



## AUTORITA' PORTUALE NORD SARDEGNA

APPALTO DELLA PROGETTAZIONE DEFINITIVA ED ESECUTIVA SULLA BASE DEL PROGETTO PRELIMINARE E PER LA REALIZZAZIONE DEI LAVORI PER IL PROLUNGAMENTO DELL'ANTEMURALE DI PONENTE E DELLA RESECAZIONE DELLA BANCHINA ALTI FONDALI DEL PORTO CIVICO DI PORTO TORRES. CIG 5630886220; CUP B21G11000040001

### PROGETTO DEFINITIVO

### R4 RELAZIONE GEOTECNICA



Impresa

**sales**

Costituendo Raggruppamento Temporaneo di Progettisti



Ing. Lucio Abbadessa



Ing. Marco Pittori

**SOMMARIO**

<b>1</b>	<b>PREMESSA .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI TERRENI .....</b>	<b>2</b>
2.1	INDAGINI GEOTECNICHE	2
2.2	RICOSTRUZIONE STRATIGRAFICA	5
2.3	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI TERRENI	5
2.3.1.	Depositi detritici sabbiosi (DS)	5
2.3.2.	Substrato calcarenitico (SC)	7
2.4	MODELLO GEOTECNICO DI SOTTOSUOLO	7
<b>3</b>	<b>INQUADRAMENTO SISMICO .....</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>CEDIMENTI .....</b>	<b>9</b>
4.1	VALUTAZIONE DEL CEDIMENTO DELLO SCANNO DI IMBASAMENTO	9
4.2	RESECAZIONE DELLA BANCHINA ALTI FONDALI	10
4.3	PROLUNGAMENTO DELL'ANTEMURALE DI PONENTE	11

## 1 PREMESSA

Il presente documento costituisce la Relazione Geotecnica del Progetto Definitivo “Prolungamento dell’antemurale di Ponente e resecazione banchina alti fondali 1° e 2° stralcio”, da realizzarsi nell’hub portuale di Porto Torres.

Nel seguito, si illustrano le informazioni attualmente a disposizione riguardo ai terreni presenti e le caratteristiche fisiche e meccaniche dei litotipi individuati.

Sono poi riportate le valutazioni in merito ai cedimenti legati alla realizzazione dei cassoni del prolungamento dell’Antemurale di Ponente e dell’opera di resecazione della Banchina Alti Fondali.

## 2 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI TERRENI

La caratterizzazione geotecnica dei terreni interessati dalle opere viene effettuata sulla base dei risultati delle campagne di indagini geognostiche eseguite e delle informazioni desumibili dall'elaborato B.03 Relazione Tecnica Geologica-Geotecnica del Progetto Preliminare del "Prolungamento dell'antemurale di Ponente e resecazione banchina alti fondali 1° e 2° stralcio" posto a base di gara.

### 2.1 INDAGINI GEOTECNICHE

Nell'area di interesse sono state eseguite diverse campagne di indagine, di seguito elencate:

- Campagna indagine 2014, eseguita dalla Sarda Sondaggi S.r.l. in corrispondenza dell'area interessata dalla futura ubicazione del tratto di banchina per il prolungamento dell'Antemurale di Ponente;
- Campagna indagine 2014, eseguita dalla Sarda Sondaggi S.r.l. in corrispondenza della Banchina Alti Fondale esistente;
- Campagna indagine 2009, eseguita da SI.GE.S.r.l. di Cagliari lungo il futuro sviluppo del Nuovo Molo di Levante per la realizzazione dell'avamposto;
- Campagne indagine dal 1987 al 2004, nell'area portuale del Porto Commerciale (area non direttamente interessata dalla realizzazione delle opere).

L'ubicazione delle verticali di esplorazione è riportata nelle figure che seguono.

Nella campagna del 2014, eseguita nell'area del futuro tratto di banchina per il prolungamento dell'Antemurale di Ponente, sono stati eseguiti 4 sondaggi (SMP1-SMP4) a carotaggio continuo, 4 pozzetti geognostici e 16 prove asta-punta per la verifica dello spessore della coltre detritica. Durante le perforazioni sono stati prelevati dei campioni oggetto di prove in laboratorio per la determinazione delle caratteristiche fisiche e meccaniche (analisi granulometriche, prove di taglio diretto e prove di compressione monoassiale). Nella documentazione a base di gara sono disponibili i certificati delle prove di laboratorio e le fotografie dei 4 sondaggi.

Nella campagna del 2014, eseguita nella banchina Alti Fondali, sono stati eseguiti 3 sondaggi (S1-S3) a carotaggio continuo. Nel foro di sondaggio S3, per il quale si dispone del report stratigrafico e delle fotografie delle cassette catalogatrici, sono state eseguite un totale di 5 prove penetrometriche dinamiche standard, SPT.

Nella campagna del 2009, eseguita lungo il futuro sviluppo del Nuovo Molo di Levante per la realizzazione dell'avamposto, sono stati eseguiti 7 sondaggi (Sm1-Sm5, Sm7 e Sm9) a carotaggio continuo. Nella documentazione a base di gara sono disponibili i rapporti stratigrafici con le fotografie dei 7 sondaggi e i rapporti di prove di laboratorio di compressione monoassiale eseguite su carote di roccia prelevate in sondaggi non chiaramente identificabili.

Nelle campagne svolte dal 1987 al 2004 nell'area portuale del Porto Commerciale, sono stati eseguiti numerosi sondaggi, sia a terra sia a mare. Nella documentazione a base di gara sono disponibili solamente i rapporti stratigrafici dei sondaggi eseguiti nel 2004.

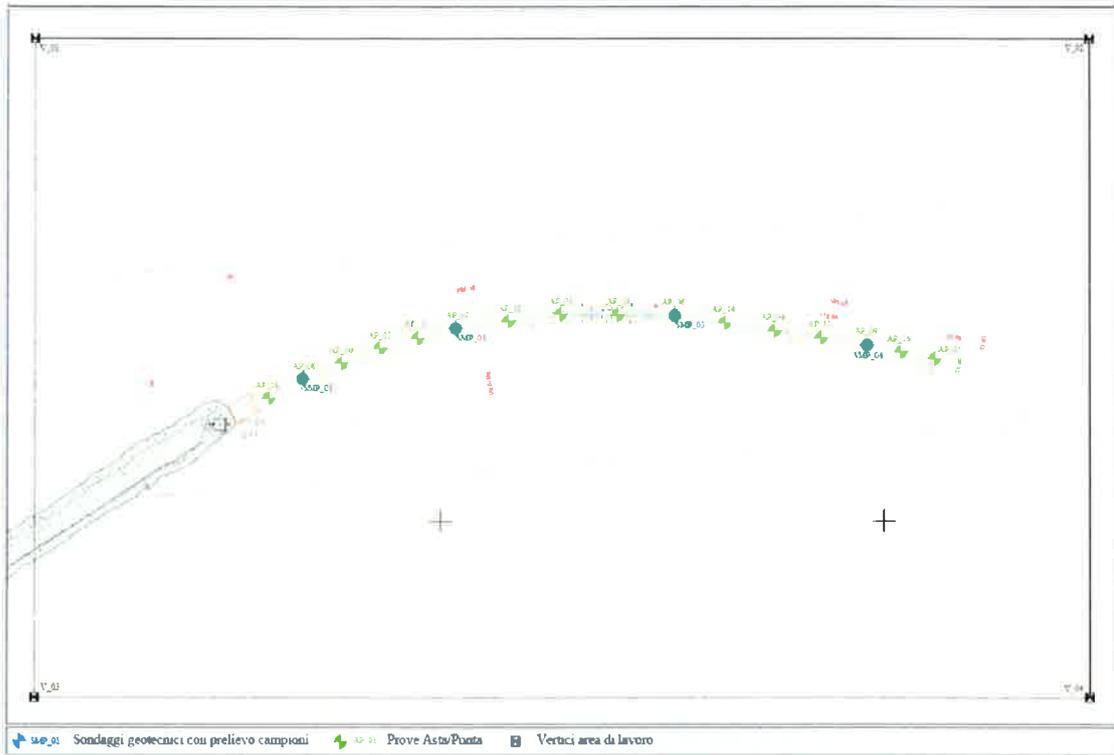


Fig.2.1 Ubicazione indagini Prolungamento antemurale di Ponente

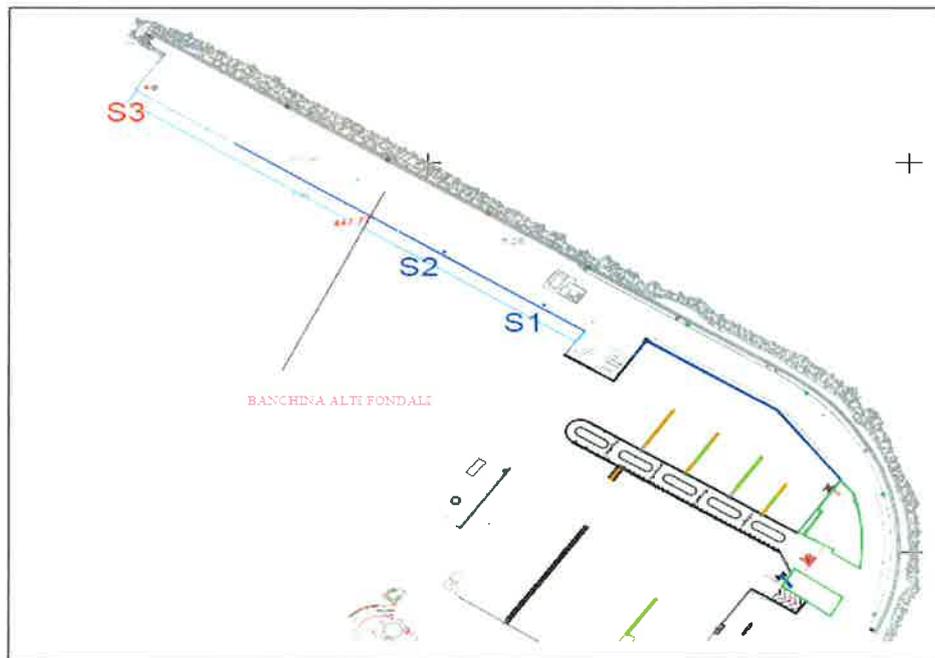


Fig.2.2 Ubicazione indagini Banchina Alti Fondali

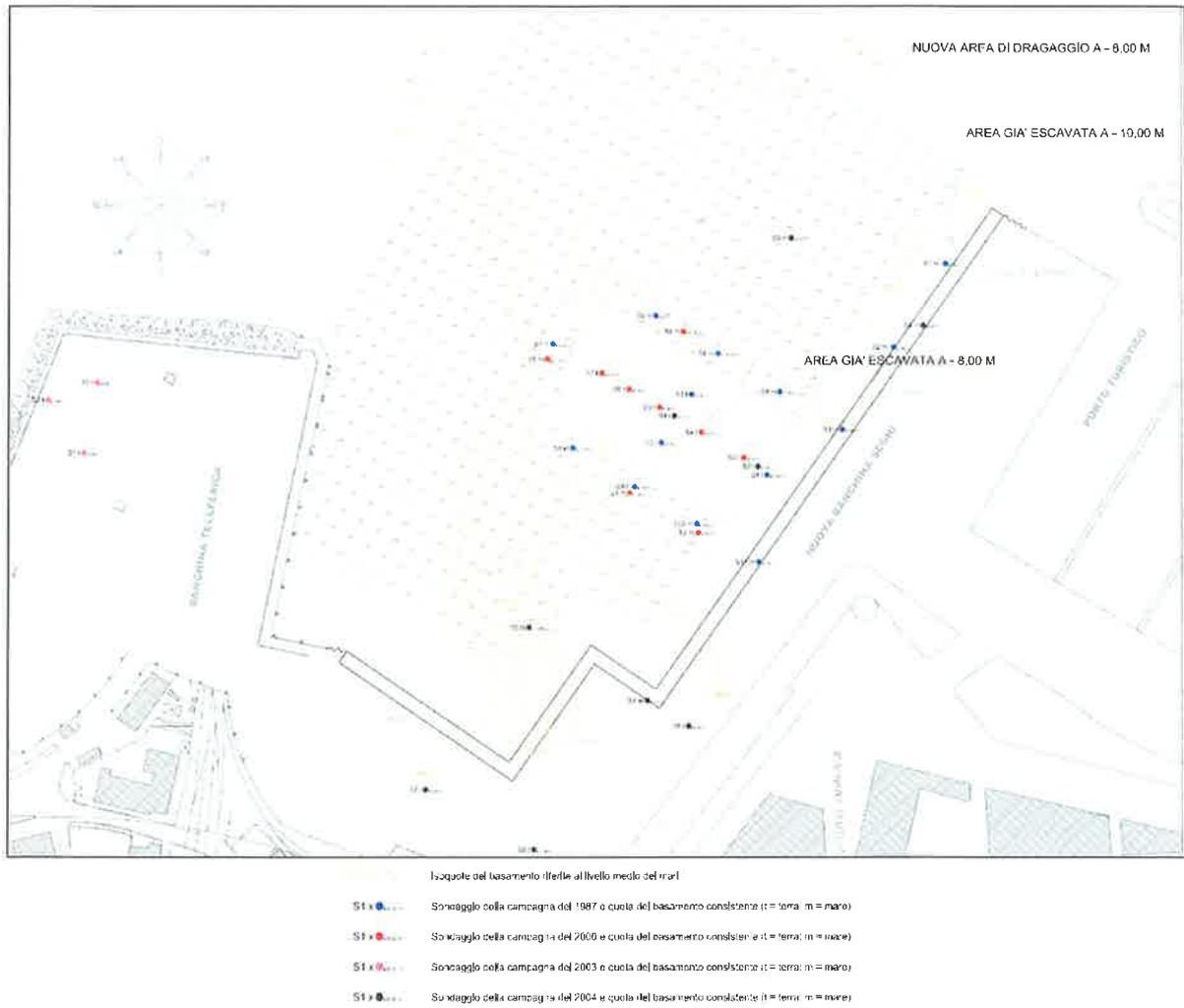


Fig 2.3 Ubicazione indagini Bacino portuale Porto Commerciale

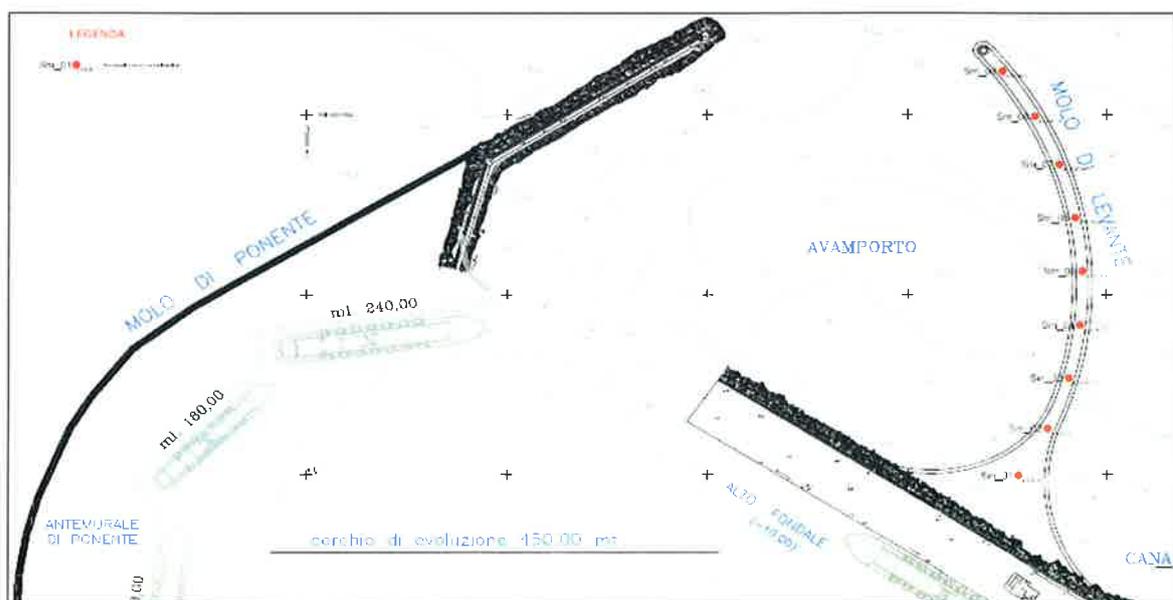


Fig 2.4 Ubicazione indagini Nuovo Molo di Levante

## 2.2 RICOSTRUZIONE STRATIGRAFICA

La ricostruzione stratigrafica delle aree interessate dal prolungamento dell'Antemurale di Ponente e dalla resecazione della Banchina Alti Fondali è stata effettuata facendo riferimento in maniera specifica ai risultati dei sondaggi delle campagne di indagine del 2014, eseguite direttamente in corrispondenza dello sviluppo delle opere; i risultati disponibili relativi alle altre campagne di indagine sono stati considerati ai fini dell'inquadramento geotecnico generale dell'area portuale.

Dall'esame dei profili stratigrafici, nelle diverse verticali indagate si riconosce la presenza di un basamento lapideo costituito da calcareniti, sul quale poggiano i depositi detritici di copertura, di natura prevalentemente sabbiosa; lo spessore di tali litotipi risulta fortemente variabile in relazione all'ubicazione della zona di indagine.

In particolare, nell'area del prolungamento dell'Antemurale di Ponente si riconoscono le unità geotecniche di seguito elencate:

- Depositi detritici sabbiosi (DS); si tratta di sabbie, da medie a grossolane, con presenza di ghiaia, conchiglie e resti algali, di spessore medio pari a 0.40 m;
- Substrato calcarenitico (SC); si tratta dell'unità litoide delle calcareniti.

Nella zona della banchina Alti Fondali oggetto di resecazione, l'analisi del sondaggio S3 del 2014, rileva la presenza di:

- Materiale di banchina (MB); si tratta del corpo e dello strato di fondazione della banchina, costituito da una massicciata con massi e blocchi ed elementi poligenici, fino a 15 m dal piano banchina posto a quota +2 m slm;
- Depositi detritici sabbiosi (DS); si tratta delle sabbie già presenti in corrispondenza dell'Antemurale di Ponente; si presentano da fini a medie, di colore grigio scuro e con consistenza medio-bassa, con livelletti limoso-argillosi fino a 25 m dal piano banchina, per poi passare a sabbie con ciottoli in matrice limoso-argillosa alla base.

## 2.3 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI TERRENI

La determinazione delle caratteristiche meccaniche dei terreni interessati dalla realizzazione delle opere si basa sulla interpretazione delle prove in sito e delle prove di laboratorio relative alle campagne di indagine del 2014.

### 2.3.1. Depositi detritici sabbiosi (DS)

Le analisi granulometriche eseguite su due campioni ricostituiti prelevando terreno dai sondaggi SMP01 e SMP02, relativi alla campagna indagine del 2014 per il prolungamento dell'Antemurale di Ponente, rilevano che il litotipo è composto principalmente da sabbia, con una percentuale superiore al 50%, mentre la frazione argillosa e ghiaiosa si rinviene con percentuali rispettivamente fino al 20% e al 30%.

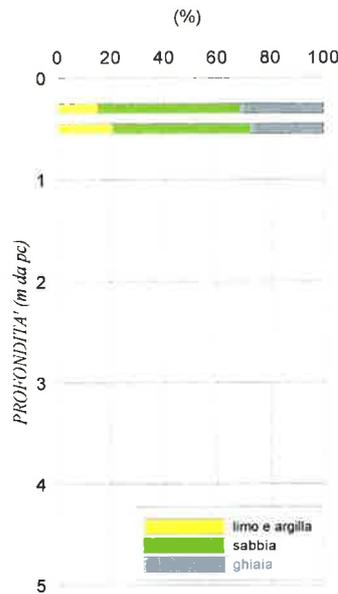


Fig 2.5 Litotipo DS, composizione granulometrica

Nella figura seguente sono riportate in grafico le principali caratteristiche meccaniche del litotipo DS desumibili dalle prove penetrometriche in sito SPT eseguite durante la perforazione del sondaggio S3 relativo alla campagna di indagine sul del 2014 nella banchina Alti Fondali.

Le prove sono state eseguite a profondità comprese tra -14.0 e -23.5 m slm, restituendo generalmente valori di  $N_{SPT}$  compresi tra 3 e 30 (il valore maggiore si registra per la prova eseguita a -23.5 m slm, in corrispondenza dello strato di sabbia media con ciottoli intercettato a fondo foro). La densità relativa risulta quindi compresa tra 0.2 ne 0.55 (Skempton, 1986) e angoli di resistenza al taglio tra  $30^\circ$  e  $36^\circ$ , ottenuti mediante la correlazione di Schmertmann (1978).

Il modulo di Young, stimato mediante la correlazione di Denver, risulta variabile tra 9 e 22 MPa.

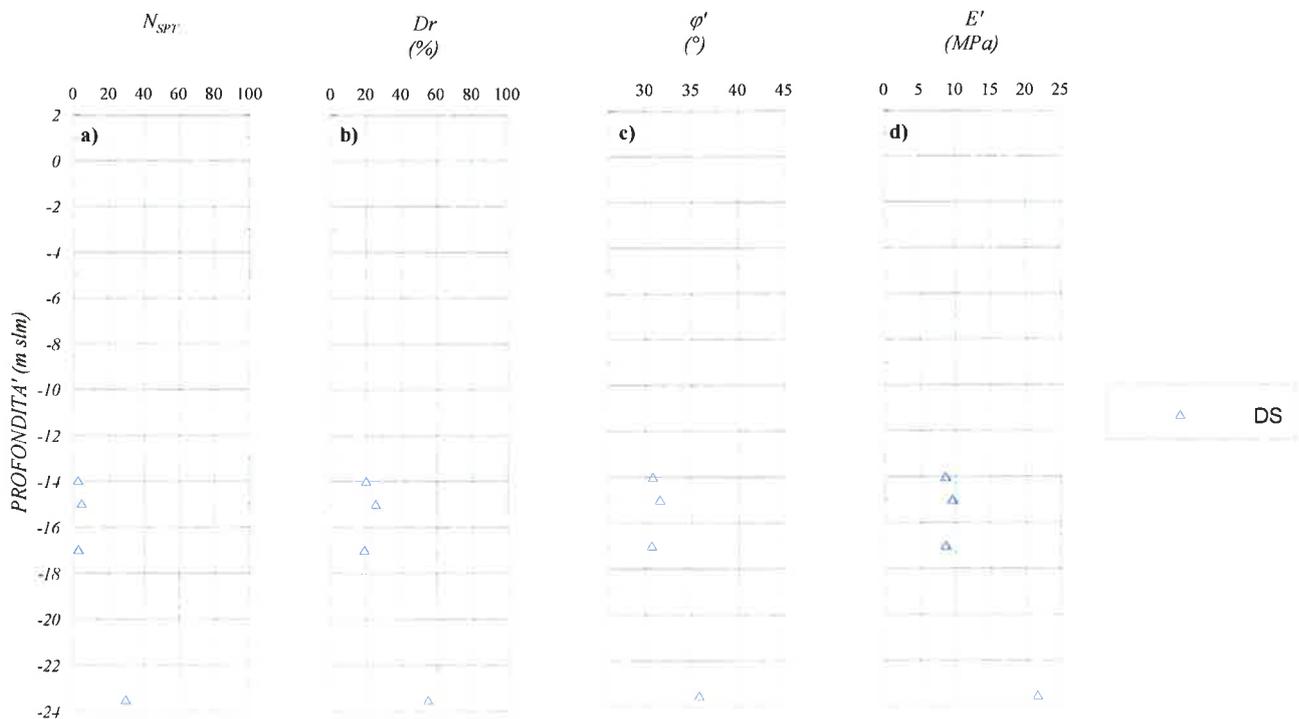


Fig 2.6 Litotipo DS, caratteristiche meccaniche di resistenza e rigidezza

### 2.3.2. Substrato calcarenitico (SC)

Per la caratterizzazione geomeccanica del substrato calcarenitico sono disponibili prove di resistenza a compressione uniassiale ( $\sigma_{ci}$ ) ottenuta su campioni di roccia intatta.

La prova eseguita sul sondaggio SMP02 della campagna di indagine del 2014 per il prolungamento dell'Antemurale del Molo di Ponente restituisce un valore di resistenza a compressione pari a 2.48 MPa. Il peso di volume della carota su cui è stata eseguita la prova è pari a 20.4 kN/m<sup>3</sup>.

## 2.4 MODELLO GEOTECNICO DI SOTTOSUOLO

Dai risultati della caratterizzazione geotecnica, presentati nei paragrafi precedenti, sono state desunte, per ciascuna unità litostratigrafica, le caratteristiche fisico-meccaniche (valori caratteristici) dei litotipi interessati dalla realizzazione delle opere.

Per il litotipo dei depositi sabbiosi (DS) sono stati assunti valori del peso di volume,  $\gamma$ , tipici di questi materiali.

Per il litotipo SC sono stati assunti i parametri di resistenza del progetto a base gara; per i parametri di rigidità si è fatto riferimento a valori di letteratura per la medesima litologia.

Per il materiale costituente lo scanno di imbasamento dei cassoni (IM), la scogliera di protezione del piede lato mare dei cassoni (SP) e il riempimento del cassone (RC) sono stati assunti valori tipici dei parametri geotecnici.

Per il materiale costituente la banchina (MB) sono stati assunti, ai fini delle verifiche, valori cautelativi dei parametri geotecnici.

Si rimanda alla successiva fase progettuale la caratterizzazione di dettaglio dei litotipi presenti mediante opportuna campagna di indagine geognostica integrativa.

Tabella 2-1 Sintesi caratterizzazione geotecnica dei litotipi

Litotipo	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kPa)	$\varphi'$ (°)	$E'$ (MPa)
Materiale di banchina - MB	19	0	30	20
Depositi detritici sabbiosi - DS	18	0	30	10
Substrato calcarenitico - SC	20	100	35	400
Scanno di imbasamento - IM	19	0	40	-
Scogliera di protezione - SP	19	0	40	-
Riempimento del cassone - RC	17	0	25	-

### 3 INQUADRAMENTO SISMICO

Sulla base della vigente normativa (NTC 2008) si rende necessaria la definizione della categoria del sottosuolo di fondazione per le opere in progetto, descritta nella Tabella 3.2.II riportata di seguito, tramite la definizione delle onde S, in particolare della misura della velocità delle onde sismiche,  $V_{s30}$ . Nel dettaglio, la normativa stabilisce che la  $V_{s30}$  deve essere valutata entro i primi 30 m di profondità a partire dalla quota di imposta delle fondazioni.

Tabella 3.2.II – *Categorie di sottosuolo*

Categoria	Descrizione
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di <math>V_{s30}</math> superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m.</i>
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di <math>V_{s30}</math> compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero <math>N_{SPT,30} &gt; 50</math> nei terreni a grana grossa e <math>c_{u,30} &gt; 250</math> kPa nei terreni a grana fina).</i>
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di <math>V_{s30}</math> compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero <math>15 &lt; N_{SPT,30} &lt; 50</math> nei terreni a grana grossa e <math>70 &lt; c_{u,30} &lt; 250</math> kPa nei terreni a grana fina).</i>
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di <math>V_{s30}</math> inferiori a 180 m/s (ovvero <math>N_{SPT,30} &lt; 15</math> nei terreni a grana grossa e <math>c_{u,30} &lt; 70</math> kPa nei terreni a grana fina).</i>
E	<i>Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m, posti sul substrato di riferimento (con <math>V_s &gt; 800</math> m/s).</i>

Per i litotipi in esame non sono state condotte indagini sismiche direttamente nell'area di realizzazione delle opere e si rimanda "ai dati raccolti ed interpretati in precedenti lavori che hanno interessato contesti litologici analoghi a quello ricavato dalle indagini eseguite", come riportato nell'elaborato B.03 Relazione Tecnica Geologica-Geotecnica del Progetto Preliminare del "Prolungamento dell'antemurale di Ponente e resecazione banchina alti fondali 1° e 2° stralcio" posto a base di gara.

Il substrato calcarenitico (SC) e depositi detritici sabbiosi (DS) sono caratterizzati rispettivamente come sottosuolo di categoria sismica B e C.

Si raccomanda l'esecuzione delle opportune indagini sismiche nella successiva fase progettuale.

## 4 CEDIMENTI

### 4.1 VALUTAZIONE DEL CEDIMENTO DELLO SCANNO DI IMBASAMENTO

Le evidenze sperimentali e i dati di letteratura hanno mostrato che i cedimenti dei cassoni sono costituiti da diversi contributi che avvengono a partire dal momento della posa in opera fino al completamento e alla applicazione dei carichi nelle condizioni di esercizio, dovuti ai cedimenti e assestamenti dello scanno di imbasamento e ai cedimenti del terreno di fondazione.

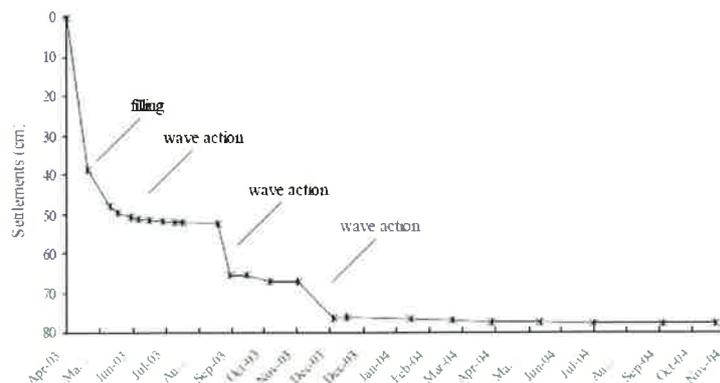
Al momento della posa in opera (varo) dei cassoni, il carico costituito dal peso proprio determina un primo cedimento legato all'assestamento iniziale del contatto cassone-scanno di imbasamento e all'addensamento del materiale costituente lo scanno stesso. Tali fenomeni si ripetono al momento del riempimento dei cassoni, in ragione dell'aumento del peso trasferito alla base del cassone.

Un ulteriore fattore che determina un aumento degli abbassamenti è costituito dall'azione delle mareggiate, il cui effetto è legato, oltre che all'intensità delle mareggiate stesse e all'altezza dello scanno, alla "storia" del cassone, ovvero al tempo trascorso dal varo, all'eventuale presenza del riempimento, alle mareggiate subite in precedenza. Le azioni cicliche indotte dal moto ondoso sul cassone e sui materiali sottostanti costituenti lo scanno, infatti, producono ulteriori addensamenti. Le evidenze sperimentali riportate in letteratura evidenziano come gli effetti delle mareggiate tendano a smorzarsi sino ad esaurirsi al crescere delle numero di mareggiate sperimentate dall'opera.

Ulteriori cedimenti sono infine indotti dalla realizzazione della sovrastruttura, costituita dal massiccio di coronamento e dal muro paraonde, a causa dell'aumento dei carichi associati ai pesi propri e degli effetti indotti dalle mareggiate, che diventano più intensi in presenza del muro paraonde, soprattutto con riferimento alla fase di cresta dell'onda (quelli indotti dalla fase di cavo, infatti, non sono molto diversi da quelli che il cassone sperimenta in assenza delle sovrastrutture).

A questi cedimenti si sommano quelli legati ai terreni di fondazione per effetto degli incrementi di tensione indotti dal peso dei vari elementi di cui l'opera si compone.

Tali evidenze vengono dimostrate anche dai risultati del monitoraggio effettuato sui cassoni dell'antemurale C. Colombo del Porto di Civitavecchia, riportati nello studio condotto dall'ing. Maccarini ("Behaviour of vertical caisson breakwaters under wave-induced cyclic loading", 2005); la figura seguente riporta l'andamento dei cedimenti nel tempo di un cassone e in relazione ai fenomeni occorsi.



filling = riempimento del cassone  
 wave action = azione ordinaria del moto ondoso o mareggiata

Fig 4.1 Andamento nel tempo dei cedimenti del cassone I dell'antemurale esistente (II lotto)

L'entità dei diversi contributi dipende dalle condizioni geometriche delle opere (altezza dello scanno, geometria del cassone), dalla posizione geografica e dalla posizione all'interno dell'area portuale, oltre che dalla situazione stratigrafica del sito.

Appare chiaro pertanto, che la valutazione dell'aliquota dei cedimenti dello scanno di imbasamento attraverso metodi analitici non risulta appropriata ma è necessario far riferimento alle evidenze sperimentali e ai dati di letteratura.

Dall'analisi dei risultati di monitoraggio di opere già realizzate, è possibile stimare un cedimento dello scanno pari a 8 cm per ciascun metro di altezza dello stesso.

### 4.2 RESECAZIONE DELLA BANCHINA ALTI FONDALI

In questo capitolo sono riportate le considerazioni relative ai cedimenti del terreno di fondazione dei cassoni della resecazione della Banchina Alti Fondali, valutati adottando il metodo elastico, implementato nel codice di calcolo FLEA.

La figura seguente mostra la sezione tipo del cassone dell'opera di resecazione: la quota di imbasamento del cassone è pari a -10.8 m slm e l'altezza dello scanno è pari a 1 m.

La successione stratigrafica dell'area, come descritto nel §2.2, è caratterizzata dalla presenza dei depositi detritici sabbiosi (DS) (sondaggio S3 del 2014), le cui caratteristiche meccaniche sono riportate nel §2.3.

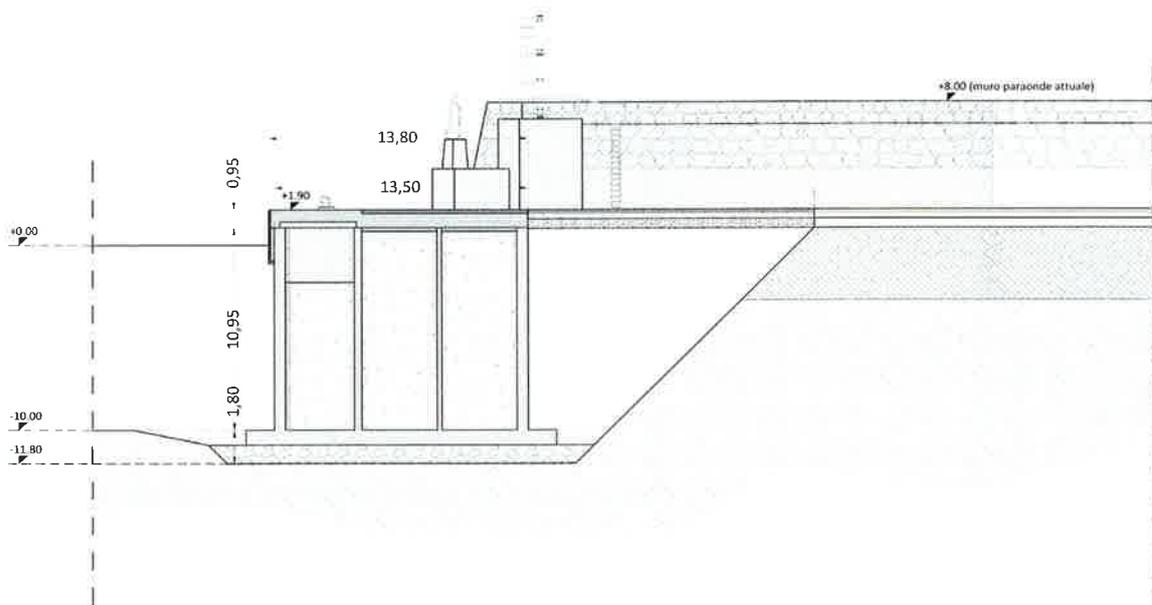


Fig 4.2 Sezione tipo cassoni della resecazione della Banchina Alti Fondali

I cedimenti sono valutati nelle condizioni limite di esercizio (SLE), per la combinazione più gravosa (combinazione rara con applicazione del sovraccarico variabile sul terrapieno e sulla soletta), per la quale le azioni trasmesse al terreno in corrispondenza dell'area rettangolare di impronta della fondazione, di dimensioni pari a 16.5 m x 35.55 m, corrispondono a una distribuzione di pressione trapezia (pressione minima = 154.3 kPa; pressione massima = 202.0 kPa).

Sui terreni di fondazione dei cassoni dell'opera di resecazione sono attualmente trasmessi i carichi indotti dalla Banchina Alti Fondali; pertanto la valutazione dei cedimenti viene condotta considerando:

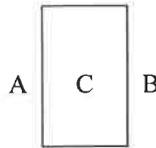
- un valore del modulo di Young di primo carico, pari a 10 MPa, per l'aliquota di pressione trasmessa dalle nuove opere di resecazione eccedente la pressione litostatica totale attuale, calcolata in corrispondenza della quota di imbasamento dello scanno (-11.80 m slm);

- un valore del modulo di Young di scarico-ricarico, pari a 5 volte il valore di primo carico e quindi di 50 MPa, per l'aliquota di carico trasmessa dalle nuove opere di resecazione inferiore alla pressione litostatica totale attuale.

Nel caso in esame si verifica la seconda delle condizioni descritte in precedenza; il cedimento varia da 3.5 cm a 5.9 cm.

La tabella seguente riassume i risultati del calcolo dei cedimenti.

Tabella 4-1 Valutazione dei cedimenti del terreno di fondazione



Punto di calcolo	w1 (cm)
Baricentro area di impronta – punto C	5.9
Mezzeria lato mare – punto A	3.5
Mezzeria lato terra – punto B	4.1

Dalle valutazioni riportate nel §4.1, considerando l'altezza dello scanno pari a 1 m, è possibile stimare un cedimento pari a 8 cm; pertanto il cedimento totale massimo del cassone risulta pari a 13.9 cm.

Nel caso in esame, data la natura dei terreni presenti, i cedimenti avverranno contestualmente all'applicazione delle perturbazioni.

### 4.3 PROLUNGAMENTO DELL'ANTEMURALE DI PONENTE

La figura seguente mostra la sezione tipo del cassone del prolungamento dell'antemurale di ponente in corrispondenza della quale l'altezza dello scanno è massima e pari a 2.2 m circa.

La successione stratigrafica dell'area, come descritto nel §2.2, è caratterizzata dalla presenza dei depositi detritici sabbiosi (DS) per uno spessore ridotto a partire dal fondale marino, pari a 0.40 m circa, sovrastanti il substrato calcarenitico (SC); le caratteristiche meccaniche dei litotipi sono riportate nel §2.3.

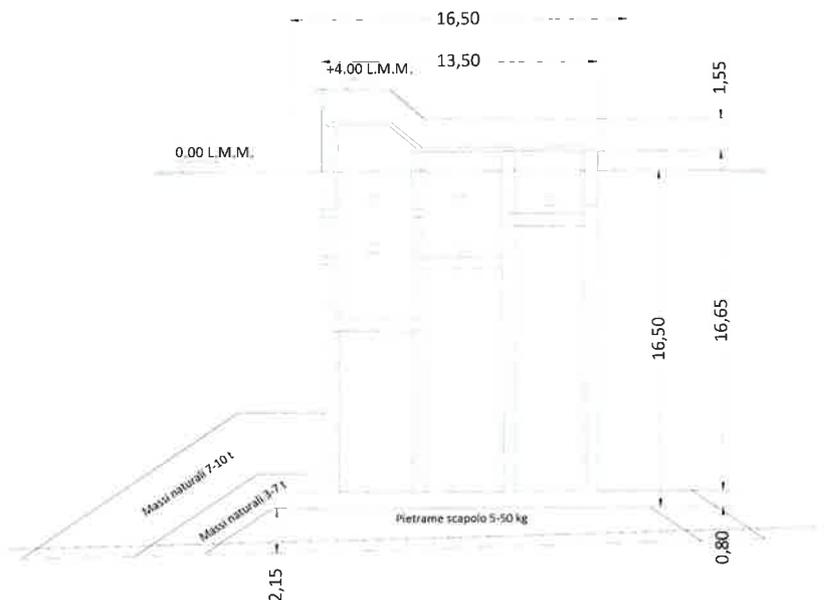


Fig 4.3 Sezione tipo cassoni della prolungamento dell'antemurale di Ponente

In ragione della stratigrafia presente lungo lo sviluppo dell'opera, in cui il tetto del substrato calcarenito è prossimo al fondale marino, e delle caratteristiche meccaniche di rigidità di tale litotipo litoide, si ritiene che il cedimento del cassone sia pari al cedimento dello scanno di imbasamento, trascurando il contributo al cedimento dei terreni di fondazione.

Dalle valutazioni riportate nel §4.1, considerando l'altezza massima dello scanno lungo lo sviluppo dell'opera, pari a 2 m circa, è possibile stimare un cedimento pari a 16 cm.

Nel caso in esame, data la natura dei terreni presenti, i cedimenti avverranno contestualmente all'applicazione delle perturbazioni.

### Riferimenti bibliografici

- De Mello V.F.B. (1971). The standard penetration test. SOA, 4th Panamerican Conf. Soil Mech. Found. Eng., San Juan, Puerto Rico, I, pp. 1-86.
- Denver H. (1982). Modulus of elasticity for sand determined by SPT and CPT. Proc. 2nd European Symposium on Penetration Testing. Amsterdam.
- Flac 5.0- Manuale utente. ITASCA consulting group .
- Lancellotta R. (1987). Geotecnica, Zanichelli.
- Schmertmann, J.H. (1975), Measurement of in-situ shear strength. In Proc. ASCE Spec. Conf. on In-Situ Meas. Soil Prop., volume 2, pages 57-138, Raleigh.
- Schmertmann J.H. (1978). Guidelines for cone penetration test performance and design. Report n° 78-209, U.S. Department of transportation, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- Skempton A. W. (1986). Standard Penetration Test Procedure and the Effects in Sands of Overburden Pressure, Relative Density, Particle Size, Ageing and Overconsolidation. Geotechnique 36, N° 3.
- XSTABL (An Integrated Slope Stability Analysis Program for Personal Computers) v. 5.202: Reference