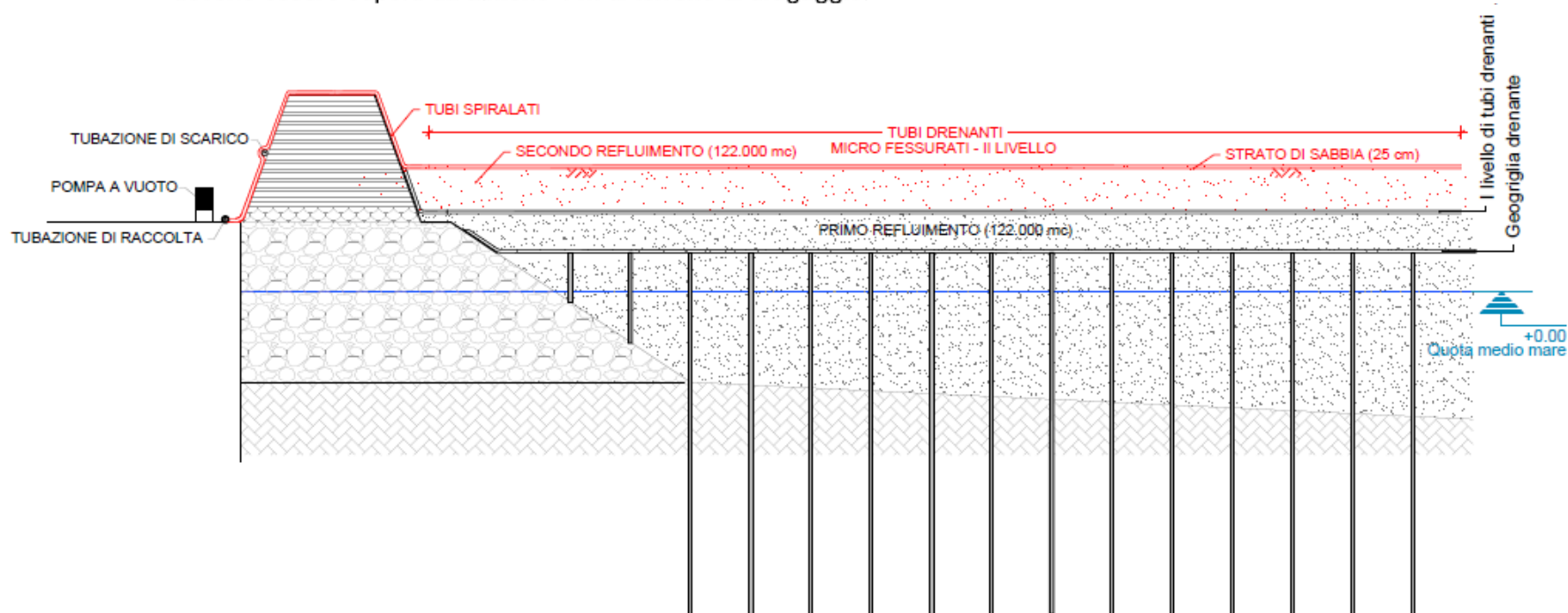
Illustrazione del progetto della vasca di colmata di Gaeta





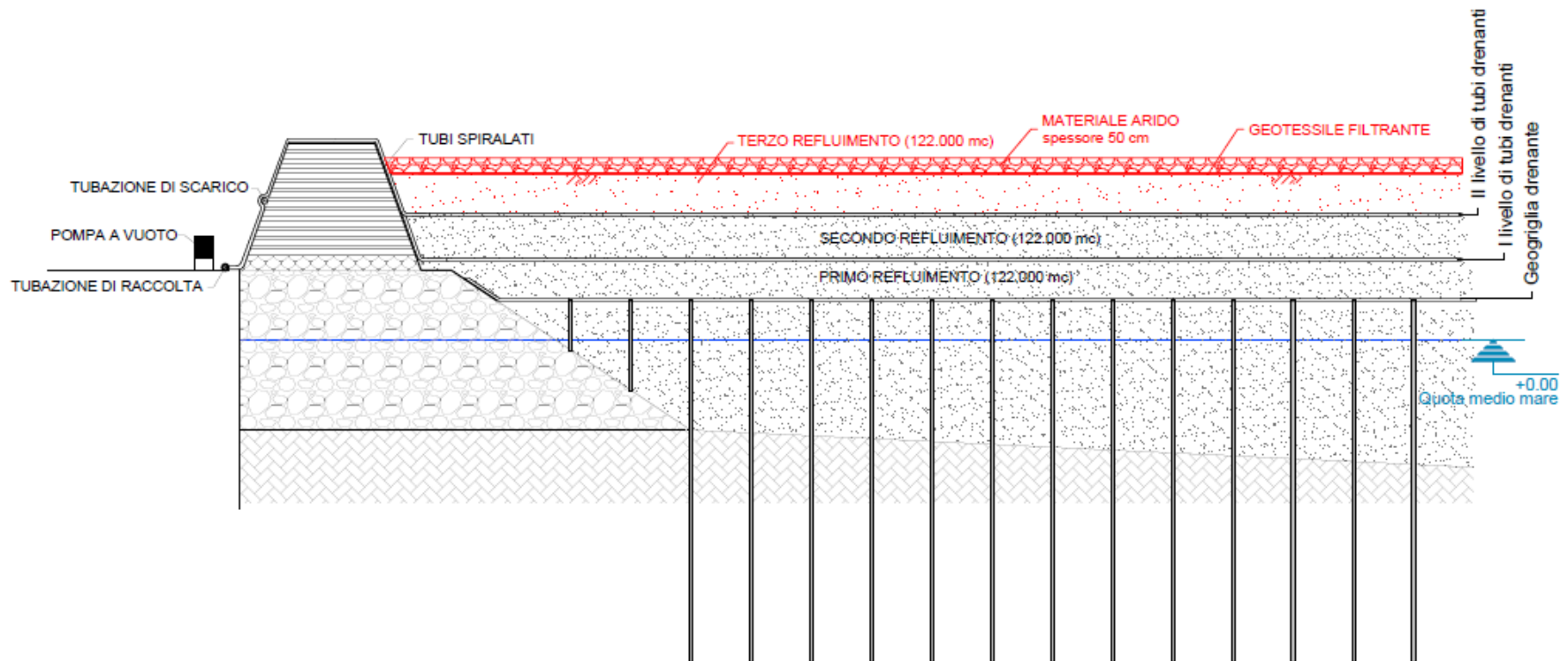
## FASE 4 - Secondo refluito in vasca e successiva posa in opera del II livello di tubi drenanti

Fase intermedia di dragaggio, refluito di un ulteriore terzo del materiale da dragare ( 122.000 mc) all'interno della vasca di colmata con le modalità definite dal Progetto ( elaborato PR1 ), realizzazione di un ulteriore strato drenante mediante posa in opera del secondo livello di tubi drenanti microfessurati. Anche in questo caso la posa in opera dei tubi è preceduta dal pompaggio in vasca di uno strato di sabbia di circa 25 cm di spessore. Le pompe verranno attivate quando sarà refluito in vasca quasi il 50% del volume di dragaggio previsto in questa fase. All'accensione delle pompe i tubi devono essere coperti da almeno 1 m di terreno di dragaggio.



## FASE 5 - Terzo ed ultimo refluimento in vasca e successiva posa in opera di geotessile filtrante

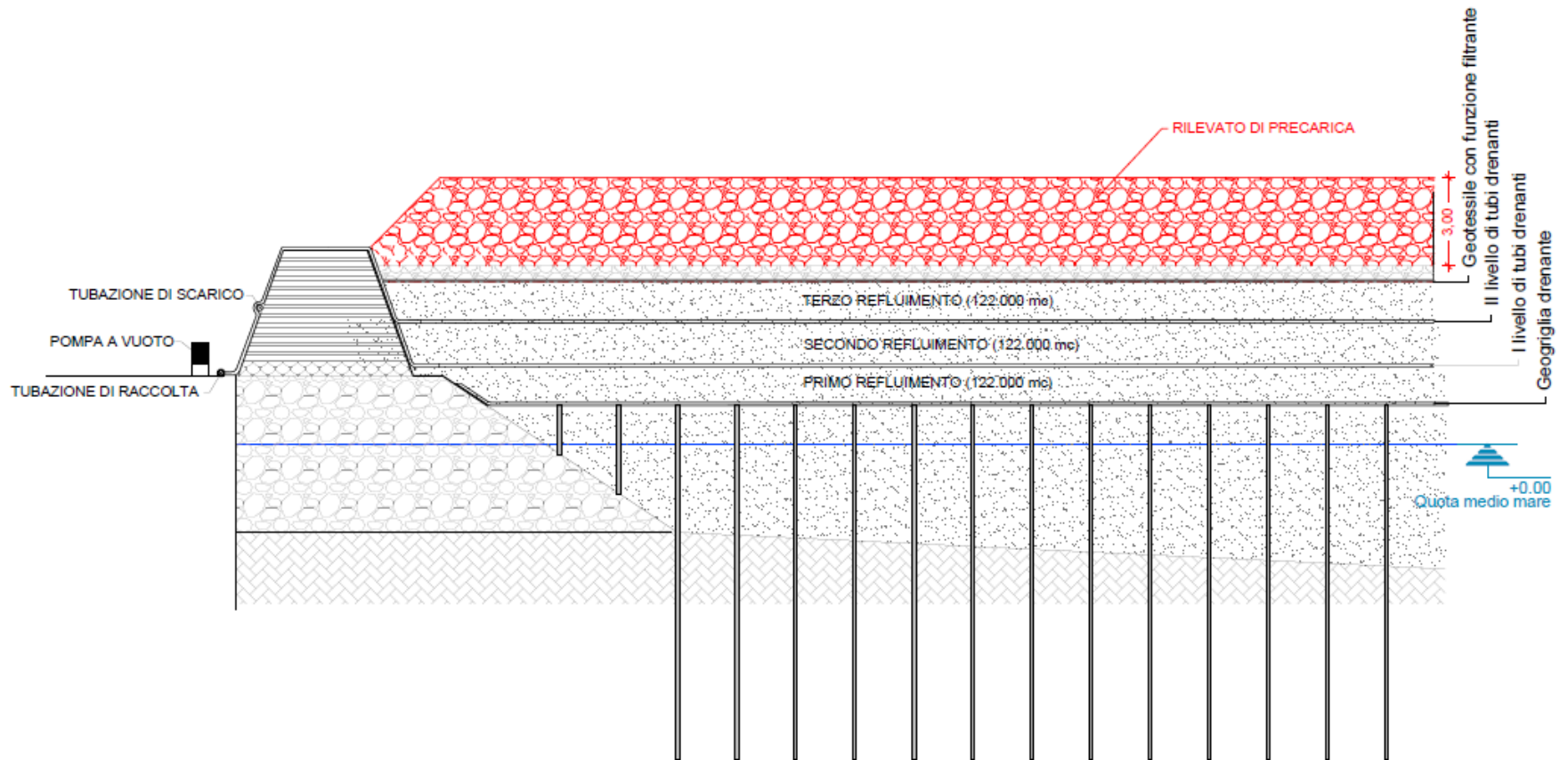
Completamento delle operazioni di dragaggio, refluimento dell'ultimo terzo di materiale da dragare (122.000 mc) con le modalità previste dal progetto (elaborato PR1). Successiva posa in opera di uno strato di geotessile con funzione di filtro e 50 cm di materiale arido. I tubi drenanti saranno collegati al circuito di aspirazione solo quando saranno ricoperti da circa 1 m di terreno di dragaggio.





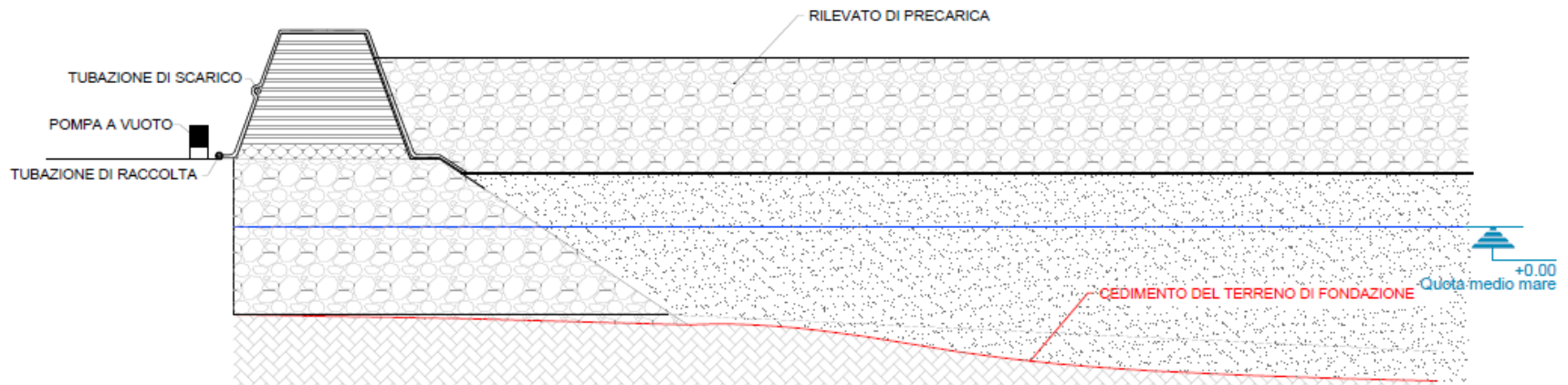
## FASE 6 - Posa in opera del rilevato di precarica

Realizzazione di un rilevato di precarica di altezza pari a 3,00 m, costituito da materiale arido La precarica sarà realizzata in 3 fasi successive.



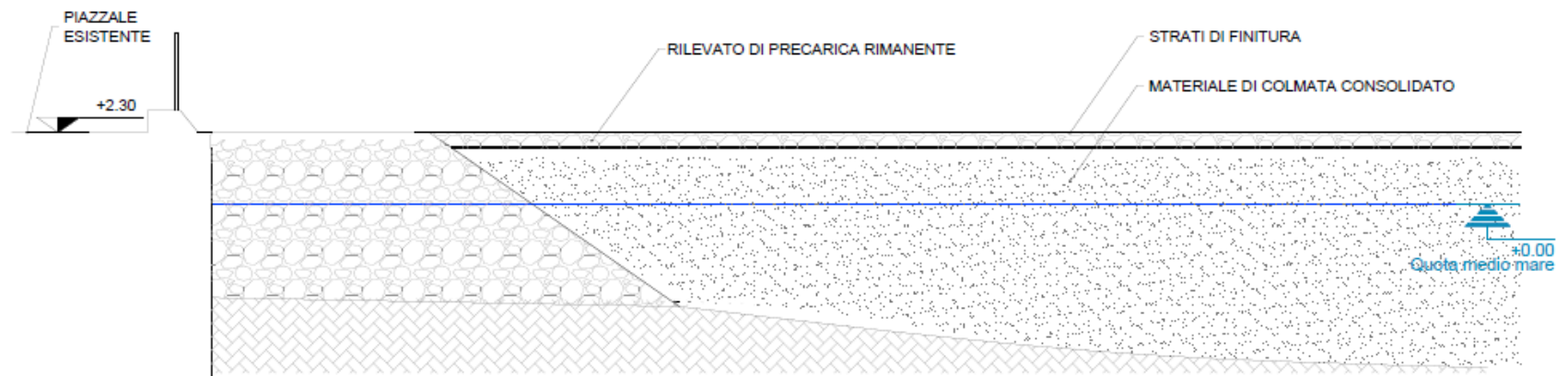
## FASE 7 - Completamento processi di consolidazione in presenza di precarica

Consolidazione del materiale di colmata e dei terreni di fondazione di natura argillosa. La durata attesa dei processi è di 6-9 mesi. Al termine dei processi di consolidazione, seguiti dal sistema di monitoraggio, la quota finale prevista del tetto del materiale di colmata è compresa tra 0.80-2.10 m (lato mare) e 1.90-2.95 m (lato terra) .



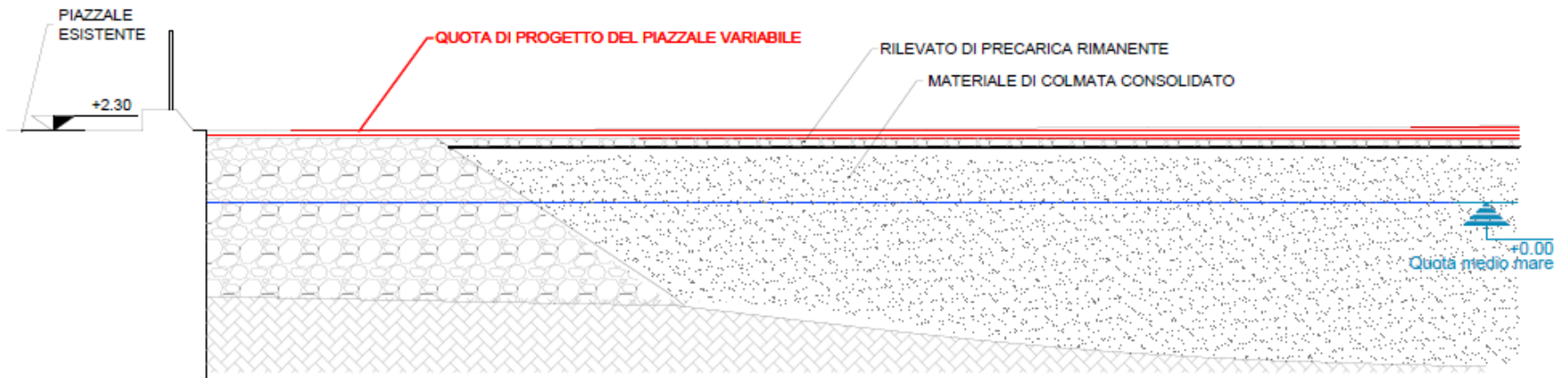
## FASE 8 - Rimozione del rilevato di precarica

Rimozione e del materiale di precarica e degli argini perimetrali, ad esclusione, di uno strato spesso circa 50 cm, che funge da sottofondazione del futuro piazzale. In questa fase parte del materiale di colmata sarà rimossa e collocata all'interno della vasca secondaria. Contestuale disattivazione e dismissione del sistema di pompaggio.



## FASE 9 - Finiture

Realizzazione della restante parte del sottofondo e degli strati legati della pavimentazione dei piazzali fino alla quota finale di progetto.



## Calcolo dei cedimenti

- **Metodo edometrico**
- Refluimento, deposizione, applicazione del vacuum e della precarica **in assenza di consolidazione**
- Suddivisione in **tre sottosistemi**: materiale di escavo, materiale di colmata e terreni in posto

Al fine di individuare il campo di variazione della quota finale del tetto del materiale di colmata alcune proprietà del materiale di escavo e del materiale di colmata sono state assunte **variabili tra due estremi**. Inoltre, sono stati analizzati due profili stratigrafici per i terreni in posto (lato terra e lato mare).

# Valutazione dei cedimenti

## Calcolo dei cedimenti

- Metodo edometrico
- Refluimento, deposizione, applicazione del vacuum e della precarica in assenza di consolidazione
- Suddivisione in tre sottosistemi: materiale di escavo, materiale di colmata e terreni in posto

*Materiale di escavo*

CASO	$e_{mare}$	$V_s$ m <sup>3</sup>
A	1.5	146 521
B		
C		
D		
E	2	122 101
F		
G		
H		



# Valutazione dei cedimenti

## Calcolo dei cedimenti

- Metodo edometrico
- Refluimento, deposizione, applicazione del vacuum e della precarica in assenza di consolidazione
- Suddivisione in tre sottosistemi: materiale di escavo, materiale di colmata e terreni in posto

### *Materiale di escavo*

CASO	$e_{mare}$ -	$V_s$ m <sup>3</sup>	$e_{vasca}$ -	$V_{vasca}$ m <sup>3</sup>	$H_{vasca}$ m slm	$\gamma_{vasca}$ kN/m <sup>3</sup>
A	1.5	146 521	4.5	805 869	14.43	12.66
B			5.5	952 390	16.87	12.23
C						
D						
E	2	122 101	4.5	671 557	12.19	12.66
F			5.5	793 659	14.23	12.23
G						
H						

# Valutazione dei cedimenti

## Calcolo dei cedimenti

- Metodo edometrico
- Refluimento, deposizione, applicazione del vacuum e della precarica in assenza di consolidazione
- Suddivisione in tre sottosistemi: materiale di escavo, materiale di colmata e terreni in posto

### *Materiale di escavo*

CASO	$e_{mare}$ -	$V_s$ m <sup>3</sup>	$e_{vasca}$ -	$V_{vasca}$ m <sup>3</sup>	$H_{vasca}$ m slm	$\gamma_{vasca}$ kN/m <sup>3</sup>	$C_c$ -
A	1.5	146 521	4.5	805 869	14.43	12.66	0.4
B							0.5
C			5.5	952 390	16.87	12.23	0.4
D							0.5
E	2	122 101	4.5	671 557	12.19	12.66	0.4
F							0.5
G			5.5	793 659	14.23	12.23	0.4
H							0.5

# Valutazione dei cedimenti

## Calcolo dei cedimenti

- Metodo edometrico
- Refluimento, deposizione, applicazione del vacuum e della precarica in assenza di consolidazione
- Suddivisione in tre sottosistemi: materiale di escavo, materiale di colmata e terreni in posto

### *Materiale di colmata*

$e_0$	$C_c$
-	-
2.2 - 2.6	0.27 - 0.37

# Valutazione dei cedimenti

## Calcolo dei cedimenti

- Metodo edometrico
- Refluimento, deposizione, applicazione del vacuum e della precarica in assenza di consolidazione
- Suddivisione in tre sottosistemi: materiale di escavo, materiale di colmata e terreni in posto

*Lato terra*

Da (m)	a (m)	Unità (-)
P.C.	1	Mat. Escavo
1	-4	Mat. Colmata
-4	-8	LAS
-8	-16	SL
-16	-35	AL
-35		Calcari

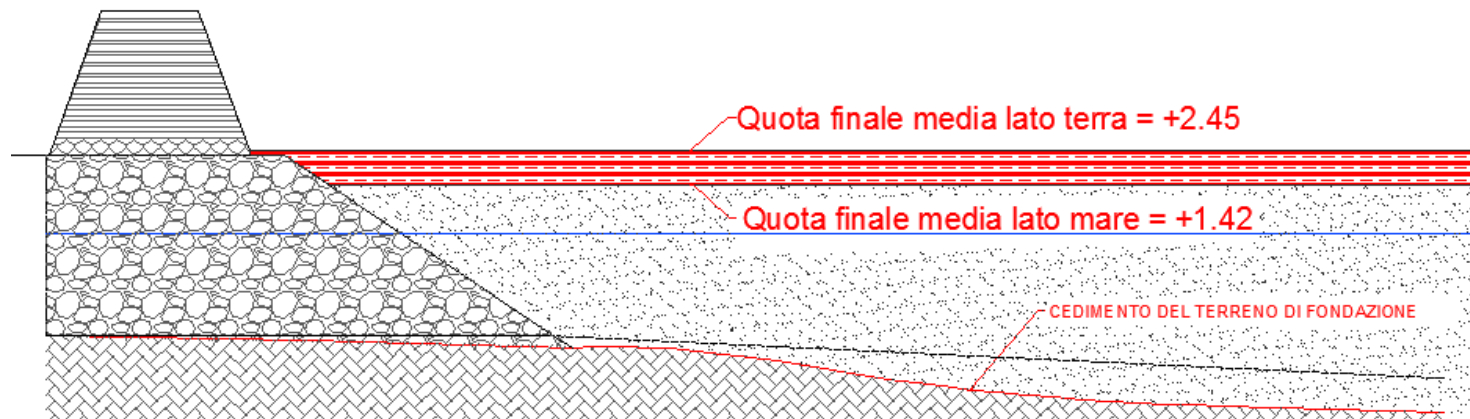
*Lato mare*

Da (m)	a (m)	Unità (-)
P.C.	1	Mat. Escavo
1	-6	Mat. Colmata
-6	-11	LAS
-11	-20	SL
-20	-30	AL
-30	-43	SL
-43	-55	AL

Totale → 32 casi analizzati

# Valutazione dei cedimenti

- **Quota finale compatibile** con la realizzazione dei piazzali
- Tempi di consolidazione – stimati con forti hp semplificative – compresi tra 6 e 9 mesi



- L'aumento di volume sperimentato dal materiale di escavo durante il processo di dragaggio impone un'**attenta scelta della capacità di produzione della draga**. Affinché la vasca possa contenere il materiale, **risulta infatti necessario un volume aggiuntivo** che sarà disponibile nel tempo grazie ai processi di consolidazione, adeguatamente accelerati



# Valutazione dei cedimenti: grandi deformazioni

---

Metodi tradizionali (metodo edometrico)

- Piccole deformazioni
- Permeabilità e compressibilità costanti
- Geometria fissa

Permettono di valutare l'indice dei vuoti assunto dal materiale in corrispondenza dello stato tensionale finale ma **non di seguire l'evoluzione dei cedimenti nel tempo**

# Valutazione dei cedimenti: grandi deformazioni

---

Metodi tradizionali (metodo edometrico)

- Piccole deformazioni
- Permeabilità e compressibilità costanti
- Geometria fissa

Permettono di valutare l'indice dei vuoti assunto dal materiale in corrispondenza dello stato tensionale finale ma non di seguire l'evoluzione dei cedimenti nel tempo

## **Teoria della consolidazione monodimensionale in grandi deformazioni**

*(Gibson & Hussey, 1967)*

- Deformazioni finite
- Compressibilità e permeabilità variabili
- Geometria variabile

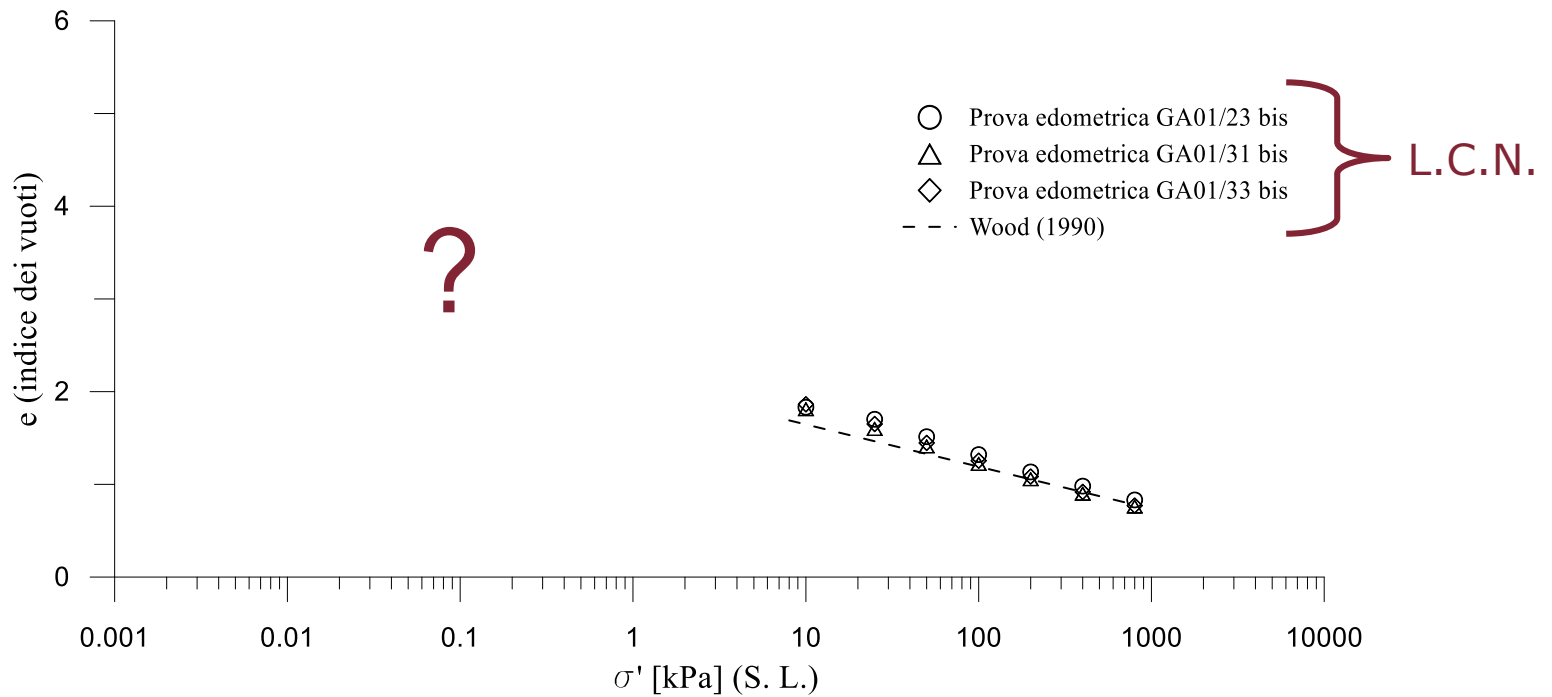
Non esistono soluzioni in forma chiusa



Codice di calcolo alle differenze finite CONDES0 (*Yao & Znidarcic, 1997*)

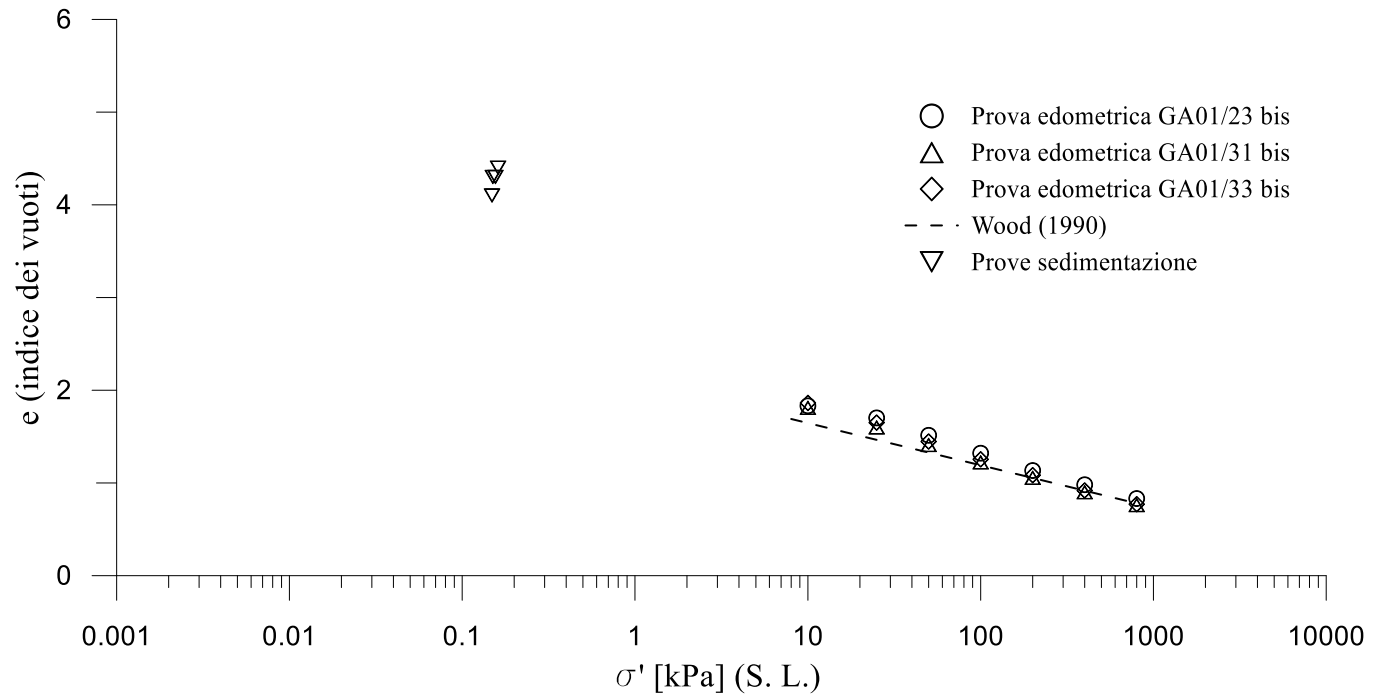
# Valutazione dei cedimenti: grandi deformazioni

Relazione indice dei vuoti : tensione efficace



# Valutazione dei cedimenti: grandi deformazioni

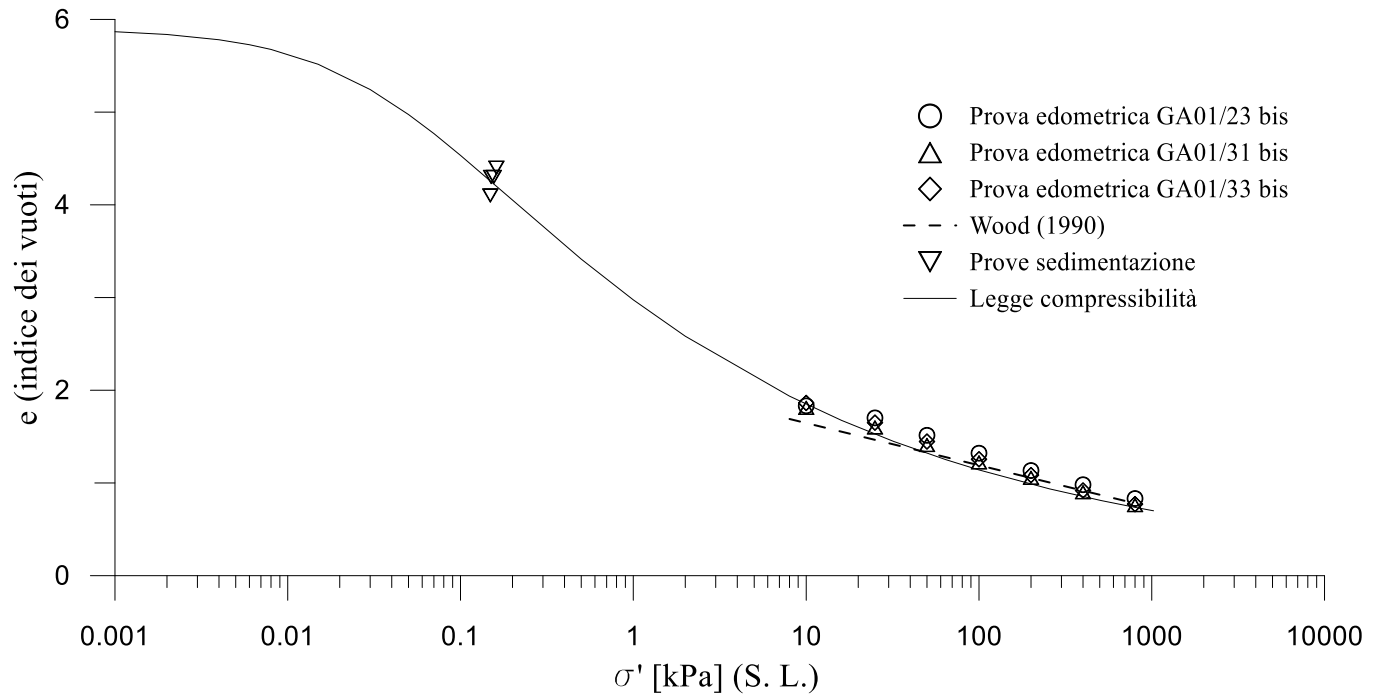
Relazione indice dei vuoti : tensione efficace



# Valutazione dei cedimenti: grandi deformazioni

Relazione indice dei vuoti : tensione efficace

**Liu & Znidarcic, 1991**  $e = A(\sigma'_v + Z)^B$

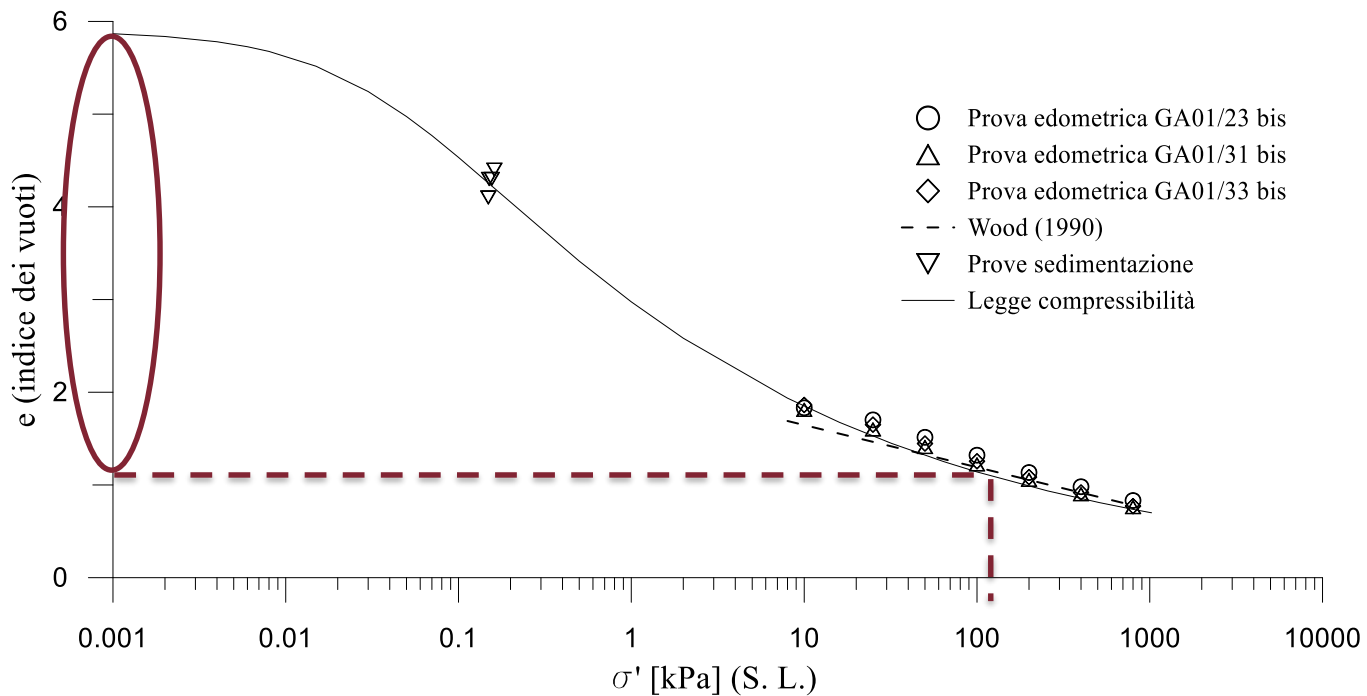




# Valutazione dei cedimenti: grandi deformazioni

Relazione indice dei vuoti : tensione efficace

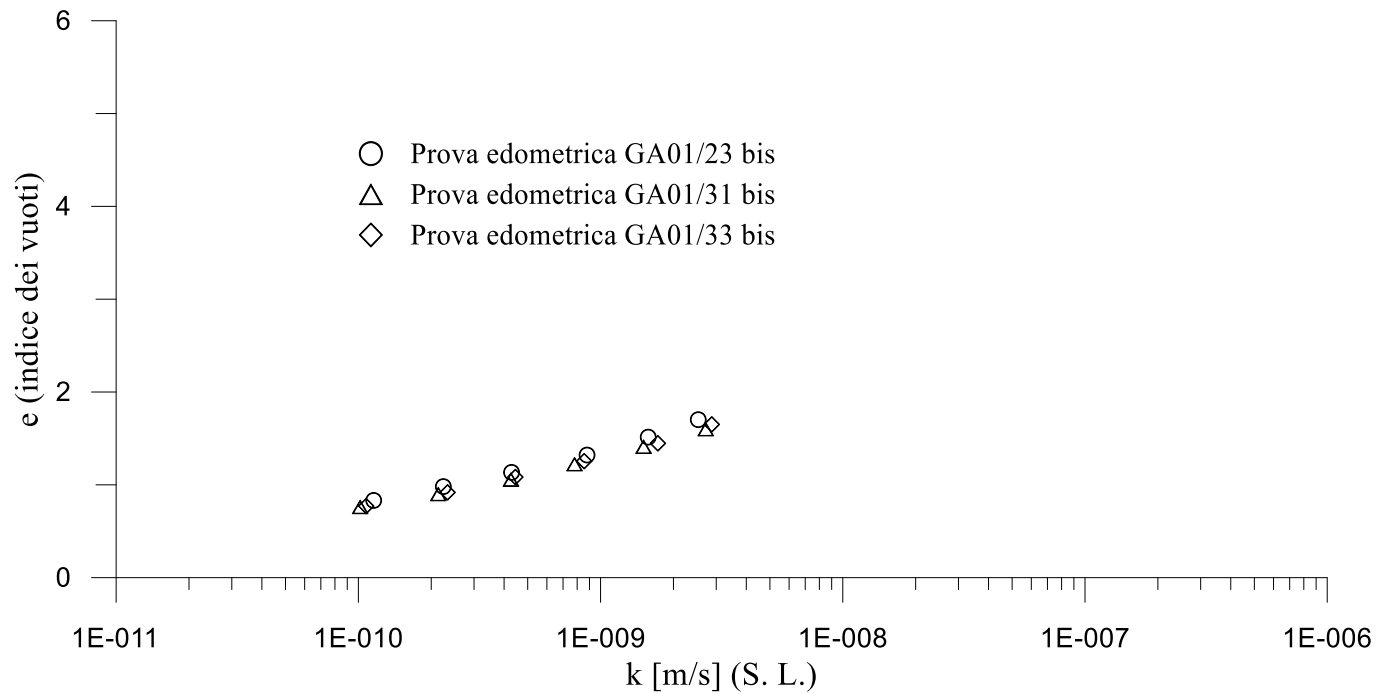
*Liu & Znidarcic, 1991*       $e = A(\sigma'_v + Z)^B$



**Campo di variazione dell'indice dei vuoti  $\approx 1 \div 5.8$**

# Valutazione dei cedimenti: grandi deformazioni

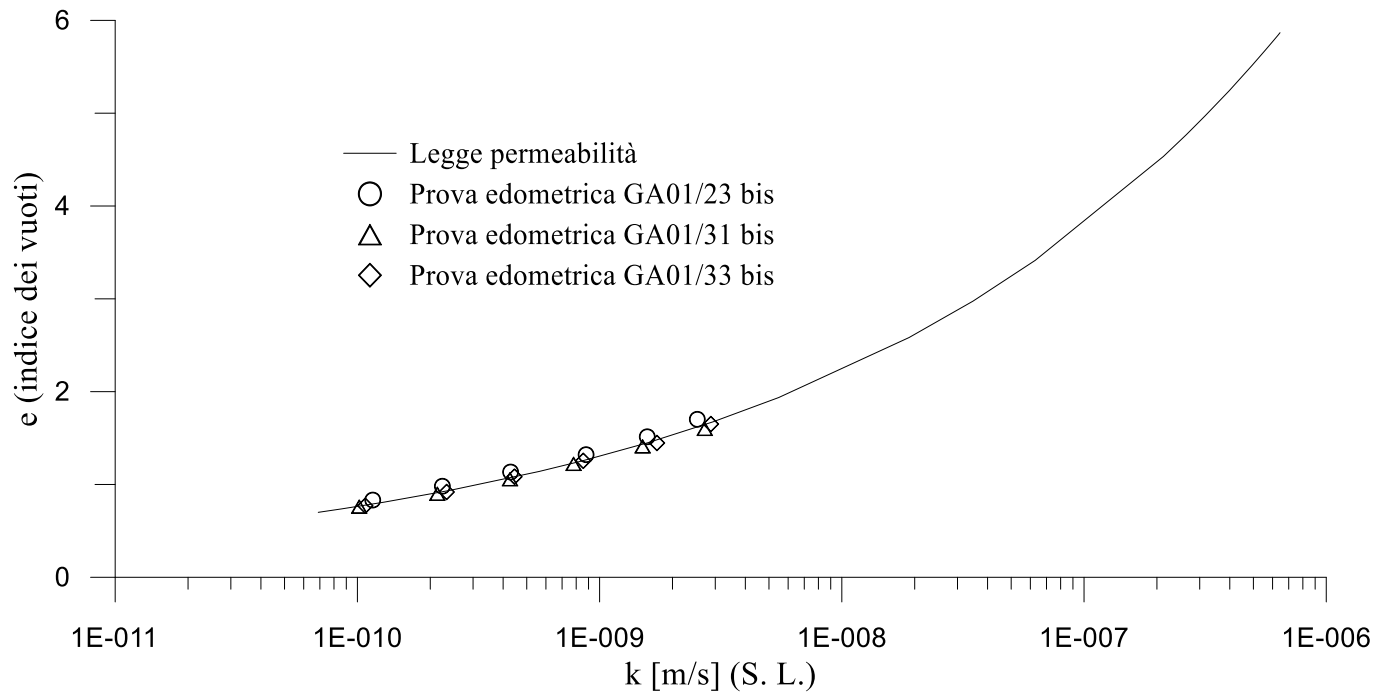
Relazione indice dei vuoti : permeabilità



# Valutazione dei cedimenti: grandi deformazioni

Relazione indice dei vuoti : permeabilità

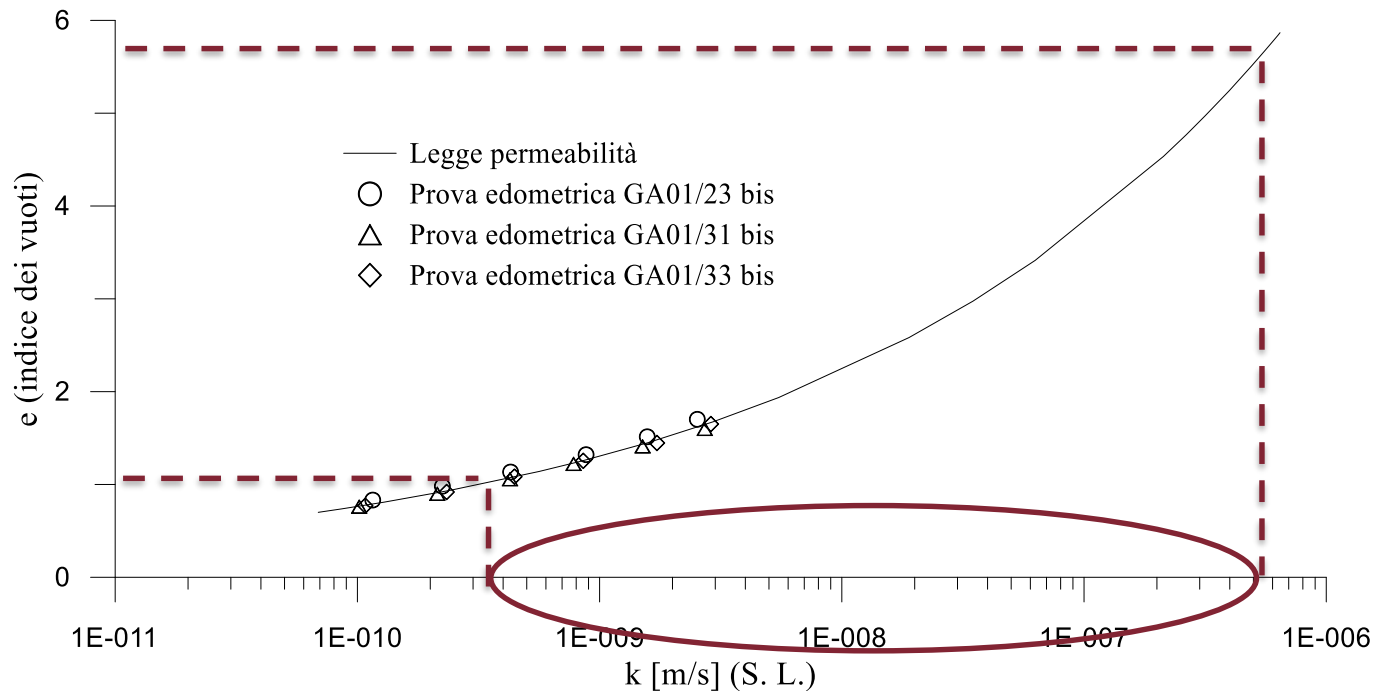
**Krizek & Somogy, 1984**  $k = Ce^D$



# Valutazione dei cedimenti: grandi deformazioni

Relazione indice dei vuoti : permeabilità

Krizek & Somogy, 1984  $k = Ce^D$



**Variazioni di permeabilità di tre ordini di grandezza**

# Valutazione dei cedimenti: grandi deformazioni

---

Evoluzione dei cedimenti durante le operazioni le operazioni di dragaggio

- **Analisi mediante sottosistemi**
- **Relazioni costitutive uguali** per tutti i sottosistemi
- **Modellazione di tutti i processi** attraversati da ciascun sottosistema



# Valutazione dei cedimenti: grandi deformazioni

Evoluzione dei cedimenti durante le operazioni le operazioni di dragaggio

## ***Sottosistema A: Primo terzo di materiale dragato***

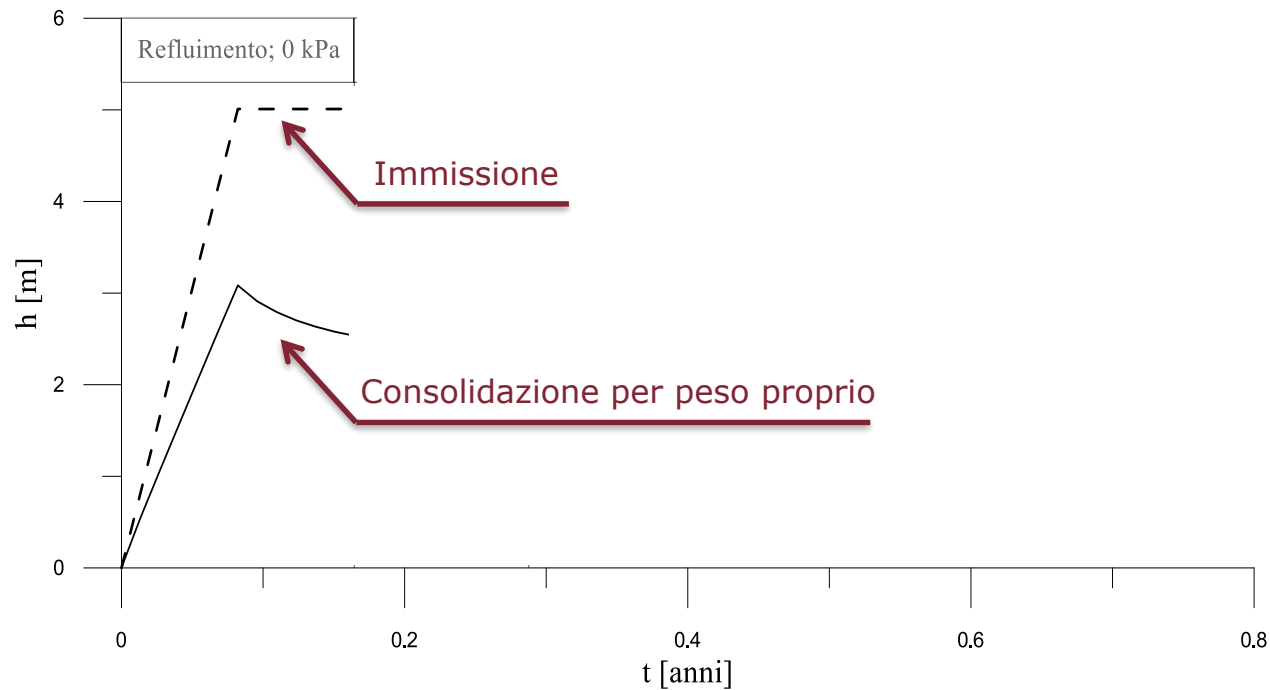


Illustrazione del progetto della vasca di colmata di Gaeta



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

# Valutazione dei cedimenti: grandi deformazioni

Evoluzione dei cedimenti durante le operazioni le operazioni di dragaggio

## ***Sottosistema A: Primo terzo di materiale dragato***

Carico dovuto al refluento del secondo terzo di dragaggio

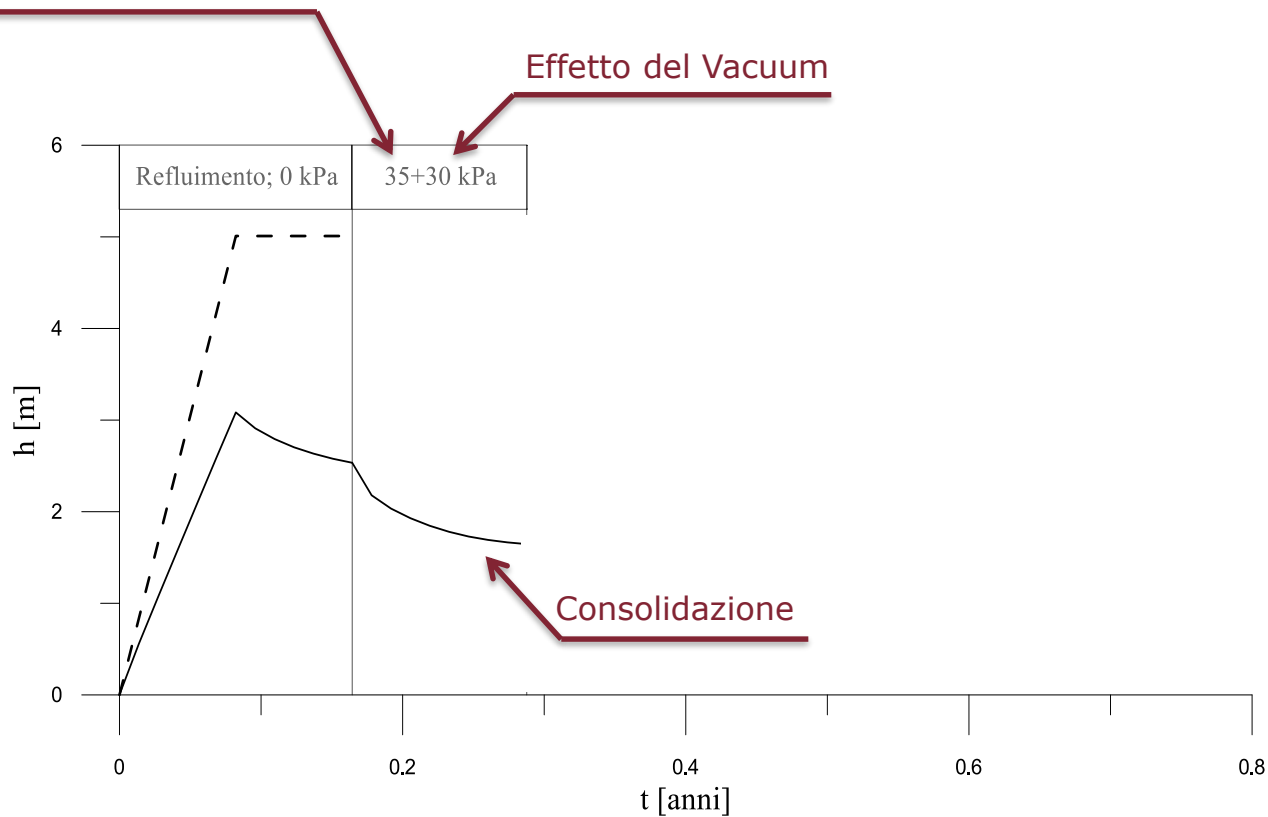


Illustrazione del progetto della vasca di colmata di Gaeta



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

# Valutazione dei cedimenti: grandi deformazioni

Evoluzione dei cedimenti durante le operazioni le operazioni di dragaggio

## ***Sottosistema A: Primo terzo di materiale dragato***

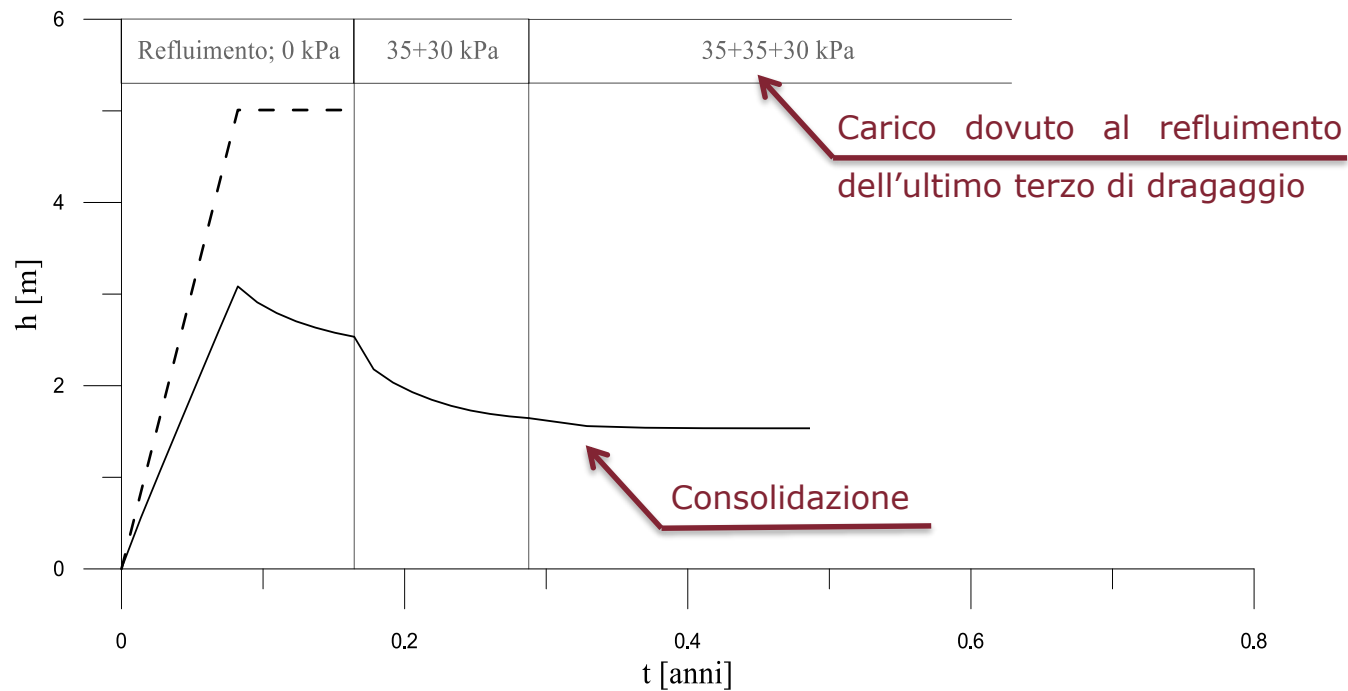


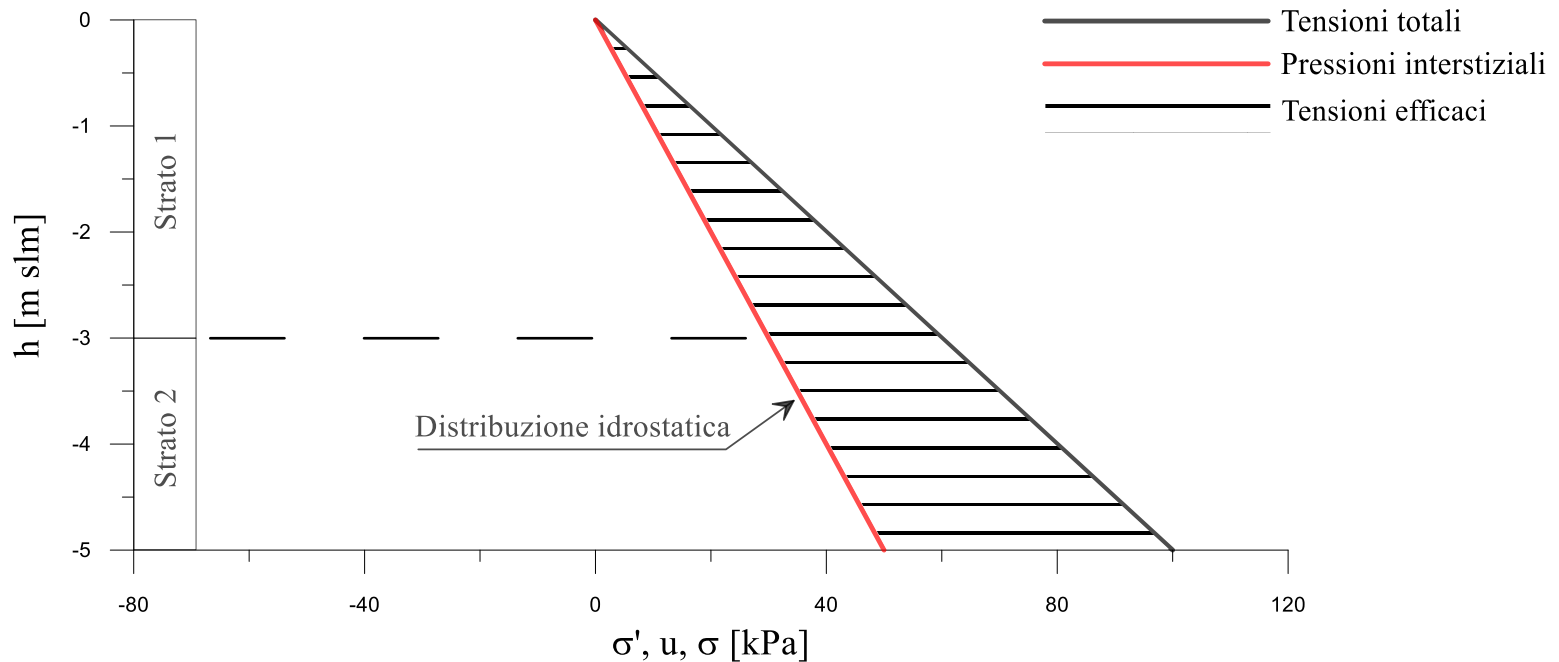
Illustrazione del progetto della vasca di colmata di Gaeta



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

# Vacuum consolidation: effetti tensionali

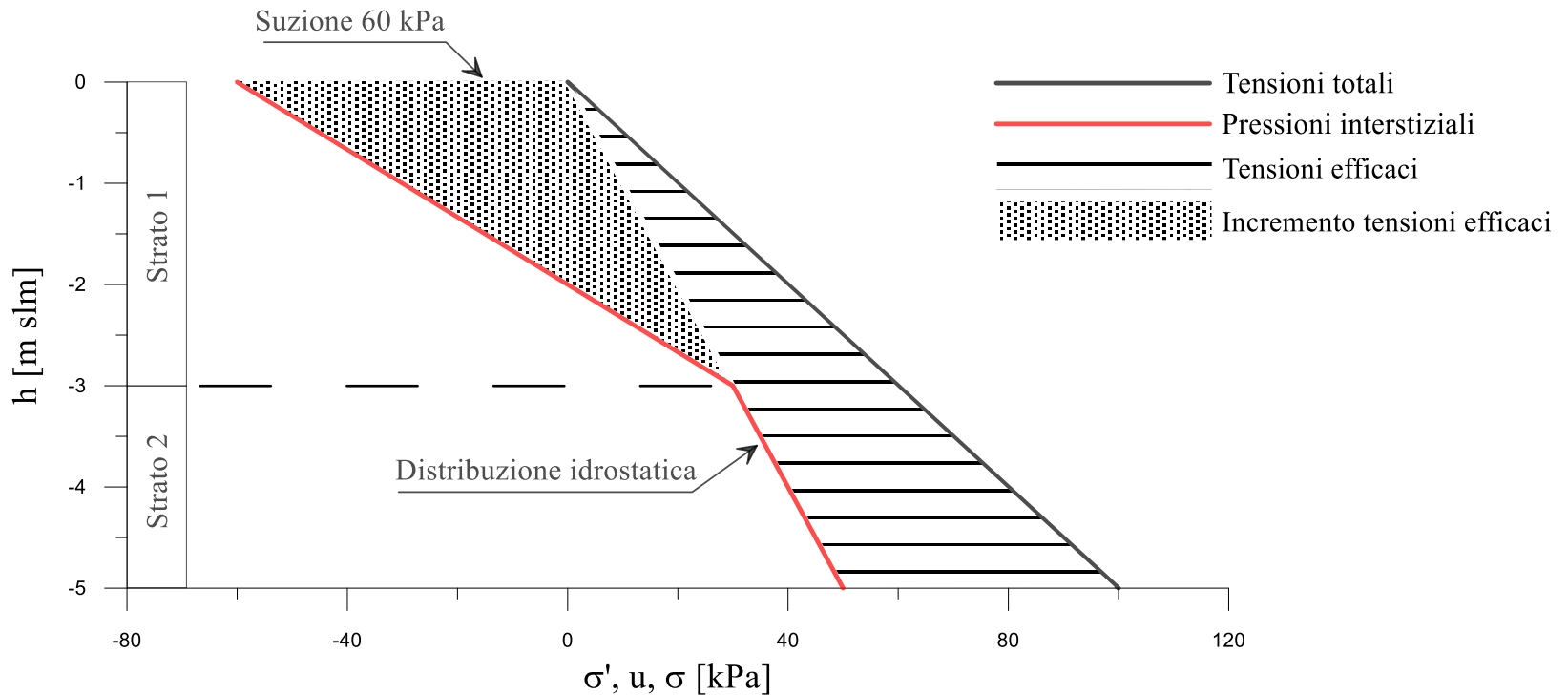
Suzione applicata al contorno superiore di uno strato il cui contorno inferiore si trova in condizioni idrostatiche (i.e. sottosistema A)



# Vacuum consolidation: effetti tensionali

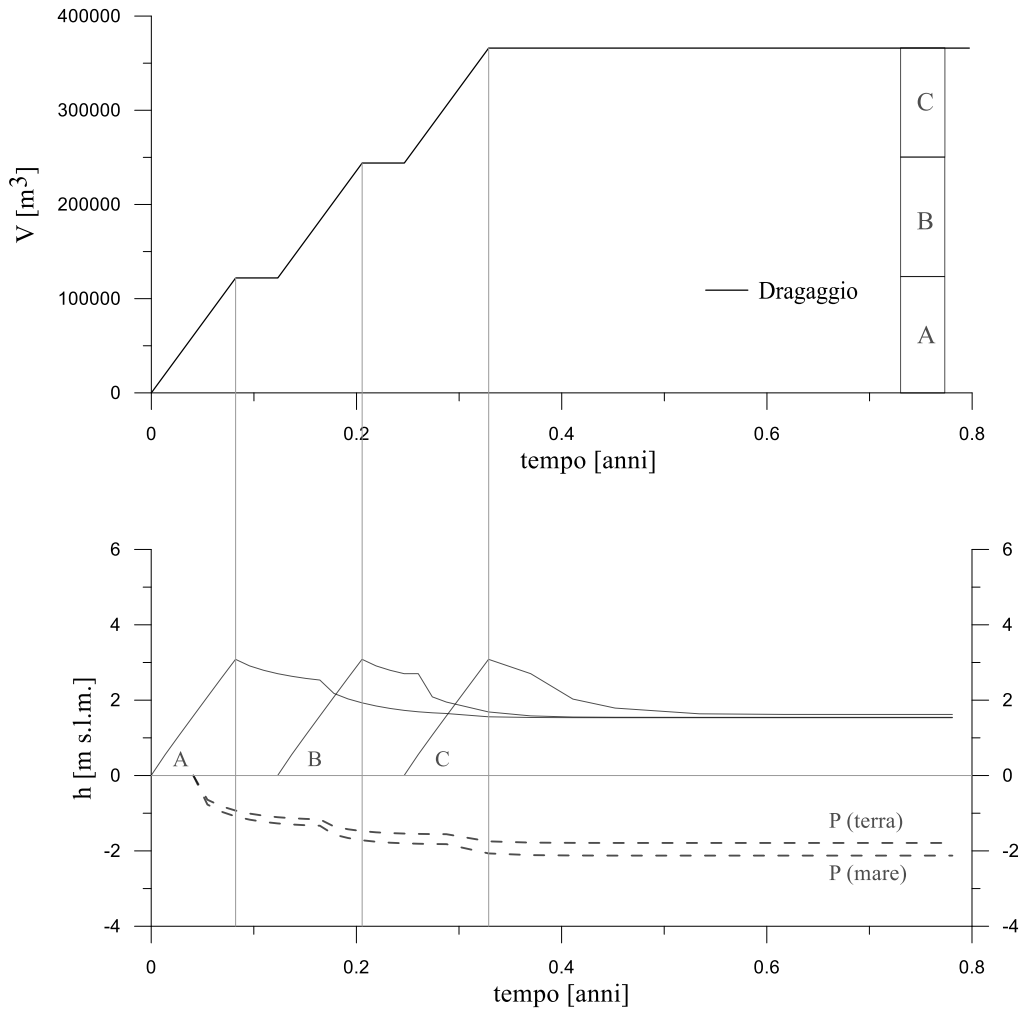
Suzione applicata al contorno superiore di uno strato il cui contorno inferiore si trova in condizioni idrostatiche (i.e. sottosistema A)

**Incremento medio di tensioni efficaci pari a 30 kPa**

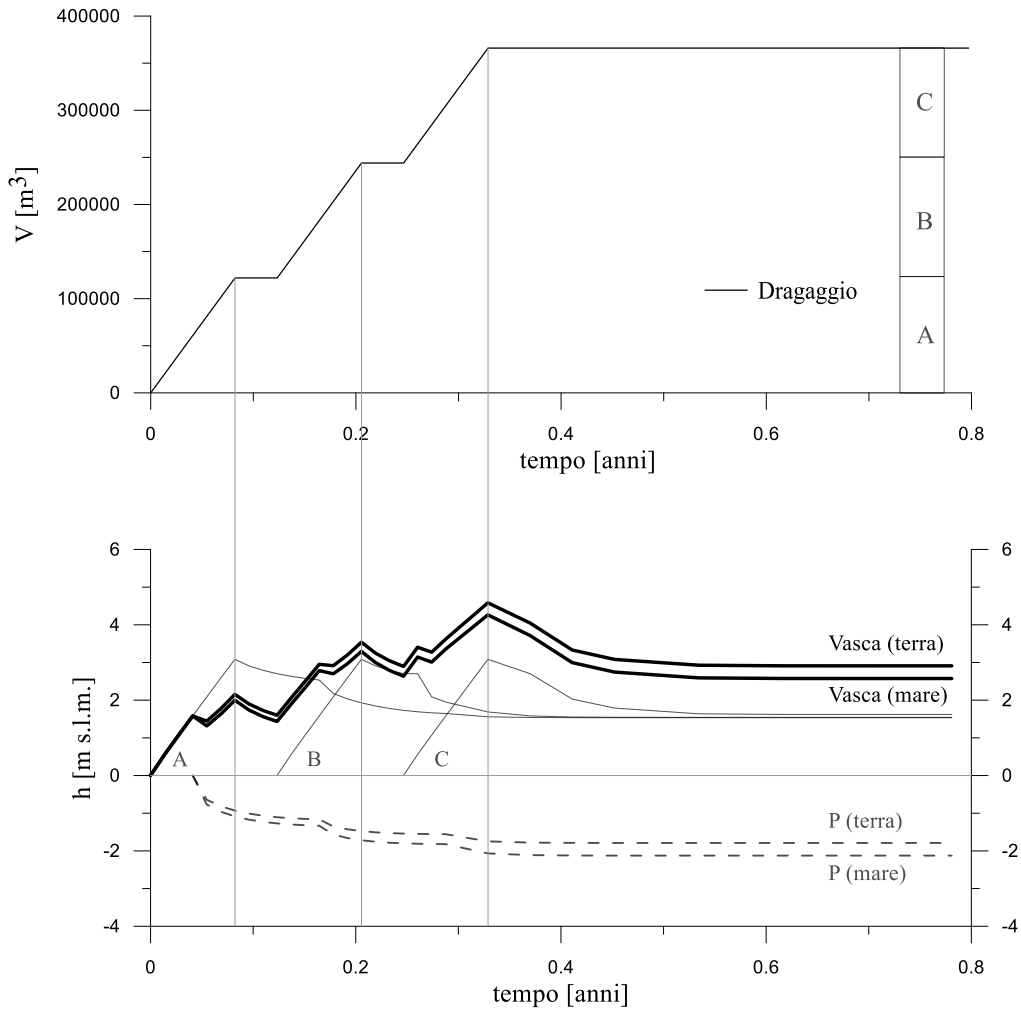


# Risultati

## Analisi per sottosistemi in accordo con il cronoprogramma



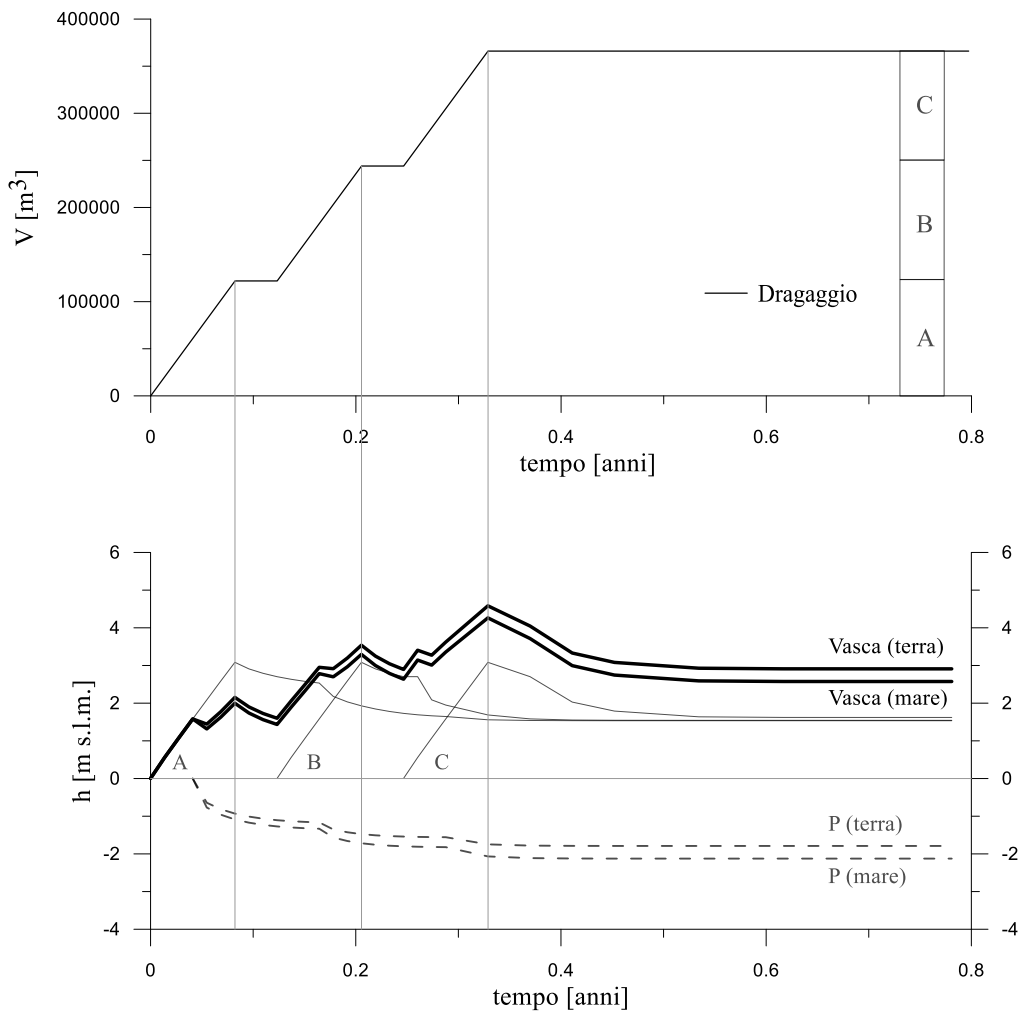




## Analisi per sottosistemi in accordo con il cronoprogramma

Sommando, nel tempo, gli spessori dei singoli sottosistemi a partire dal tetto dei terreni in posto è possibile stimare la quota del materiale all'interno della vasca

# Risultati

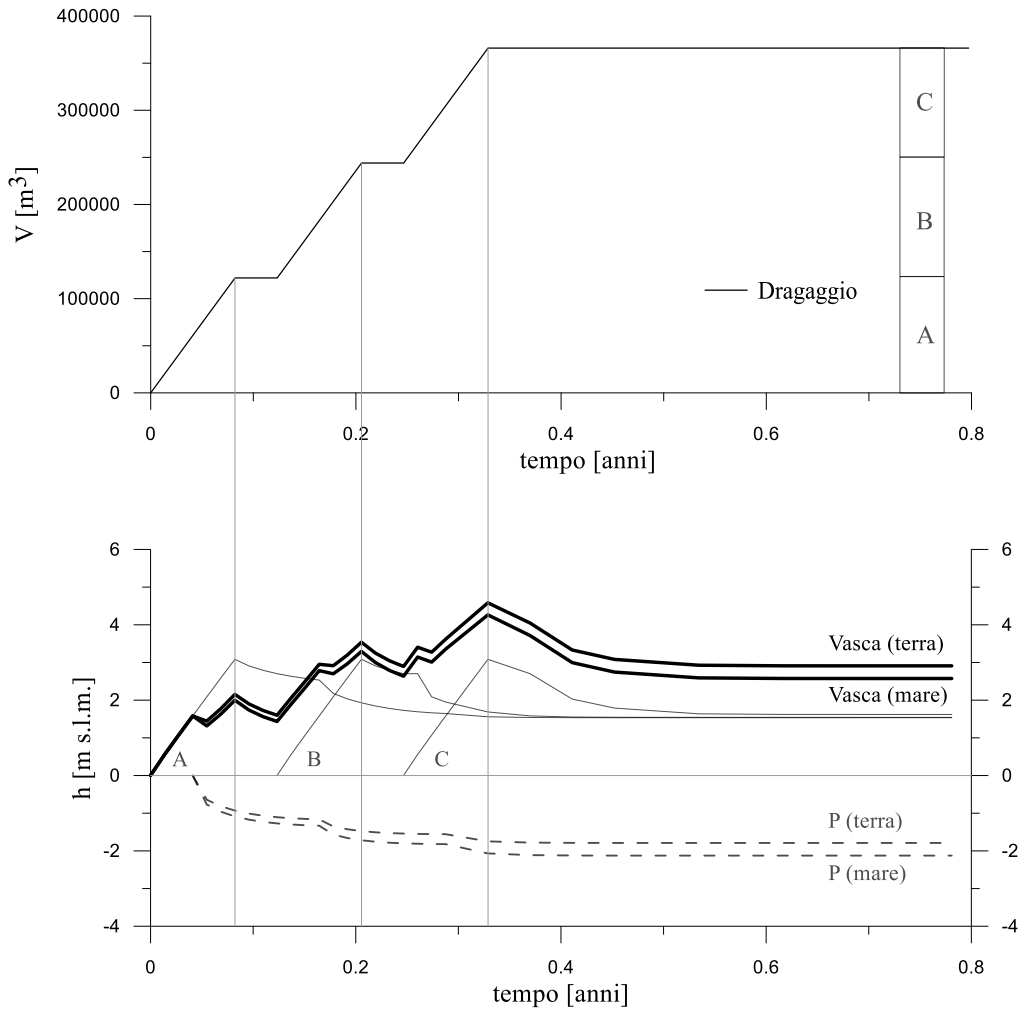


## Analisi per sottosistemi in accordo con il cronoprogramma

Sommando, nel tempo, gli spessori dei singoli sottosistemi a partire dal tetto dei terreni in posto è possibile stimare la quota del materiale all'interno della vasca

Quota (m slm)	Lato mare	Lato terra
Massima	4.26	4.58
Fine consolidazione	2.58	2.91

# Risultati

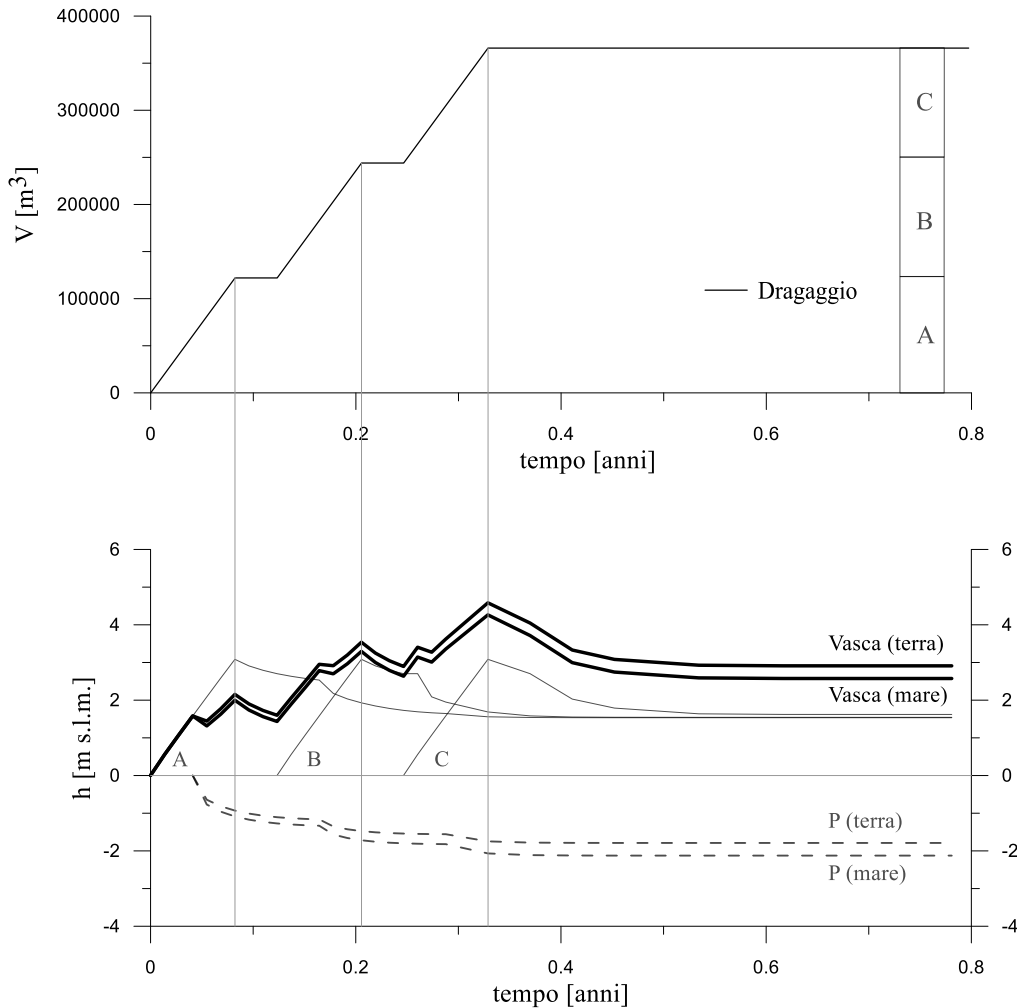


## Analisi per sottosistemi in accordo con il cronoprogramma

Sommando, nel tempo, gli spessori dei singoli sottosistemi a partire dal tetto dei terreni in posto è possibile stimare la quota del materiale all'interno della vasca

Quota (m slm)	Lato mare	Lato terra
Massima	4.26	4.58
Fine consolidazione	2.58	2.91
Precarica	2.06	2.47
Rigonfiamento	2.24	2.62

# Risultati



I risultati confermano la **validità della soluzione progettuale**. I sistemi di drenaggio adottati, infatti, permettono il **sostanziale esaurimento dei fenomeni di consolidazione in tempi rapidi**, confrontabili con i tempi di esecuzione dell'opera, **garantendo l'immissione in vasca della totalità del materiale**.

# Piano di monitoraggio

## Misure preliminari

Volte principalmente a conoscere il **grado di consolidazione** dei terreni già refluiti in vasca e a conoscere nel dettaglio la **distribuzione iniziale** di alcune grandezze allo scopo di monitorare correttamente l'evoluzione dei fenomeni di consolidazione



- 6 Prove dilatometriche
- ▲ 6 Sondaggi  
(prelievo campioni indisturbati)

# Piano di monitoraggio

## Misure durante le operazioni di dragaggio

Assestimetri particolari ideati per facilitare l'installazione e permettere il **monitoraggio dei cedimenti in corso d'opera**



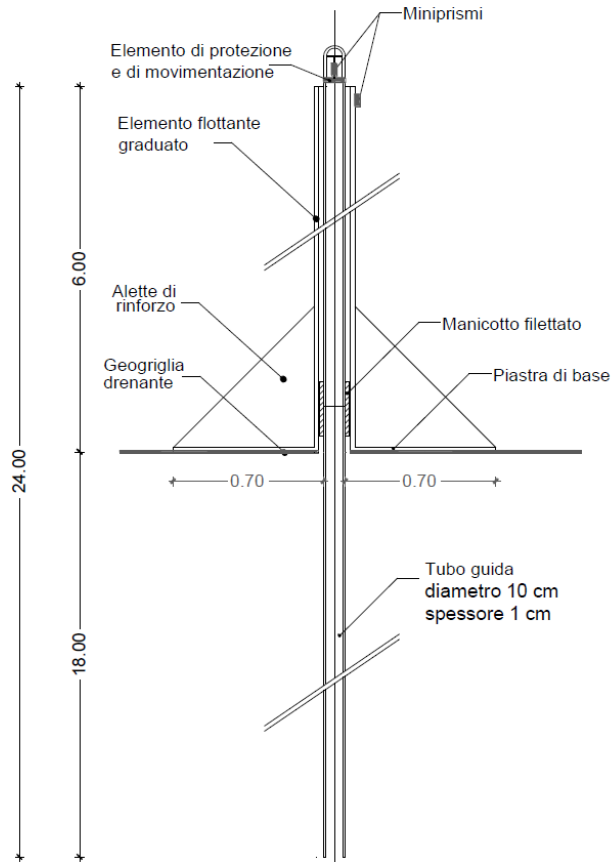
- 6 Prove dilatometriche
- ▲ 6 Sondaggi
- 12 Assestimetri



# Piano di monitoraggio

## Misure durante le operazioni di dragaggio

Assestimetri particolari ideati per facilitare l'installazione e permettere il **monitoraggio dei cedimenti in corso d'opera**



● 6 Prove dilatometriche

▲ 6 Sondaggi

■ 12 Assestimetri

# Piano di monitoraggio

## Misure durante le operazioni di dragaggio

Al fine di monitorare gli **effetti indotti** sugli argini e sulla banchina nord sono previsti 16 miniprismi (8+8)

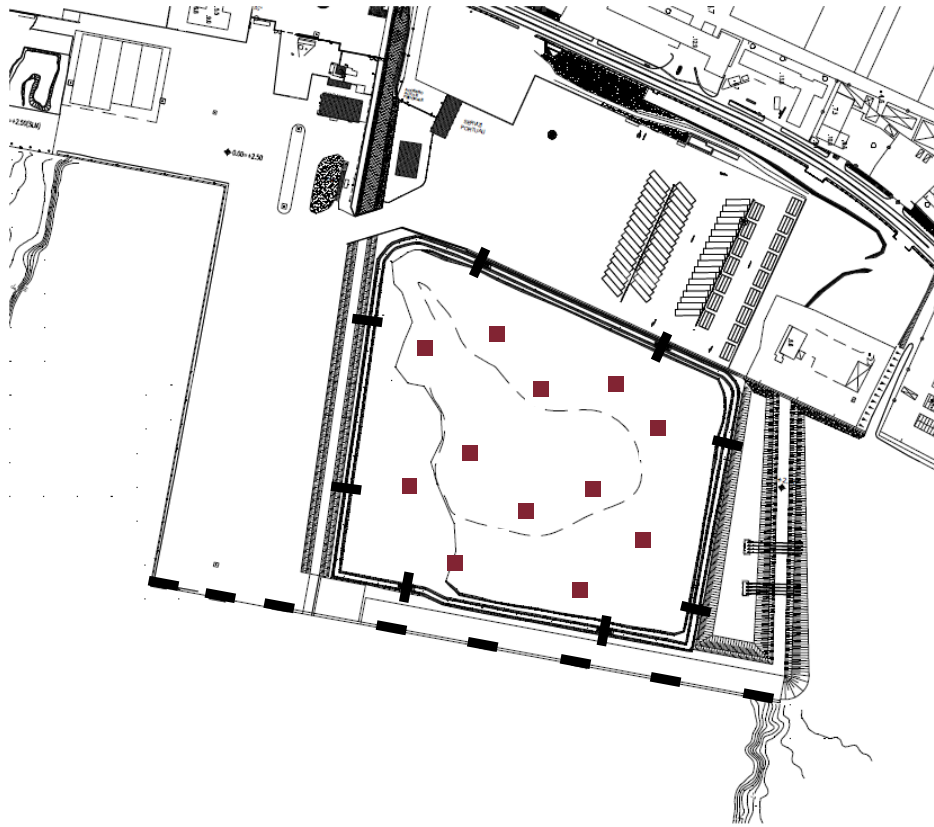


- 6 Prove dilatometriche
- ▲ 6 Sondaggi
- 12 Assestimetri
- 8 + 8 Miniprismi

# Piano di monitoraggio

## Misure dopo il termine del dragaggio

Una volta terminato il dragaggio e realizzato un piano di lavoro calpestabile saranno installati **assestimetri a piastra, assestimetri multibase e piezometri elettrici**



■ 12 Assestimetri a piastra

6 Assestimetri multibase

In corrispondenza delle verticali che avranno esibito cedimenti maggiori e accoppiati a 3\*6 piezometri elettrici

# Visita tecnica - Avanzamento dei lavori

---

## ➤ *Autunno 2015*

Attività preliminari: cantierizzazione, misure preliminari, dreni verticali, geogriglia drenante

## ➤ *Dicembre 2015*

Primo terzo di dragaggio

## ➤ *Gennaio 2016*

Primo livello di tubazioni microfessurate (vacuum consolidation)

## ➤ *Febbraio 2016*

Secondo terzo di dragaggio

## ➤ *Marzo 2016*

Secondo livello di tubazioni microfessurate

CICLO DI SEMINARI SUL MIGLIORAMENTO DEI TERRENI

Cassino, 9-11 Marzo 2016

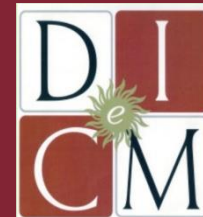
## Illustrazione del progetto della vasca di colmata di Gaeta

*Armando de Lillis*

**MASTER**  
Progettazione Geotecnica



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA



11 Marzo 2016