

AUTORITA' PORTUALE DI BRINDISI

PORTO DI BRINDISI

(Categoria 2[^] --- Classe I[^])

OPERE MARITTIME STRAORDINARIE

PROGETTO:

Lavori di banchinamento in zona Capo Bianco e di dragaggio per l'approfondimento alle quote (-12) e (-9) dei fondali antistanti.
Parte lato EST

- PROGETTO ESECUTIVO -

A cura del Ministero delle Infrastrutture e Trasporti
S.I.I.T. Puglia - Basilicata Settore Infrastrutture
Ufficio Opere Marittime di Bari
(Atto di Convenzione stipulato in data 31.03.1999)

Elaborato in conformità alle osservazioni formulate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici 3[^] Sezione
con voto n° 306 reso nell'adunanza del 08.09.1999

RELAZIONE GEOTECNICA

ALLEGATO

5

il Dirigente pro-tempore
Ing. Francesco Saverio CAMPANALE

il Responsabile del Procedimento
Ing. Donato CAIULO

Bari, li N° di prot.

REDATTO:

Ing. Luigi GAMMARIELLO

Ing. Antonio DE TULLIO

Prof. Vincenzo COTECCHIA

Geom. Giuseppe CAFORIO

Geom. Domenico FIORE

CON LA COLLABORAZIONE:

dell'Ing. Glauco RIOTTA

INDICE

1. PREMESSA	1
2. DESCRIZIONE DEL SITO E LAVORI PREVISTI	4
2.1. Descrizione generale del sito in esame	4
2.2. Opere previste in progetto	4
3. SUCCESSIONE LITOSTRATIGRAFICA RICONOSCIUTA	5
4. PROVE GEOTECNICHE DI LABORATORIO	5
4.1. Introduzione	5
4.2. Prove di ricoscimento e classificazione	6
4.3. Prove di compressione triassiale CIU	7
4.4. Prove di taglio diretto CID	7
4.5. Prove di compressione edometrica	8
5. CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEI TERRENI COSTITUENTI IL FONDALE	8
5.1 Depositi marini recenti sabbioso-limosi	9
5.2 Sabbie con limi giallastre frammiste a noduli calcarenitici	10
5.3 Limi con sabbie grigio-azzurri	11
5.4 Argille grigio-azzurre di base	13
6. ANALISI AMBIENTALI	15
6.1. Quadro normativo in materia di scarico di materiali provenienti dallo scavo dei fondali marini	15
6.2. Primi risultati delle analisi ambientali eseguite ai sensi del D.M. 471/99	16
7. OSSERVAZIONI IN MERITO ALLA POSSIBILITA' DI RIUTILIZZO A COLMATA DEI MATERIALI SCAVATI	18
7.1. Considerazioni generali	18
7.2. Possibilità di riutilizzo a colmata di materiale dragato	20
7.3. Volumi disponibili e volumi utilizzabili	22
7.4. Modalità di prelievo dei materiali del fondale	24
7.5. Utilizzabilità dei materiali per la costruzione della colmata e per il riempimento dei cassoni	26
7.5.1 Esperienze recenti di colmate a mare	26
7.5.2 Caso in esame	27
7.6. Controllo della colmata in fase di costruzione	28
8. CAPACITA' PORTANTE DEI TERRENI DI FONDAZIONE DEI CASSONI CELLULARI E DELLE SCOGLIERE DI CONTENIMENTO	29
8.1 Capacità portante del terreno di fondazione dei cassoni	30
8.2 Capacità portante del terreno di fondazione delle scogliere	31
9. ASSESTAMENTO STIMATO DEL MATERIALE DI COLMATA NON COMPATTATO	31
10. ZONE DI TRANSIZIONE GRANULOMETRICA E PALI DRENANTI	34
10.1 Zone di transizione granulometrica	34
10.2 Pali drenanti	34
11. CALCOLO DEI CEDIMENTI DEI CASSONI	35
11.1 Cedimento immediato	37
11.2 Cedimento a lungo termine (30 anni)	37
11.3 Cedimento di consolidazione	37
APPENDICE A – Attività di sperimentazione e di controllo	

AUTORITA' PORTUALE DI BRINDISI
BRINDISI

PORTO DI BRINDISI, OPERE MARITTIME STRAORDINARIE

Progetto dei "Lavori di banchinamento in zona Capo Bianco e di dragaggio per l'approfondimento alle quote (-12) e (-9) dei fondali antistanti – Parte lato EST"

PROGETTO ESECUTIVO

RELAZIONE GEOTECNICA

1. PREMESSA

L'Autorità Portuale di Brindisi, nell'ambito del Piano di Sviluppo portuale, ha previsto lo spostamento dei depositi di combustibile della Marina Militare dall'attuale sede, posta nel porto interno di Brindisi, alle aree industriali del porto, ubicate nel cosiddetto Porto Esterno e precisamente nell'area di Capo Bianco già destinata dal P.R.P. (Piano Regolatore Portuale) a deposito costiero e ampliamento delle attività industriali (cfr. Fig. 1).

A seguito di convenzione con detta Autorità, l'Ufficio del Genio Civile OO.MM. di Bari (già Ministero dei LL.PP) ha redatto nel 1999 il Progetto dei lavori di banchinamento in zona Capo Bianco e di dragaggio del fondale marino per l'approfondimento alle quote (-12) e (-9) dei fondali antistanti, Parte lato Est. Con nota n. 4665 in data 06/08/1999 il suddetto progetto è stato inviato dalla Direzione Generale OO.MM. al Consiglio Superiore dei LL.PP. per esame e parere.

Il suddetto progetto è stato quindi esaminato dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, Terza sezione, nella seduta del 08/09/1999. Quest'ultima, con Voto n. 306 di protocollo in data 08/09/1999, ha espresso il parere *“che il progetto in esame, da intendersi come progetto definitivo, per i lavori di banchinamento in zona Capo Bianco ed il dragaggio per l'approfondimento alle quote -12 e -9 dei fondali antistanti, Parte lato est, possa essere sviluppato a livello di progetto esecutivo con le prescrizioni espresse nei precedenti considerato e subordinatamente alla avvenuta approvazione dell' adeguamento tecnico funzionale in precedenza richiamato”* .

Fra i considerato la Terza Sezione ha chiesto di *“rivalutare sia in termini tecnici, geotecnici, economici e autorizzativi la possibilità di utilizzare il materiale di scavo, in parte o totalmente, sia per il riempimento retrostante la banchina e si, a con la parte di supero, per il riempimento futuro delle aree adiacenti a quelle in esame”*. *“Quanto sopra, previa una accurata e puntuale indagine geologica e geotecnica, potrebbe comportare una sostanziale economia atteso che in progetto è previsto il riempimento con tout-venant di cava”*. *“Nel pervenire alla scelta di effettuare il riempimento con il materiale proveniente dall'escavo dovranno essere effettuati, nel rispetto della normativa vigente, tutte le verifiche geotecniche necessarie (calcoli dei cedimenti, verifiche di stabilità globale, ecc.)”*.

Pertanto, l'Autorità Portuale, al fine di uniformarsi alle richieste del Ministero dei LL.PP. e procedere correttamente nella redazione del Progetto esecutivo delle opere, ha fatto eseguire una integrazione di indagini geognostiche e geotecniche finalizzate ad acquisire i dati necessari per fornire le risposte ai quesiti della Terza Sezione circa la possibilità di utilizzare i terreni del fondale marino come materiale per la costruzione della colmata e del colmamento dei cassoni previsti in progetto.

Sulla base di apposita Perizia di indagini, l'Autorità Portuale ha appaltato, mediante licitazione privata, i lavori di indagini geognostiche e geotecniche in sito alla ditta IDROGEO S.r.l. di Lecce e le prove geotecniche di laboratorio alla ditta GEO S.r.l. di Bari.

Le indagini geognostiche e geotecniche in sito sono state svolte tra il 19/04/2004 e il 29/07/2004, sotto la continua supervisione dello scrivente in qualità di Direttore Lavori.

L'elaborazione dei dati ottenuti nel corso di detta campagna geognostica, finalizzata a fornire la caratterizzazione geologica e litostratigrafia dei terreni costituenti il fondale marino, è riportata nella "*Relazione geologica*" allegata al presente progetto.

Nella presente relazione, dopo un brevissimo richiamo degli aspetti geologici e stratigrafici dei terreni costituenti il fondale, viene fornita la completa caratterizzazione geotecnica di detti terreni, basata sui risultati delle prove geotecniche di laboratorio svolte.

Rimandando alla Relazione Geologica, per tutto quanto concerne l'inquadramento geologico e litostratigrafico di dettaglio della zona indagata, nella presente relazione vengono illustrate le caratteristiche geotecniche dei terreni costituenti il fondale marino, fornendo i pareri richiesti a riguardo della loro eventuale utilizzazione per i lavori previsti nel citato progetto di banchinamento. In particolare, la finalità della presente relazione è quella di fornire:

- a) un quadro sinottico dei risultati delle prove geotecniche in sito e in laboratorio;
- b) la definizione del modello geotecnico di riferimento del sito, derivante dall'esame delle colonne stratigrafiche e dalle risultanze delle prove in sito e in laboratorio;
- c) la determinazione dei parametri fisici, di resistenza meccanica e di deformabilità dei terreni d'imposta delle opere di banchinamento e dell'area della colmata;
- d) la determinazione della capacità portante dei terreni di imposta delle opere di banchinamento e della colmata ai fini del posizionamento dei depositi POL della M.M.;
- e) il giudizio di idoneità, sotto il profilo geotecnico, dei materiali provenienti dal dragaggio del fondale marino, al fine del loro eventuale riutilizzo per la formazione della colmata.

2. DESCRIZIONE DEL SITO E LAVORI PREVISTI

2.1. Descrizione generale del sito in esame

La zona sottomarina sottoposta ad indagine è situata nell'area del Porto esterno di Brindisi. La zona interessata dalle opere in progetto può essere approssimata ad un trapezio rettangolo, di lati 900 x 350 m circa, posto a NO dalla diga dei Trapanelli, con il lato più lungo orientato a NO-SE ed è limitata a sud-est da una diga artificiale che collega Capo Bianco all'isola di 'Pedagna Grande'.

Le informazioni batimetriche mostrano che il fondale diventa gradualmente più profondo spostandosi dalla linea di costa verso Nord Ovest, con la profondità dell'acqua che aumenta da 2 m circa (in prossimità della costa) a 10 m circa lungo il perimetro nord dell'area da dragare.

2.2. Opere previste in progetto

Il progetto del deposito di carburante per la Marina Militare Italiana prevede le seguenti opere:

- a) una banchina di riva in cassoni cellulari in calcestruzzo prefabbricati,
- b) un piazzale a quota +3 m s.m., ottenuto colmando un tratto di mare delimitato dalla suddetta banchina e dalla attuale linea di costa,
- c) il dragaggio dei fondali antistanti la banchina per l'approfondimento delle quote degli stessi.

Più in dettaglio, è stato previsto di colmare un'area di mare approssimativamente di 66.000 m² che costituirà la piattaforma su cui poggeranno i serbatoi di nafta e le strutture ausiliari associate. La profondità dell'acqua nell'area di colmata varia da 2 m a 6 m. Il materiale necessario per la colmata è stato stimato in 429.000 m³.

I lavori di dragaggio copriranno un'area di 235.000 m² circa, suddivisa in due distinte zone definite da differenti livelli di dragaggio di -9 m e -12 m, per un volume di dragaggio totale pari a 1.115.000 m³ circa. L'estensione della zona da dragare fino a -9

m s.m., adiacente alla banchina, è pari a 25.000 m² circa, mentre quella da approfondire fino a - 12 m s.m. è pari a 210.000 m² circa.

3. SUCCESSIONE LITOSTRATIGRAFICA RICONOSCIUTA

Rimandando per i dettagli alle stratigrafie dei sondaggi geognostici, allegati alla citata Relazione Geologica, i litotipi attraversati dalle perforazioni meccaniche sono stati ricondotti, anche sulla scorta dei risultati delle prove geotecniche di laboratorio svolte, ai seguenti quattro livelli litostratigrafici principali, dall'alto verso il basso:

- a) Depositi marini recenti sabbioso-limosi, con presenza a luoghi di noduli calcarenitici e calcarei e di sostanza organica.
- b) Sabbie con limi e limi con sabbie, di colore giallo ocra, a luoghi debolmente argillosi e frammisti a noduli calcarenitici (Formazione di Gallipoli - Unità litologica superiore)
- c) Limi con sabbie da debolmente argillosi ad argillosi, di colore grigio-azzurro (Formazione di Gallipoli - Unità litologica delle argille grigio-azzurre)
- d) Argille con limi sabbiose di colore grigio-azzurro (Formazione di Gallipoli - Unità litologica delle argille grigio-azzurre)

Identico assetto litostratigrafico è stato riscontrato in corrispondenza della zona di raccordo compresa fra l'area POL e l'area GNL, come si evince dall'esame delle stratigrafie dei sondaggi eseguiti in detta zona a cura della British Gas.

4. PROVE GEOTECNICHE DI LABORATORIO

4.1. Introduzione

Il piano delle indagini geotecniche di laboratorio è stato stabilito in modo da indagare le caratteristiche fisico-meccaniche sia degli strati più superficiali del fondale (anche al fine dell'eventuale riutilizzo di detti terreni come materiale da costruzione in

colmata) che degli strati più profondi interessati dai carichi trasmessi dalle strutture di fondazione delle banchine, nonché, in previsione, delle strutture di fondazione dei due serbatoi da realizzarsi al di sopra della colmata, il cui progetto seguirà quello delle opere di banchinamento.

Le prove geotecniche di laboratorio sono state eseguite tra Luglio e Dicembre 2004 dalla ditta GEO S.r.l. di Bari. Dette prove di laboratorio hanno riguardato 73 campioni che sono stati selezionati tra i 114 prelevati. I certificati di prova sono contenuti in quattro Rapporti di progresso datati rispettivamente 27/8/2004, 27/9/2004, 19/11/2004 e 22/12/2004 (in possesso dell'Autorità Portuale).

Le prove sono state svolte secondo quanto previsto dalla vigente normativa:

- AGI (1994) "Raccomandazioni sulle prove geotecniche di laboratorio";
- CNR UNI 10010/64 "Prove sulle terre. Peso specifico di una terra";
- CNR UNI 10013/64 "Prove sulle terre. Peso specifico di una terra";
- CNR UNI 10014/64 "Prove sulle terre. Determinazione dei limiti di consistenza (o di Atterberg) di una terra".

Per le prove non comprese in detti riferimenti normativi si è fatto riferimento a normative tecniche straniere, ed in particolare alle seguenti:

- Gran Bretagna: B.S. 1377 - B.S. 5930
- U.S.A. : ASTM.

Nei paragrafi che seguono vengono illustrate, nelle loro linee generali, le prove geotecniche di laboratorio eseguite sui terreni. Nel capitolo 5 è esposta la caratterizzazione geotecnica dei litotipi individuati attraverso i sondaggi eseguiti.

4.2. Prove di riconoscimento e classificazione

Prove di caratterizzazione fisica sono state eseguite su tutti i campioni e hanno compreso la determinazione del contenuto naturale d'acqua, del peso dell'unità di volume totale, del peso di volume del secco e del peso specifico dei granuli. Sui campioni di materiale coesivo sono stati determinati, inoltre, i limiti liquido e plastico al fine di definirne il grado di plasticità.

L'analisi granulometrica per setacciatura è stata eseguita su tutti i campioni aperti, mentre l'analisi per sedimentazione è stata condotta solo per i campioni aventi una percentuale passante al setaccio ASTM 200 superiore al 10%. L'analisi per setacciatura è stata eseguita a umido mediante setacci della serie ASTM; l'analisi per sedimentazione della frazione fine (passante al setaccio n. 200) è stata eseguita a mezzo densimetro.

Inoltre su alcuni campioni, sia sabbiosi che limoso-argillosi, sono state effettuate determinazioni del contenuto in sostanza organica e in carbonati.

4.3. Prove di compressione triassiale CIU

Prove di compressione triassiale, consolidate isotropicamente e non drenate, sono state eseguite sui campioni di terreno coesivo al fine di determinare i parametri di resistenza al taglio, sia in termini di tensioni totali che efficaci. Per ogni prova è stata prevista la rottura di tre provini. Le prove sono state eseguite, secondo le Raccomandazioni AGI - 1994, su provini cilindrici di dimensioni $D=38\text{mm}$ e $H=76\text{mm}$, con tensioni di consolidazione variabili tra 260 e 920 kPa. Durante le prove triassiali è stato anche eseguito il rilevamento delle pressioni interstiziali.

4.4. Prove di taglio diretto CID

Prove di taglio diretto consolidate isotropicamente e drenate (CID) sono state eseguite sui campioni sabbiosi e limosi superficiali, al fine di determinare i parametri di resistenza in termini di tensioni efficaci. Per ogni prova è stata prevista la rottura di tre provini, e, per ogni provino, la fase di taglio è stata eseguita in 24 ore, in accordo con quanto prescritto dalle Raccomandazioni AGI, al fine di garantire che la prova avvenisse in condizioni drenate. Le prove sono state eseguite applicando pressioni verticali variabili tra 130 e 420 kPa. Le prove di taglio sono state corredate dalle determinazioni, effettuate su ogni provino sottoposto a prova, del peso di volume del secco e del contenuto d'acqua iniziale e finale.

4.5. Prove di compressione edometrica

Prove di compressione edometrica, a rigonfiamento impedito, sono state eseguite al fine di determinare le caratteristiche di compressibilità dei terreni costituenti i fondali. Inoltre, per i campioni di terreno coesivo, dette prove consentono la determinazione del coefficiente di consolidazione primaria (c_v). Le prove sono state eseguite, in conformità con le Raccomandazioni AGI - 1994, su provini cilindrici di dimensioni $D=56$ mm e $H=20$ mm, utilizzando i seguenti 10 gradini di carico (in termini di σ'_v): 10, 20, 40, 80, 150, 300, 600, 1200, 2500 e 5000 kPa, ognuno dei quali è stato mantenuto per 24 ore. In fase di scarico, invece, sono stati utilizzati solo 5 gradini di carico pari a 1200, 300, 80, 20 e 10 kPa. I risultati sono stati restituiti graficamente nel piano (e -log σ'_v). Inoltre per ogni prova sono stati forniti 3 diagrammi cedimento-tempo in corrispondenza dei gradini di carico 1200, 2500 e 5000 kPa.

5. CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEI TERRENI COSTITUENTI IL FONDALE

In questo capitolo vengono illustrate le caratteristiche geotecniche dei terreni costituenti il fondale marino.

Sono stati sottoposti a prova 73 campioni indisturbati appartenenti ai quattro litotipi intercettati dai sondaggi, suddivisi come di seguito:

	Depositi recenti sabbioso-limosi	Sabbie con limi	Limi con sabbie	Argille di base
n° campioni	8	11	43	11

I risultati delle prove effettuate sono riportati nei Rapporti ufficiali della GEO S.r.l. di Bari, a cui si rimanda.

Sulla base delle prove geotecniche di laboratorio effettuate è stata eseguita la caratterizzazione geotecnica dei litotipi attraversati esposta nel seguito. Detti dati sono stati inoltre integrati con i risultati delle prove geotecniche in sito, costituite da prove

penetrometriche dinamiche SPT, eseguite nel corso della esecuzione dei sondaggi geognostici, i cui risultati sono riportati nella Relazione Geologica e nel Rapporto della ditta IDROGEO S.r.l. (in possesso dell'Autorità Portuale).

5.1. Depositi recenti sabbioso-limosi

Depositi di recente deposizione sono stati rinvenuti in tutti i sondaggi geognostici terebrati nell'area di indagine, con spessori variabili da poche decine di centimetri fino a 8-9 m nei sondaggi più distanti dalla linea di costa (v. Fig. 2). Nell'area più prossima alla costa, compresa tra Capo Bianco e l'Isola di Pedagna Grande, tali depositi sono largamente eterogenei e sono costituiti generalmente da un'alternanza di livelli di sabbia con limo e limo con sabbia con a luoghi sparsi ciottoli a spigoli vivi o sub-arrotondati di materiale calcarenitico e calcareo. Nei livelli superiori si rinviene, talora, materiale organico fresco e decomposto. Nell'area più a largo della zona investigata, dove detti depositi raggiungono spessori di diversi metri, questi si presentano più uniformi e costituiti prevalentemente da sabbie limose con livelli di materiale organico in fase di decomposizione, rinvenuti fin oltre i 2 m di profondità.

Nella Tabella 1 sono riportati i risultati delle prove di riconoscimento e delle prove meccaniche svolte sui campioni prelevati in tali depositi.

Dall'esame di detti risultati si evince che nell'area racchiusa tra Capo Bianco e l'isola Pedagna Grande (campioni prelevati dai sondaggi SB, SD e SC, cfr. Fig. 2) i terreni in esame sono granulometricamente costituiti da alternanze di limi con sabbia e di sabbie con limi debolmente argillosi (frazione sabbiosa SF = 38-67%, frazione limosa MF = 17-78%, frazione argillosa CF = 5-10%). Nell'area più al largo (campioni SL1-C1 e SL2-C1) i depositi marini recenti sono invece costituiti essenzialmente da sabbie limose (frazione sabbiosa SF = 80-81%, frazione limosa MF = 14-15%, frazione argillosa CF = 3-4%). In tutta l'area investigata tali depositi si presentano poco addensati, come evidenziato dai valori del peso di volume del secco e della porosità ($n = 40-43\%$, $\gamma_d = 1,53-1,64 \text{ g/cm}^3$).

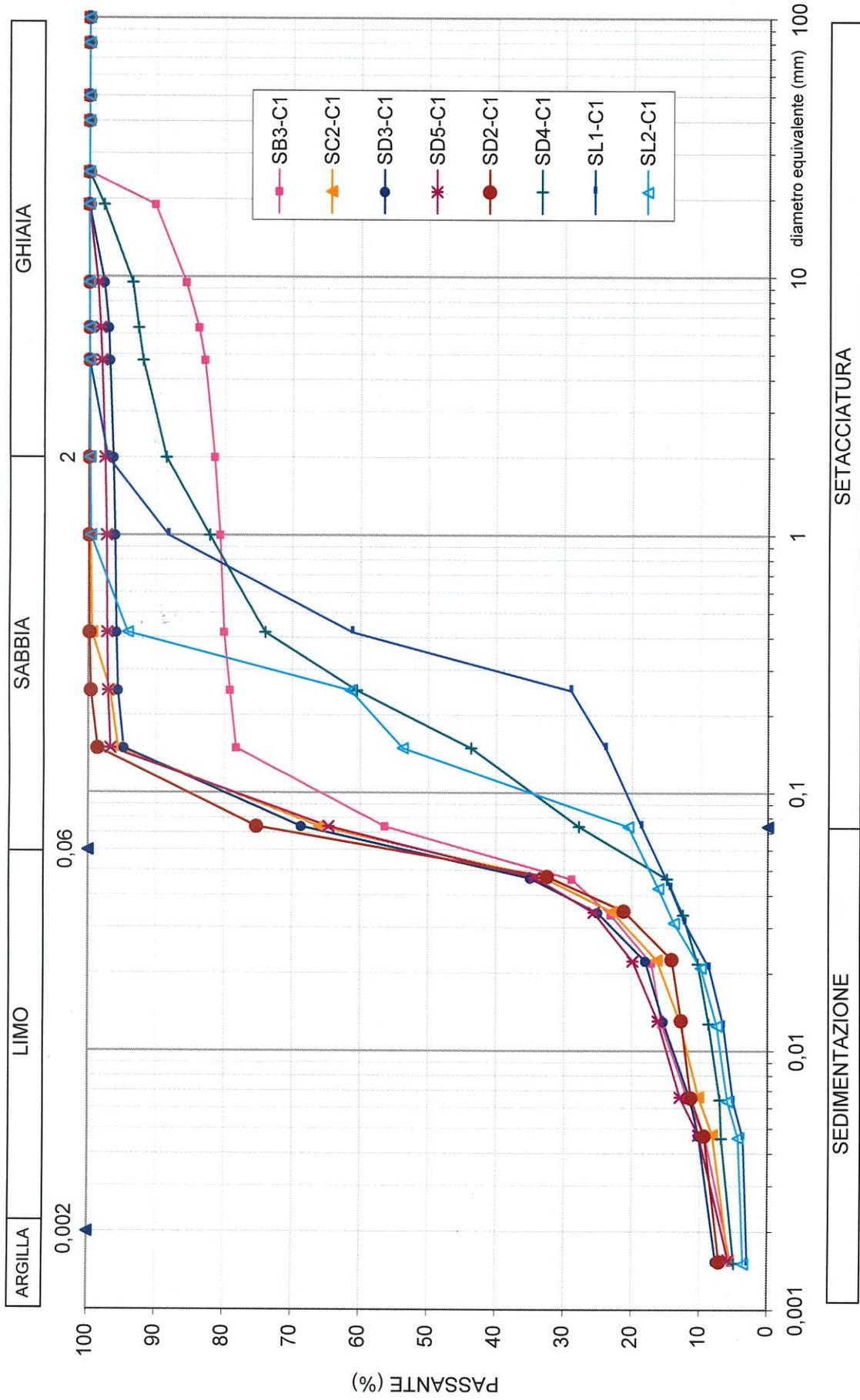


Fig. 2 - Depositi recenti sabbioso-limosi: Curve granulometriche

Tabella 1 - Depositi recenti sabbioso-limosi: Quadro riassuntivo delle prove di laboratorio eseguite

Camp No.	Prof. (m)	A (%)	L (%)	S (%)	G (%)	WL (%)	WP (%)	IP (%)	Yr (g/cm ³)	Yt (g/cm ³)	Yd (g/cm ³)	w (%)	e	n (%)	s (%)	$\sum \sigma_{\Sigma}$	c' (kN/m ²)	Ø' (°)	Sostanza Organica (%)	OCR	
B3/C1	1.0-1.5	6	38	38	19	0	0	0	2,72	1,96	1,62	21	0,681	41	84			37,73			
C2/C1	1.5-2.0	6	45	49	0	0	0	0	2,70	1,98	1,56	27	0,722	42	100					0,2	
D2/C1	3.5-3.9	8	78	45	0	0	0	0	2,71	2,01	1,62	24	0,674	40	98			37,17			
D3/C1	2.0-2.5	8	45	43	4	0	0	0	2,71	2,02	1,61	25	0,675	40	100			37,58			
D3/C2	4.0-4.5	10	51	38	1	0	0	0	2,73	2,02	1,61	25	0,690	41	100			46,14		0,1	
D4/C1	1.0-1.5	5	17	67	11	0	0	0	2,7	1,96	1,53	28	0,766	43	99			45,46		0,1	
D5/C1	2.0-2.5	7	44	47	2	0	0	0	2,67	1,98	1,54	29	0,736	42	100			43,55			
L1/C1	3.0-3.5	3	14	80	3	0	0	0	2,7	2,02	1,62	25	0,666	40	100					0,1	
L2/C1	8.5-9.0	4	15	81	0	0	0	0	2,71	2,01	1,64	23	0,656	40	94						
MEDIA		6	39	54	4				2,71	2,00	1,59	25	0,696	41	97			41,27		0,1	
SCARTO		2	21	17	6				0,02	0,03	0,04	2	0,037	1	5			4,23		0,1	
MINIMO		3	14	38	0	0	0	0	2,67	1,96	1,53	21	0,66	40	84			37,17		0,1	
MASSIMO		10	78	81	19	0	0	0	2,73	2,02	1,64	29	0,77	43	100			46,14		0,2	

Per quanto riguarda le caratteristiche di resistenza meccanica, sulla scorta dei risultati delle prove di taglio diretto svolte su quattro campioni ed elaborati col metodo dei punti di sollecitazione, esse sono esprimibili, in termini di tensioni efficaci, attraverso i seguenti parametri (Fig. 3):

$$c' = 0,18^\circ \qquad \phi' = 38^\circ$$

Sulla scorta dei risultati delle prove penetrometriche dinamiche, invece, la resistenza meccanica può essere espressa attraverso il parametro $\phi' = 34^\circ$.

Infine, per quanto riguarda la compressibilità di questi terreni, dall'esame delle curve di compressibilità edometrica si trae che il materiale in esame presenta compressibilità media, come evidenziato dai parametri $C_c = 0,074$ e $M = 450 \text{ kg/cm}^2$ relativi all'intervallo di carico $6-12 \text{ kg/cm}^2$.

5.2. Sabbie con limi giallastre frammiste a noduli calcarenitici

Nella maggior parte dei sondaggi, al di sotto dei depositi recenti, è stato intercettato del materiale sabbioso-limoso di colore giallastro frammisto a noduli calcarenitici, appartenente alla unità litostratigrafica superiore della cosiddetta Formazione di Gallipoli. Detto strato, rilevato ad una profondità compresa tra $0,20$ e $5,50 \text{ m}$ dal fondale marino, presenta uno spessore massimo rilevato di $6,20 \text{ m}$ e va assottigliandosi fino a scomparire del tutto verso il largo.

Nella Tabella 2 sono riportati i risultati delle prove di riconoscimento e delle prove meccaniche svolte sui campioni prelevati in questo strato.

Dall'esame di detti risultati si evince che i terreni in esame sono granulometricamente costituiti da alternanze di sabbie limose e limi sabbiosi, localmente debolmente argillosi (frazione sabbiosa SF = $33-53\%$, frazione limosa MF = $30-58\%$, frazione argillosa CF = $2-9\%$) (Fig. 4), privi di plasticità ($W_L = W_P = 0$), a luoghi poco addensati, come evidenziato dai valori del peso di volume del secco e della porosità ($n = 38-42\%$, $\gamma_d = 1,56-1,71 \text{ g/cm}^3$).

Per quanto riguarda le caratteristiche di resistenza meccanica, sulla scorta dei risultati di otto prove di taglio diretto svolte, elaborati col metodo dei punti di

Tabella 2 - Sabbie con limi giallastre: Quadro riassuntivo delle prove di laboratorio eseguite

Camp No.	Prof. (m)	A (%)	L (%)	S (%)	G (%)	WL (%)	WP (%)	IP (%)	Yr (g/cm ³)	Yt (g/cm ³)	Yd (g/cm ³)	w (%)	e	n (%)	s (%)	ΣΣΣ	c' (kN/m ²)	Ø' (°)	Sostanza Organica (%)	OCR	
B3/C2	4.0-4.5	3	42	52	4	0	0	0	2,71	2,00	1,58	26	0,713	42	100	ML		34,4			
C1/C1	3.0-3.5	2	43	53	3	0	0	0	2,70	1,99	1,56	27	0,728	42	100	ML		33,7	0,1		
C4/C1	1.0-1.5	4	45	47	4	0	0	0	2,71	2,04	1,61	26	0,685	41	100	ML		37			
D6/C1	1.5-2.0	7	30	35	28	0	0	0	2,70	2,01	1,61	25	0,675	40	100	SW		37			
D7/C2	2.5-2.6	5	49	46	0	0	0	0	2,70	2,06	1,67	23	0,617	38	100	ML					
D7/C3	3.5-3.6	5	47	46	2	0	0	0	2,71	2,06	1,67	24	0,625	38	100	ML					
D8/C1	1.0-1.5	9	39	51	1	0	0	0	2,70	1,99	1,57	27	0,722	42	100	ML		40,7			
D8/C2	2.5-3.0	4	31	40	24	0	0	0	2,71	2,03	1,64	24	0,654	40	98	SW		39,2			
L3/C1a	6.5-7.0	5	33	49	12	0	0	0	2,69	2,07	1,71	21	0,576	37	99	ML					
L3/C1b	6.5-7.0	9	58	33	0	0	0	0	2,71	2,05	1,66	24	0,632	39	100	ML					
MEDIA		5	42	45	8				2,70	2,03	1,63	25	0,663	40	100			37,0	0,10		
SCARTO		2	9	7	10				0,01	0,03	0,05	2	0,051	2	1			2,68			
MINIMO		2	30	33	0				3	2	2	21	1	37	98			34	0,1		
MASSIMO		9	58	53	28				3	2	2	27	1	42	100			41	0,1		

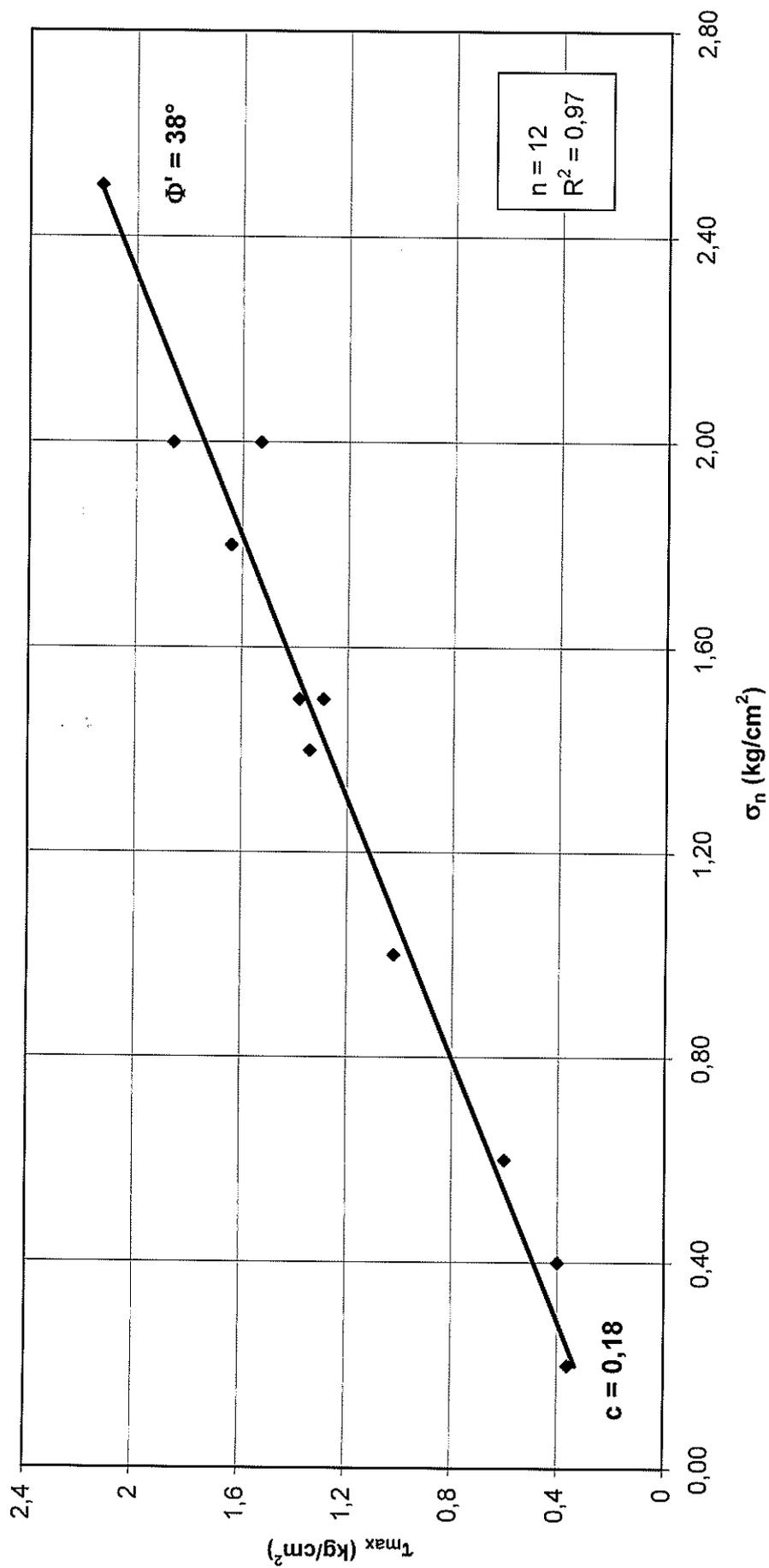


Fig. 3 - Depositi recenti sabbioso-limosi: Prove di taglio diretto TD CID. Rappresentazione col metodo dei punti di sollecitazione

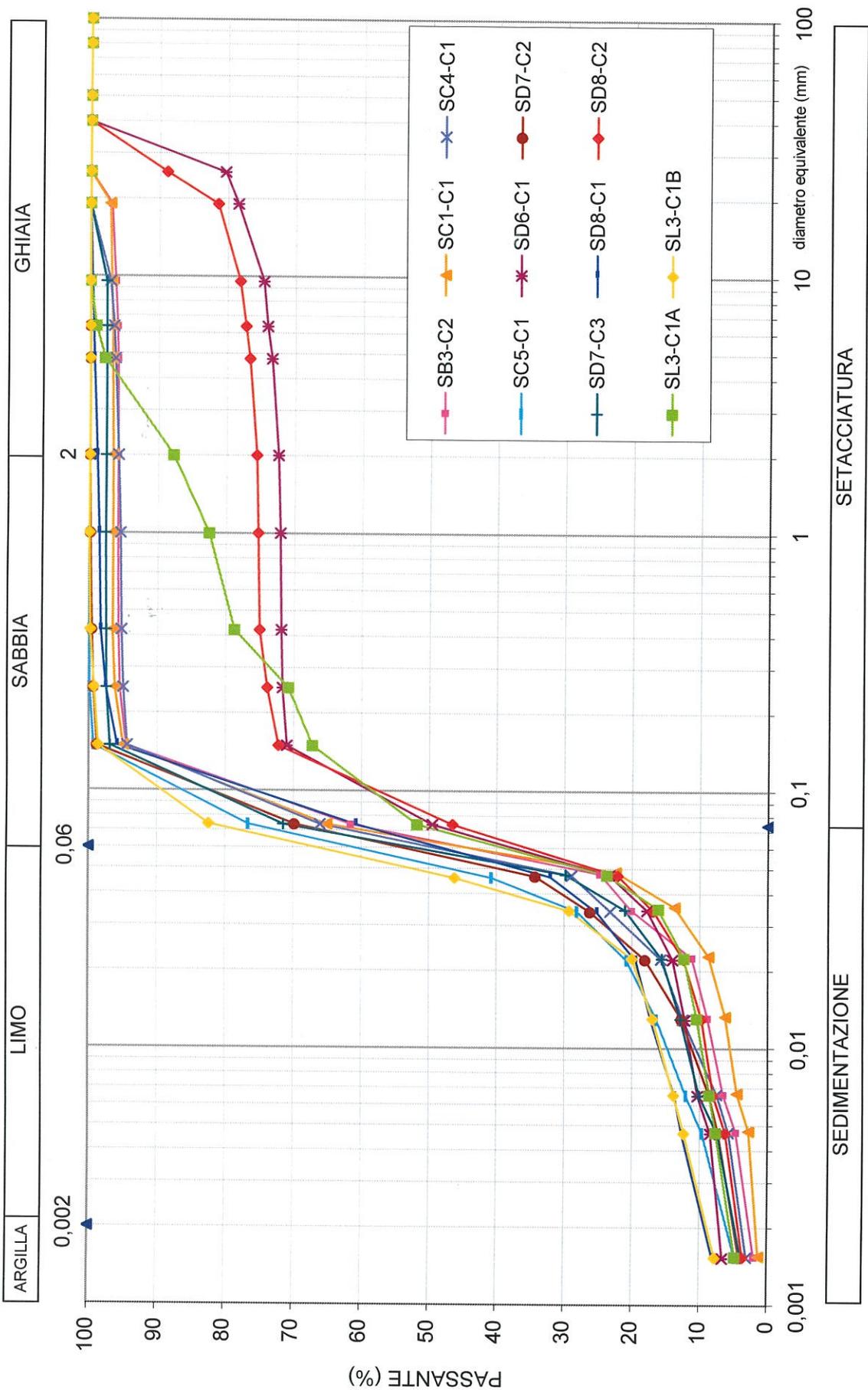


Fig. 4 - Sabbie con limi giallastre frammitte a noduli calcarenitici: Curve Granulometriche

sollecitazione, esse sono esprimibili, in termini di tensioni efficaci, attraverso i seguenti parametri (Fig. 5):

$$c' = 0,20 \text{ Kg/cm}^2 \quad \phi' = 38^\circ.$$

In Figura 6 è riportato l'andamento della resistenza penetrometrica in funzione della profondità, a partire dal fondale. La dispersione dei valori è verosimilmente dovuta alla presenza di ciottoli e/o livelletti cementati disposti casualmente all'interno del deposito. Sulla scorta dei risultati delle prove penetrometriche dinamiche, comunque, con riferimento ad un valore mediato di $N_{\text{SPT}} = 34$, la resistenza meccanica può essere espressa attraverso il parametro $\phi' = 37^\circ$.

Infine, per quanto riguarda la compressibilità di questi terreni, dall'esame delle curve di compressibilità edometrica (Fig. 7) si trae che il materiale in esame presenta compressibilità media, come evidenziato dai parametri $C_c = 0,06-0,087$ e $M = 390-500 \text{ kg/cm}^2$ relativi all'intervallo di carico $6-12 \text{ kg/cm}^2$.

5.3. Limi con sabbie grigio-azzurri

In tutti i sondaggi effettuati, al di sotto dei depositi recenti o delle sabbie con limi giallastre, è stato individuato uno strato di terreno costituito prevalentemente da limi con sabbia di colore grigio-azzurro, con presenza di occasionali e sottili strati di argilla ($s < 200\text{mm}$), appartenente alla cosiddetta Formazione di Gallipoli. Al tetto lo strato in esame presenta alcuni livelli di sabbia con limo mentre verso la base si osserva un aumento della frazione argillosa. Questo strato, rilevato ad una profondità compresa tra 2,20 m e 9,50 m sotto il livello del fondale marino, ha spessore variabile da 13,50 m a 18,30 m.

Nella Tabella 3 allegata sono riportati i risultati delle prove geotecniche svolte.

Dall'esame di detti risultati si evince che i terreni in esame sono granulometricamente costituiti da una sequenza di sabbia con limi e limi con sabbia da debolmente argillosi ad argillosi (frazione sabbiosa SF = 18-85%, frazione limosa MF = 14-70%, frazione argillosa 2-13%) (Fig. 8), privi di plasticità ($W_L=W_P=0$), a luoghi

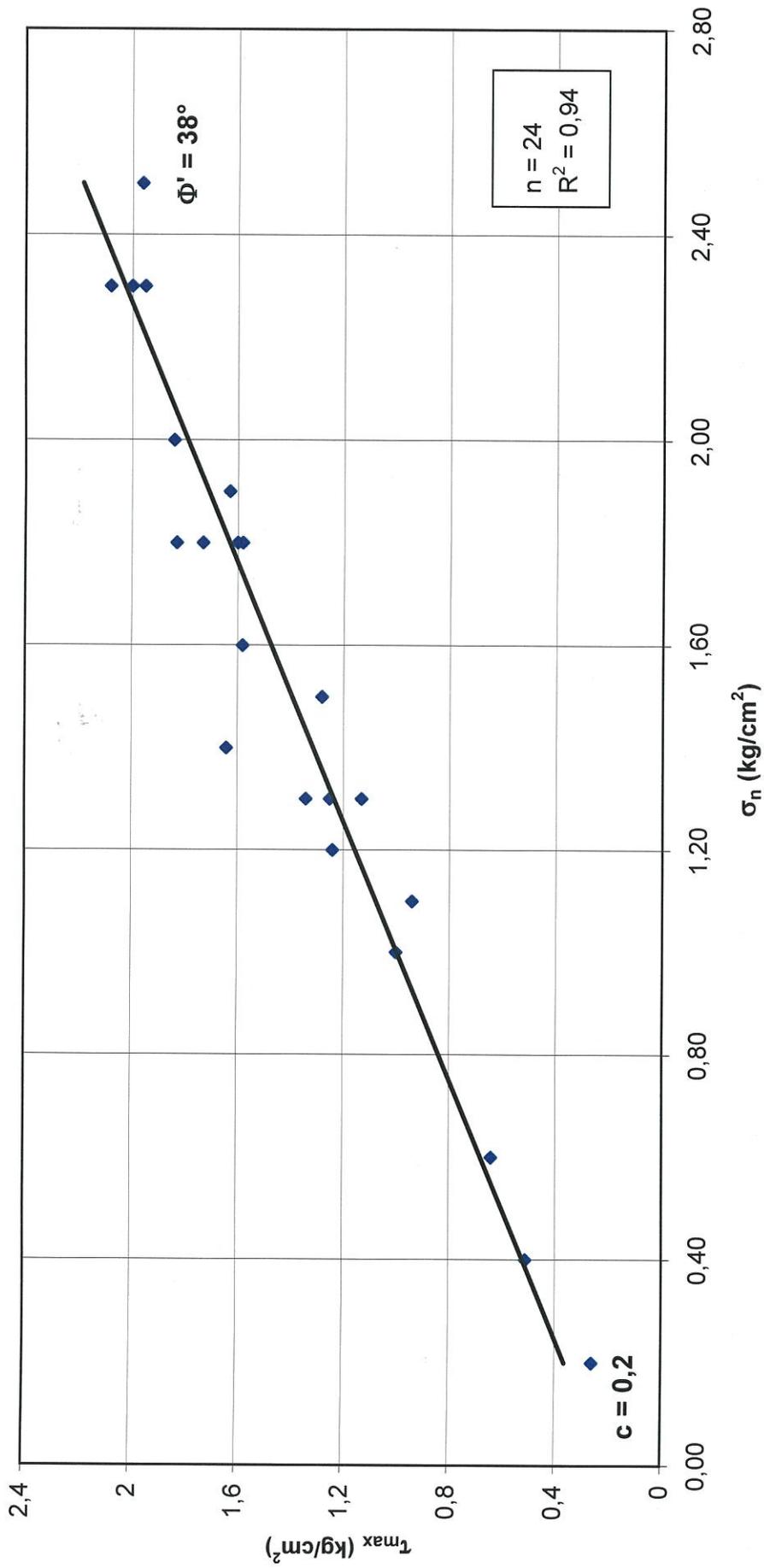


Fig. 5 - Sabbie con limi giallastre frammiste a noduli calcarenitici: Prove di taglio diretto TD CID. Rappresentazione col metodo dei punti di sollecitazione

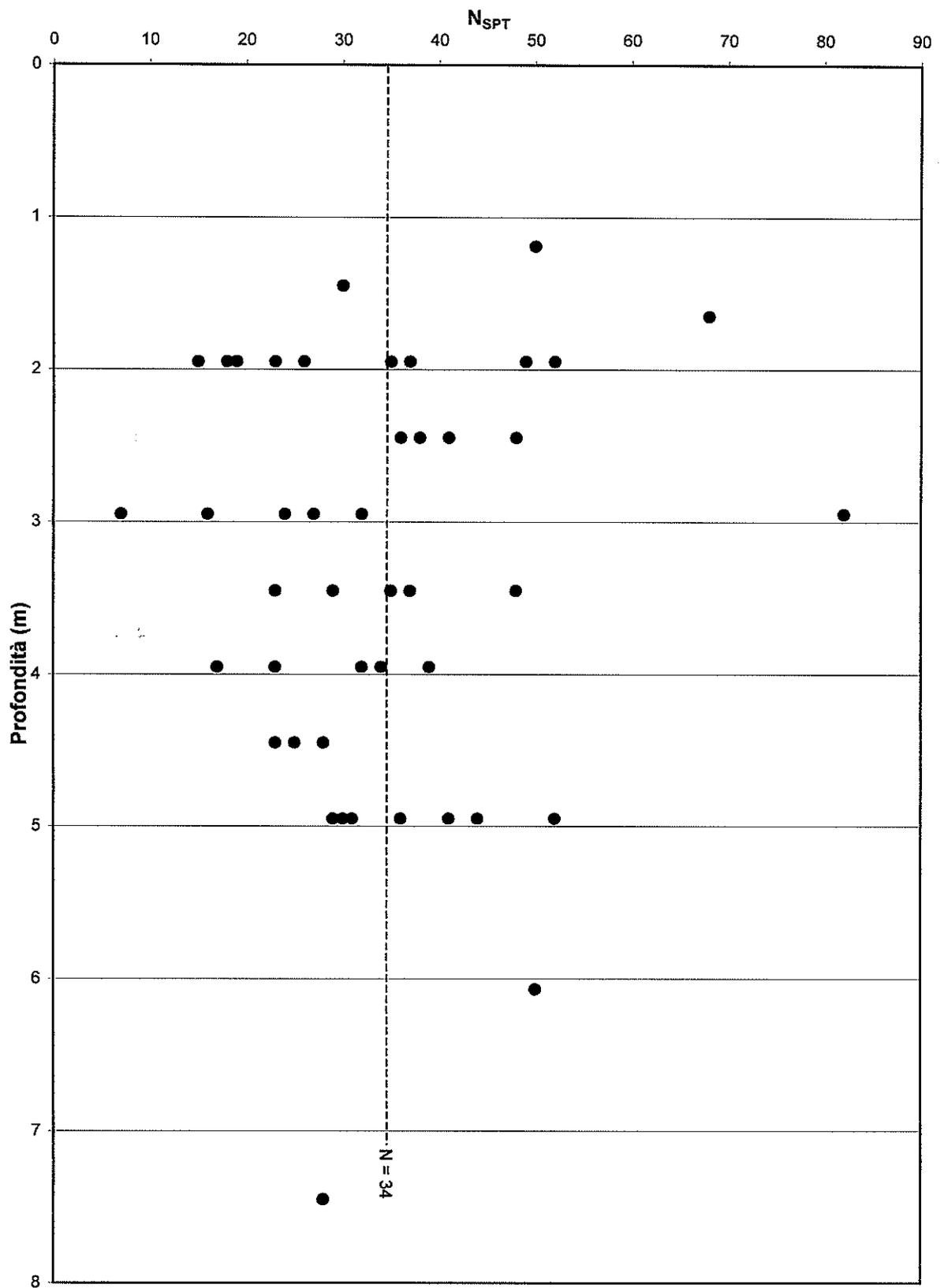


Fig. 6 – Sabbie con limi giallastre: Profilo di N_{SPT} con la profondità dal fondale

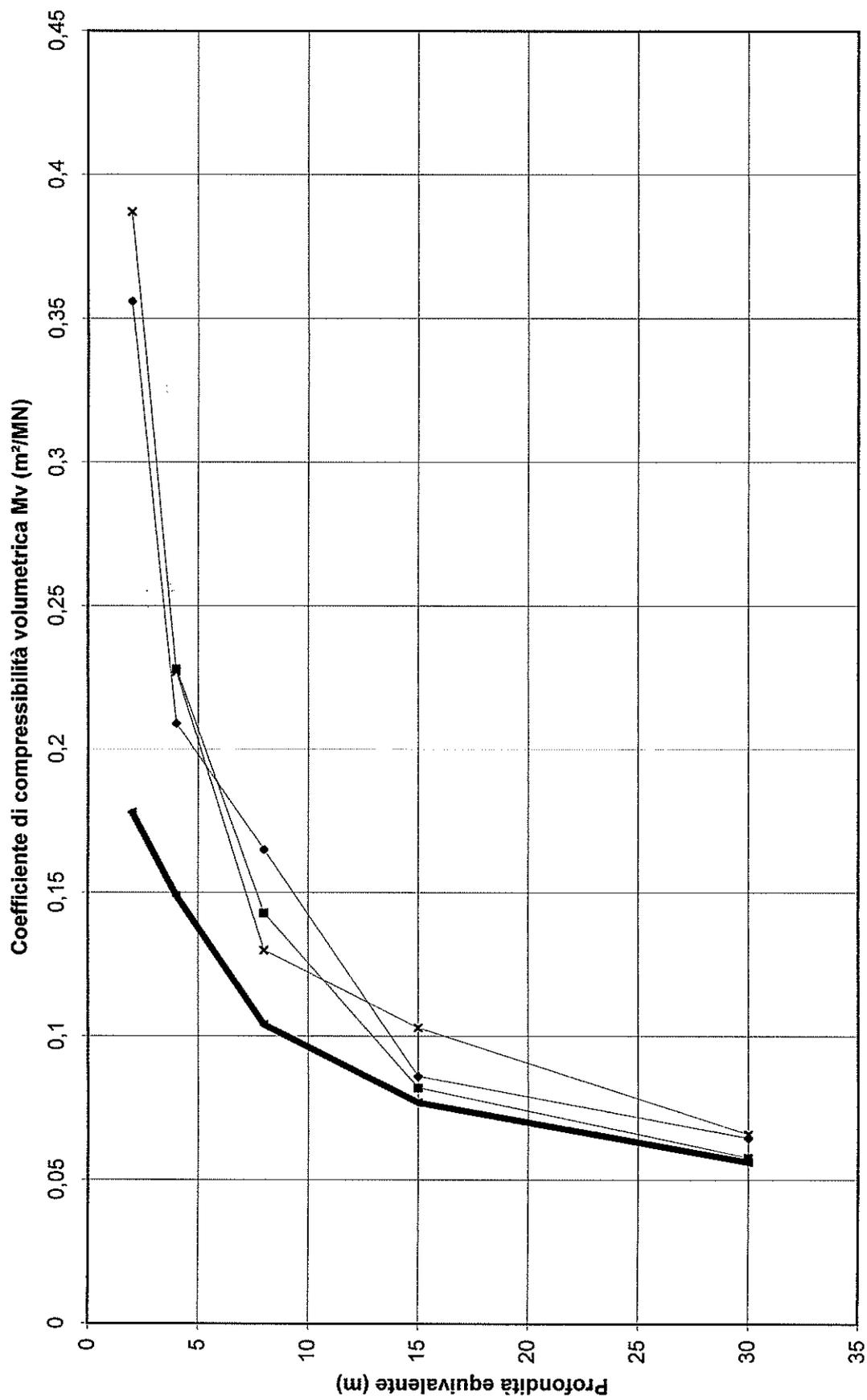


Fig. 7 - Sabbie con limi giallastre frammentate a noduli calcarenitici: Variazioni del coefficiente di compressibilità volumetrica con la profondità

Tabella 3 - Limi con sabbia grigio-azzurri: Quadro riassuntivo delle prove di laboratorio eseguite

Camp No.	Prof. (m)	A (%)	L (%)	S (%)	G (%)	WL (%)	WP (%)	IP (%)	Yr (g/cm ³)	Yt (g/cm ³)	Yd (g/cm ³)	w (%)	e	n (%)	s (%)	SS (kN/m ²)	c' (°)	Ø' (%)	Sostanza Organica (%)	OCR
B1/C1	7.5-8.0	7	46	47	0	0	0	0	2,71	2,02	1,63	24	0,663	40	99	ML		40		
B1/C2	11.0-11.5	11	60	30	0	0	0	0	2,71	2,04	1,62	26	0,670	40	100	ML		36,40		
B1/C3	14.0-14.5	10	67	23	0	0	0	0	2,73	2,06	1,69	22	0,617	38	99	ML		33,3		
B2/C1	5.0-5.5	2	42	57	0	0	0	0	2,72	1,95	1,52	28	0,788	44	97	ML		28,3		
B2/C2	10.0-10.5	4	66	30	0	0	0	0	2,72	2,07	1,69	22	0,605	38	100	ML		26,6	0,1	
B2/C3	13.0-13.5	6	68	26	0	0	0	0	2,72	2,02	1,6	26	0,695	41	100	ML			0,8	
B2/C4	18.0-18.5	7	61	22	0	0	0	0	2,75	2,02	1,6	26	0,718	42	100	ML			0,6	
B3/C3	10.5-11.0	5	54	41	0	0	0	0	2,73	2,05	1,66	24	0,643	39	100	ML			0,4	
B3/C4	15.0-15.5	6	70	24	0	0	0	0	2,73	2,00	1,58	27	0,728	42	100	ML			0,2	
B4/C1	5.0-5.5	11	52	37	0	0	0	0	2,70	2,11	1,75	21	0,545	35	100	ML		40,4	0,7	
B4/C2	15.0-15.5	13	65	22	0	0	0	0	2,72	2,04	1,64	25	0,662	40	100	ML		32,9		
B5/C1	9.5-10.0	7	67	26	0	0	0	0	2,71	2,09	1,71	22	0,588	37	100	ML		37		
B5/C2	15.0-15.5	8	68	24	0	0	0	0	2,72	1,97	1,56	26	0,746	43	96	ML		26,3		
B6/C1	3.0-3.5	3	50	47	0	0	0	0	2,70	2,06	1,66	24	0,625	39	100	ML		39,6		12,3
B6/C2	10.0-10.5	5	69	26	0	0	0	0	2,70	2,09	1,70	23	0,584	37	100	ML		37,8		
B6/C3	16.0-16.5	5	69	25	0	0	0	0	2,71	1,99	1,57	27	0,729	42	99	ML				
B6/C4	20.0-20.5	9	70	22	0	0	0	0	2,72	2,05	1,66	24	0,642	39	100	ML				9,4
C1/C2	9.0-9.5	3	64	33	0	0	0	0	2,72	2,00	1,58	27	0,725	42	100	ML		27,1		
C1/C3	14.5-15.0	12	69	20	0	0	0	0	2,71	2,01	1,60	26	0,698	41	100	ML				18
C2/C2	10.0-10.5	11	64	26	0	0	0	0	2,73	2,07	1,69	22	0,610	38	99	ML		34,8		10
C2/C3	16.0-16.5	12	66	22	0	0	0	0	2,72	2,00	1,59	26	0,712	42	100	ML				
C3/C1	5.0-5.5	7	51	42	0	0	0	0	2,70	2,02	1,61	25	0,676	40	100	ML		33,2		10,5
C3/C2	10.5-11.0	12	70	18	0	28	25	3		1,98	1,55	28	0,760	43	100	ML		31,6		32,8
C3/C3	14.5-15.0	10	68	22	0	0	0	0	2,73	2,02	1,61	25	0,688	41	100	ML				
C4/C2	9.0-9.5	8	61	32	0	0	0	0	2,68	2,01	1,61	25	0,665	40	100	ML		25,9		8,5

Camp No.	Prof. (m)	A (%)	L (%)	S (%)	G (%)	WL (%)	WP (%)	IP (%)	Yr (g/cm³)	Yt (g/cm³)	Yd (g/cm³)	w (%)	e	n (%)	s (%)	SS (KN/m²)	c'	Ø' (°)	Sostanza Organica (%)	OCR
C4/C3	15.0-15.5	9	65	26	0	0	0	0	2,73	1,98	1,57	26	0,735	42	97	ML				17,3
C5/C2	10.0-10.5	7	60	33	0	0	0	0	2,70	1,99	1,57	26	0,713	42	100	ML		34,3		11,7
C6/C1	8.5-9.0	4	54	42	0	0	0	0	2,71	2,07	1,69	23	0,605	38	100	ML		46		24,3
C6/C2	11.0-11.5	4	57	39	0	0	0	0	2,71	2,01	1,60	25	0,690	41	100	ML		38,5		8
C7/C1	9.5-10.0	6	51	43	1	0	0	0	2,71	2,00	1,59	26	0,706	41	100	ML		26,7		8,9
C7/C2	13.0-13.5	10	62	28	0	0	0	0	2,73	2,06	1,68	23	0,624	38	99	ML		26,7		15,6
C8/C1	8.5-9.0	5	54	42	0	0	0	0	2,72	2,09	1,69	24	0,612	38	100	ML		49,9		18
C8/C2	13.5-14.0	4	59	37	0	0	0	0	2,72	2,01	1,58	27	0,720	42	100	ML		54,6		9,5
D9/C1	6.5-7.0	2	14	85	0	0	0	0	2,71	2,00	1,58	26	0,716	42	100	SP		33,6		17,8
D7/C4	4.7-4.8	4	53	44	0	0	0	0	2,72	2,08	1,69	23	0,609	38	100	ML				
D7/C5	5.8-5.9	5	46	47	2	0	0	0	2,71	2,06	1,68	22	0,614	38	99	ML				
D7/C6	11.0-11.2	6	61	33	0	0	0	0	2,72	2,09	1,70	23	0,596	37	100	ML				
D5/C2	4.5-5.0	7	51	43	0	0	0	0	2,72	1,95	1,55	26	0,756	43	94	ML		45,5		
D5/C3	10.0-10.5	4	63	33	0	0	0	0	2,72	2,04	1,62	26	0,681	40	100	ML				
D5/C4	18.0-18.5	7	70	24	0	28	25	3	2,72	1,99	1,56	27	0,743	43	100	ML			0,5	
D4/C2	8.5-9.0	5	46	49	0	0	0	0	2,71	2,00	1,59	26	0,709	42	100	ML			0,6	
D3/C3	7.5-7.8	11	55	35	0	0	0	0	2,72	2,02	1,61	25	0,691	41	100	ML			0,7	
D2/C2	7.0-7.5	8	56	36	0	0	0	0	2,70	1,99	1,57	26	0,714	42	100	ML		34,5		
L1/C2	10.0-10.5	6	40	55	0	0	0	0	2,70	2,00	1,59	26	0,693	41	99	ML			0,6	
MEDIA		7	58	34	0				2,72	2,03	1,62	25	0,675	40	99			35,4	0,5	14,5
SCARTO		3	11	13	0				0,01	0,04	0,05	2	0,057	2	1			7,6	0,2	6,8
MINIMO		2	14	18	0	0	0	0	2,68	1,95	1,52	21	0,545	35	94			25,9	0,1	8,0
MASSIMO		13	70	85	2	28	25	3	2,75	2,11	1,75	28	0,788	44	100			54,6	0,8	32,8

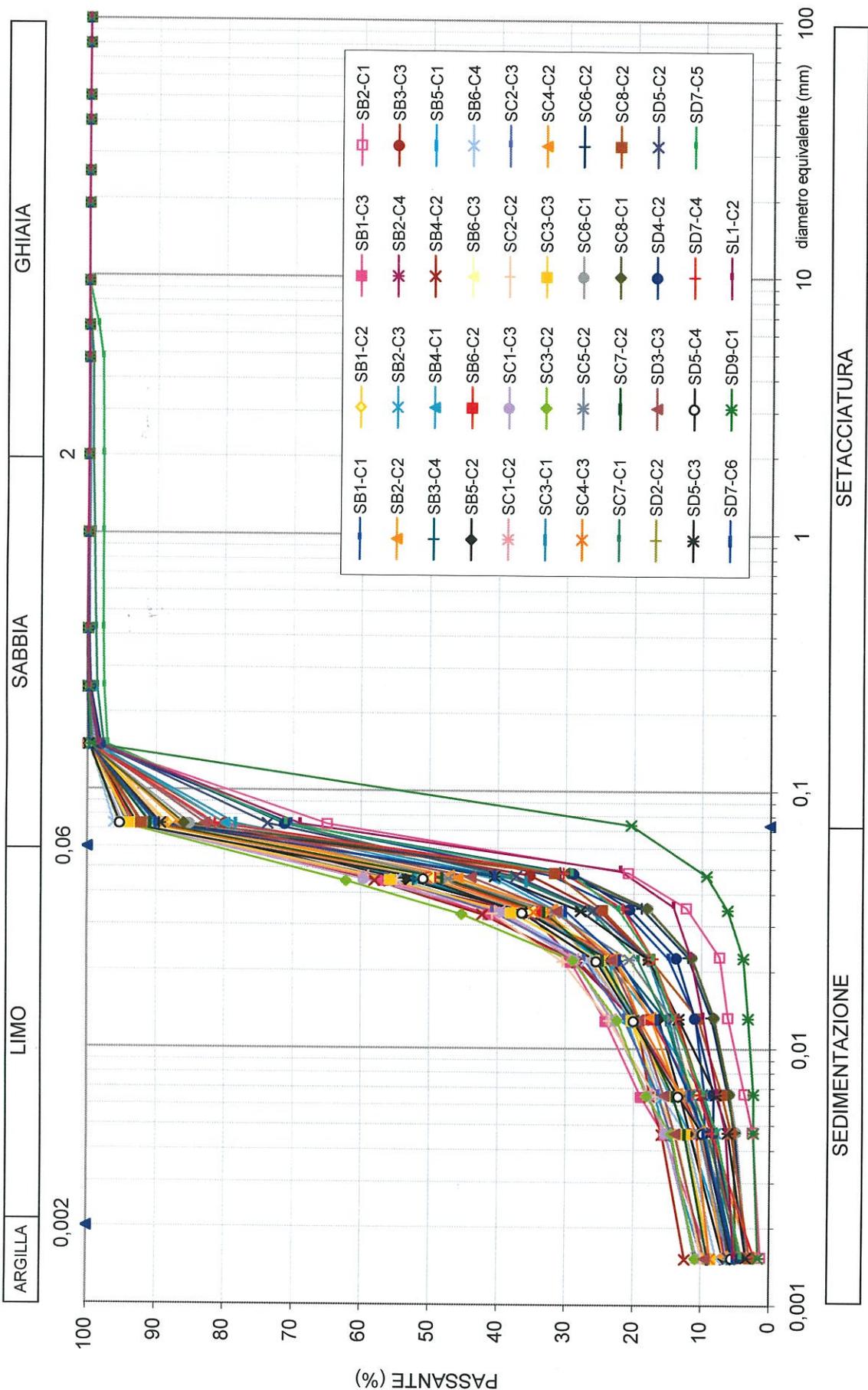


Fig. 8 - Limi con sabbia grigio-azzurri: Fascia Granulometrica

poco addensati, come evidenziato dai valori del peso di volume del secco e della porosità ($n = 35-44\%$, $\gamma_d = 1,52-1,75 \text{ g/cm}^3$).

Per quanto riguarda le caratteristiche di resistenza meccanica, sulla scorta dei risultati delle venti prove di taglio diretto svolte, elaborati col metodo dei punti di sollecitazione, essi sono esprimibili, in termini di tensioni efficaci, attraverso i seguenti parametri (Fig. 9):

$$c' = 0,50 \text{ Kg/cm}^2 \quad \Phi' = 30^\circ.$$

Sui terreni in questione sono state anche svolte prove di compressione triassiale del tipo consolidato e non drenato (TRX, CIU); i risultati di dette prove forniscono i seguenti parametri di resistenza meccanica, in termini di tensioni totali e di tensioni efficaci rispettivamente (Figg 10 e 11):

$$c = 0,63 \text{ Kg/cm}^2 \quad \Phi = 27^\circ.$$

$$c' = 0 \text{ Kg/cm}^2 \quad \Phi' = 31^\circ.$$

Nelle Figure 12 e 13 è anche riportato l'andamento della resistenza a taglio τ in funzione della profondità equivalente (corrispondente alla tensione imposta sul provino in fase di prova). Da essi si traggono i seguenti valori di resistenza, sia in termini di tensioni totali che efficaci:

profondità	Resistenza totale	Resistenza efficace
$Z < 10 \text{ m}$	$\cong 66 \text{ kPa} = 0,66 \text{ Kg/cm}^2$	$\cong 72 \text{ kPa} = 0,72 \text{ Kg/cm}^2$
$10 < z < 15$	$\cong 99 \text{ kPa} = 0,99 \text{ Kg/cm}^2$	$\cong 106 \text{ kPa} = 1,06 \text{ Kg/cm}^2$
$15 < z < 20$	$\cong 164 \text{ kPa} = 1,64 \text{ Kg/cm}^2$	$\cong 172 \text{ kPa} = 1,72 \text{ Kg/cm}^2$

In Figura 14 è riportato l'andamento della resistenza penetrometrica in funzione della profondità, a partire dal fondale. La dispersione dei valori è verosimilmente dovuta alla variabilità osservata del grado di addensamento del materiale. Sulla scorta dei risultati delle prove penetrometriche dinamiche, comunque, con riferimento ad un

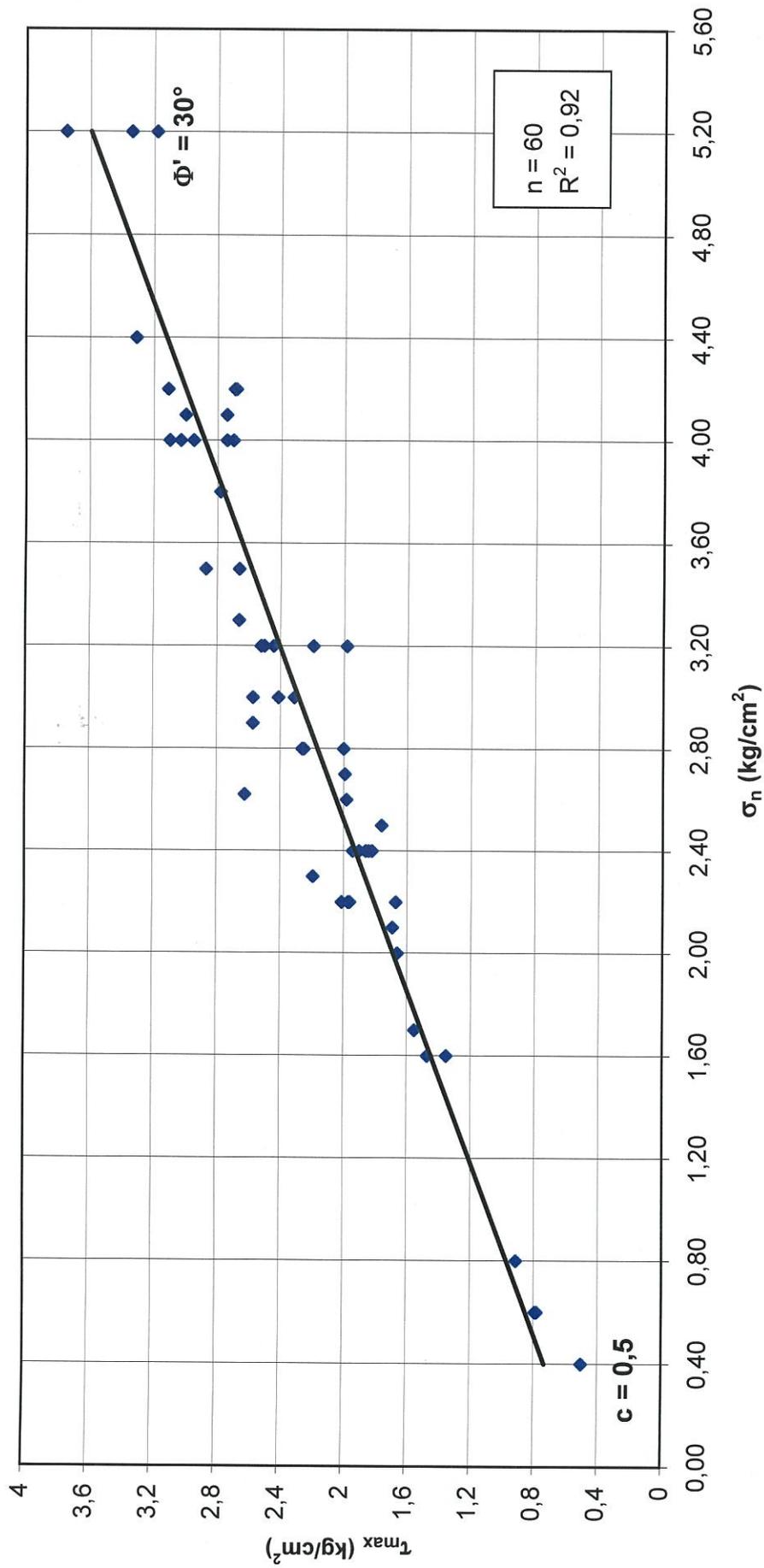


Fig. 9 - Limi con sabbia grigio-azzurri: Prove di taglio diretto TD CID. Rappresentazione col metodo dei punti di sollecitazione

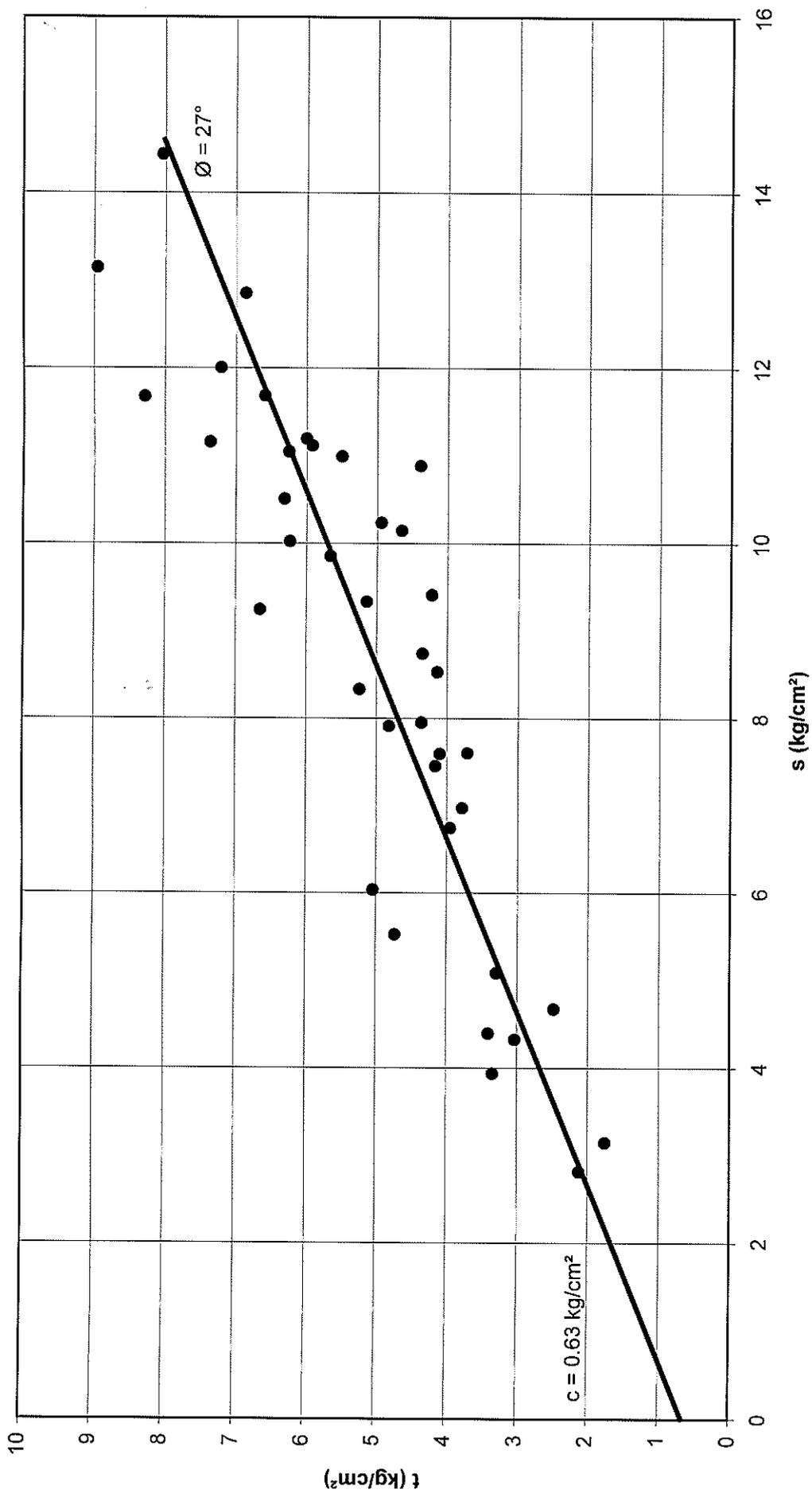


Fig. 10 - Limi con sabbia grigio-azzurri: Prove di compressione TRX, CIU. Rappresentazione col metodo dei punti di sollecitazione - Tensioni totali

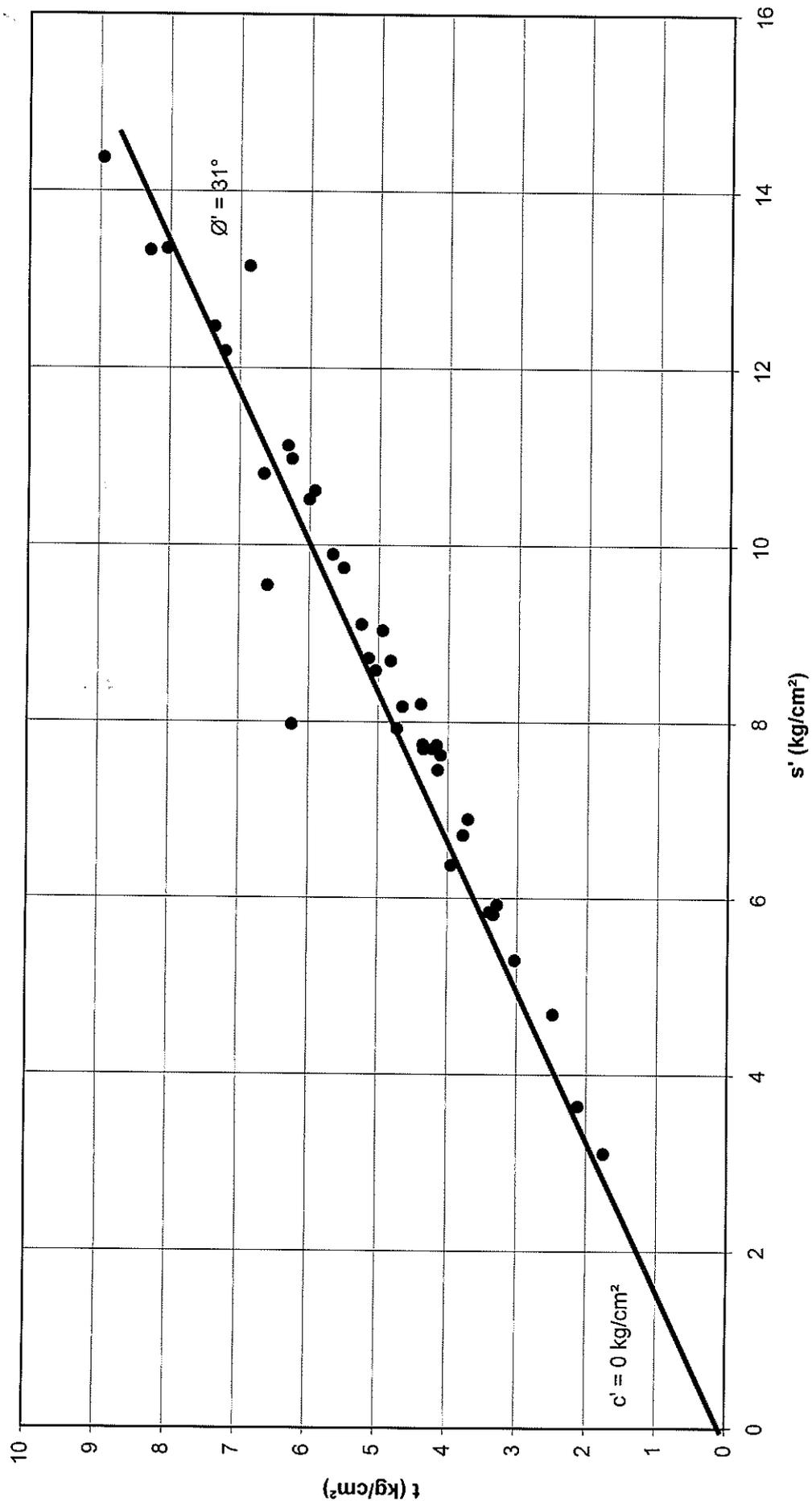


Fig. 11 - Limi con sabbia grigio-azzurri: Prove di compressione TRX, CIU. Rappresentazione col metodo dei punti di sollecitazione - Tensioni efficaci

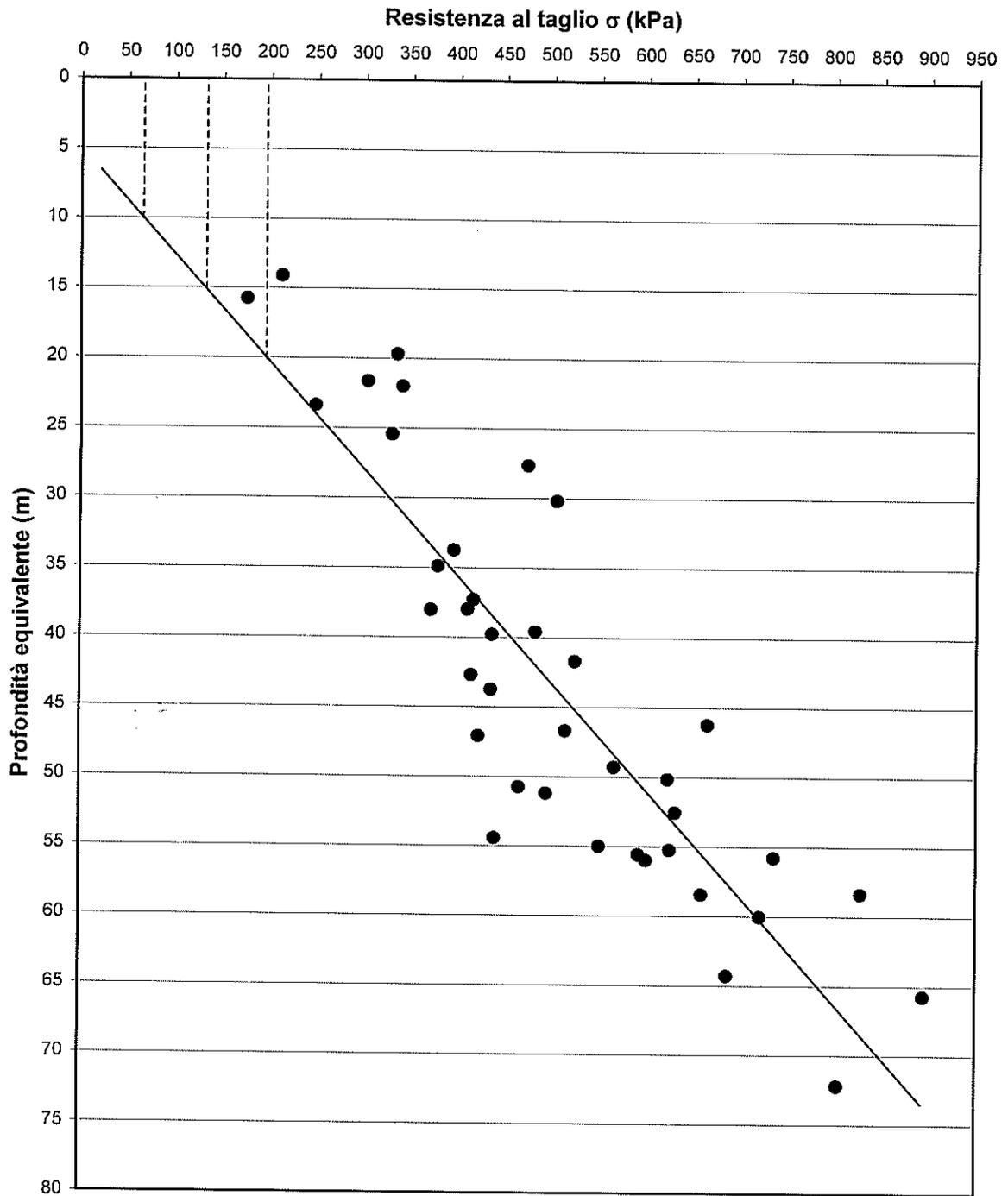


Fig. 12 - Limi con sabbia grigio-azzurri: Variazione della resistenza al taglio σ con la profondità equivalente

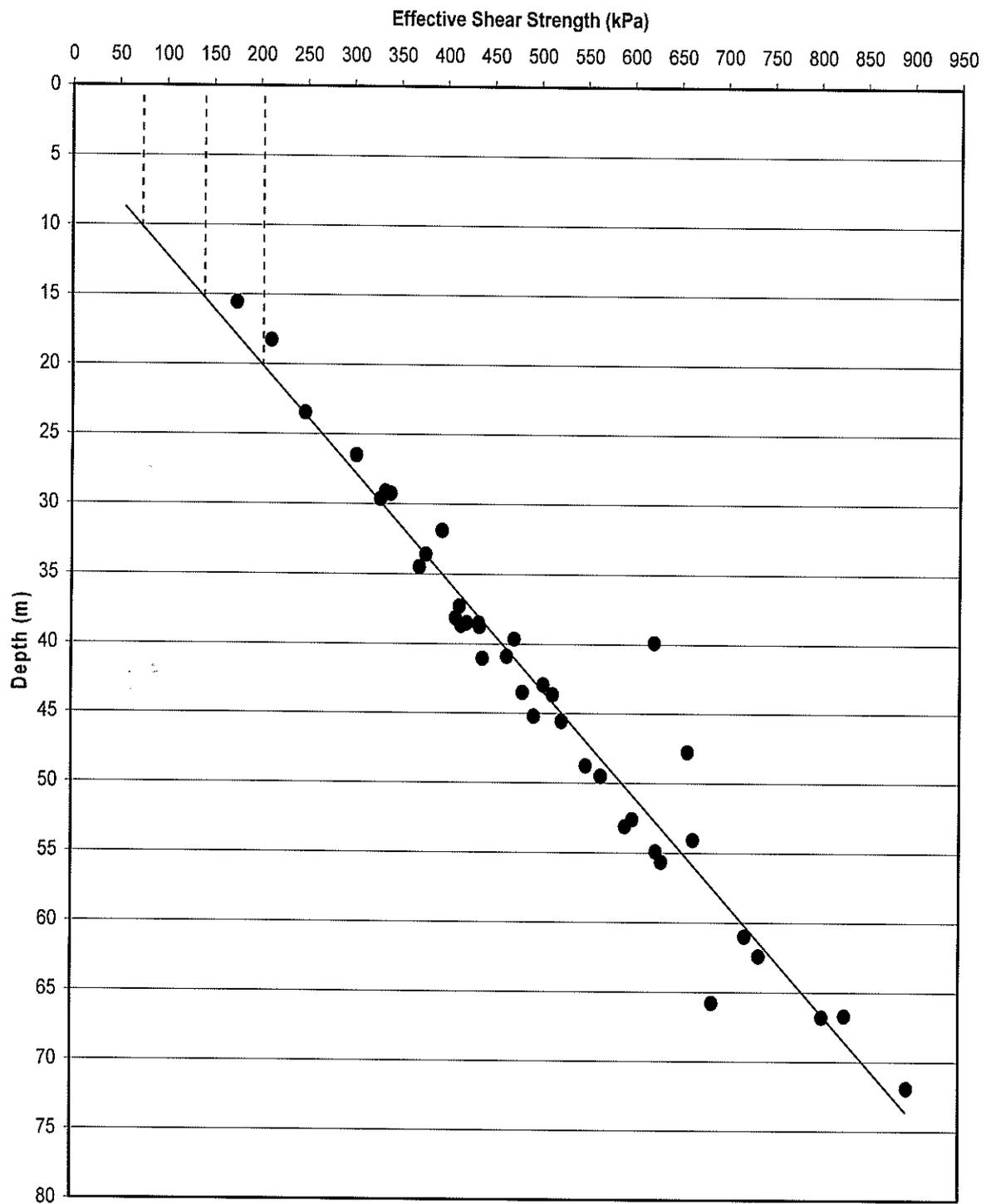


Fig. 13 - Limi con sabbia grigio-azzurri: Variazione della resistenza al taglio σ' con la profondità equivalente

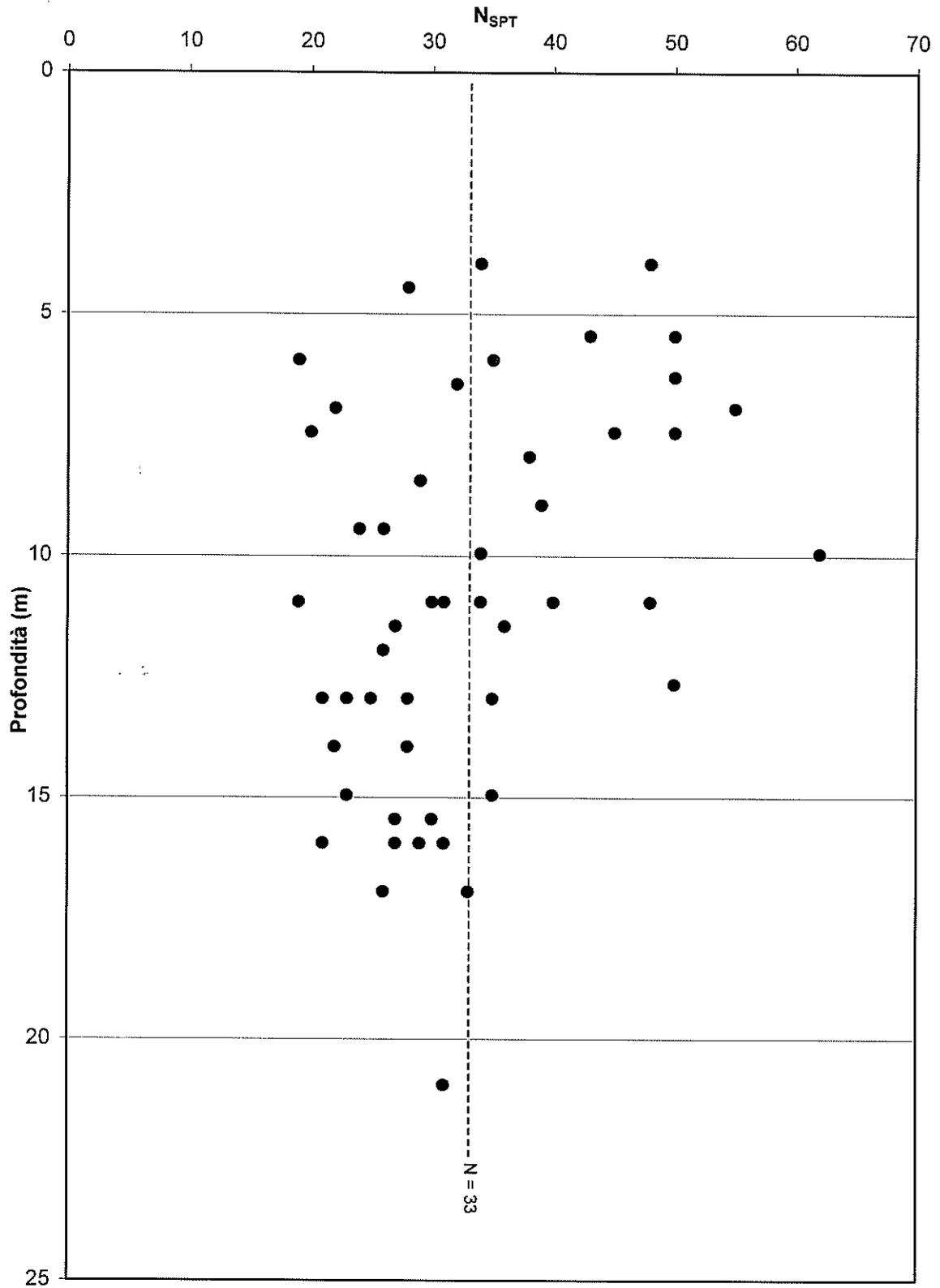


Fig. 14 – Limi con sabbie grigio-azzurri: Profilo di N_{SPT} con la profondità dal fondale

valore mediato di $N_{SPT} = 33$, la resistenza meccanica può essere espressa attraverso il parametro $\phi' = 37^\circ$.

Per quanto riguarda, infine, la compressibilità di detti litotipi, in Figura 15 è riportato l'andamento del coefficiente di compressibilità (m_v) con la profondità. Tenuto conto del fatto che il materiale in esame ha un'alta percentuale di sabbia, tenuto altresì conto di un certo effetto di disturbo in fase di prelievo del campione e di preparazione dei provini di laboratorio, la linea che rappresenta il limite minimo può essere considerata rappresentare un valore conservativo di m_v .

Più in generale, sempre a riguardo della compressibilità di questi terreni, dall'esame delle curve di compressibilità edometrica si trae che il materiale in esame presenta generalmente compressibilità media, come evidenziato dai parametri $C_c = 0,071-0,107$ e $M = 324-500 \text{ kg/cm}^2$ relativi all'intervallo di carico $6-12 \text{ kg/cm}^2$. Non mancano, tuttavia livelli più consistenti a compressibilità medio-bassa ($C_c = 0,059$ e $M = 571 \text{ kg/cm}^2$) ovvero più soffici a compressibilità medio-alta ($C_c = 0,165$ e $M = 200 \text{ kg/cm}^2$).

5.4. Argille grigio-azzurre di base

L'argilla grigio azzurra di base è stata individuata nei sondaggi più profondi, sotto lo strato di limi con sabbie, ad una profondità compresa tra 18 e 24 m a partire dal fondale marino. Fino alle profondità indagate l'argilla presenta sempre una elevata componente limosa e secondariamente sabbiosa.

Nella Tabella 4 allegata sono riportati i risultati delle prove geotecniche svolte.

Dall'esame di detti risultati si evince che i terreni in esame sono granulometricamente costituiti da limi con argilla e limi argilloso-sabbiosi (frazione sabbiosa $SF = 12-20\%$, frazione limosa $MF = 55-74\%$, frazione argillosa $14-34\%$) (Fig. 16), mentre secondo la classificazione USCS basata sui limiti di Atterberg, detti terreni sono classificabili come argille inorganiche CL di media plasticità e basso limite di liquidità ($WL = 30-37\%$, $WP = 17-20\%$, $PI = 13-20\%$) (Fig. 17). Detti terreni presentano inoltre bassi valori del peso di volume del secco ($n = 39-44\%$, $\gamma_d = 1,53-1,66 \text{ g/cm}^3$),

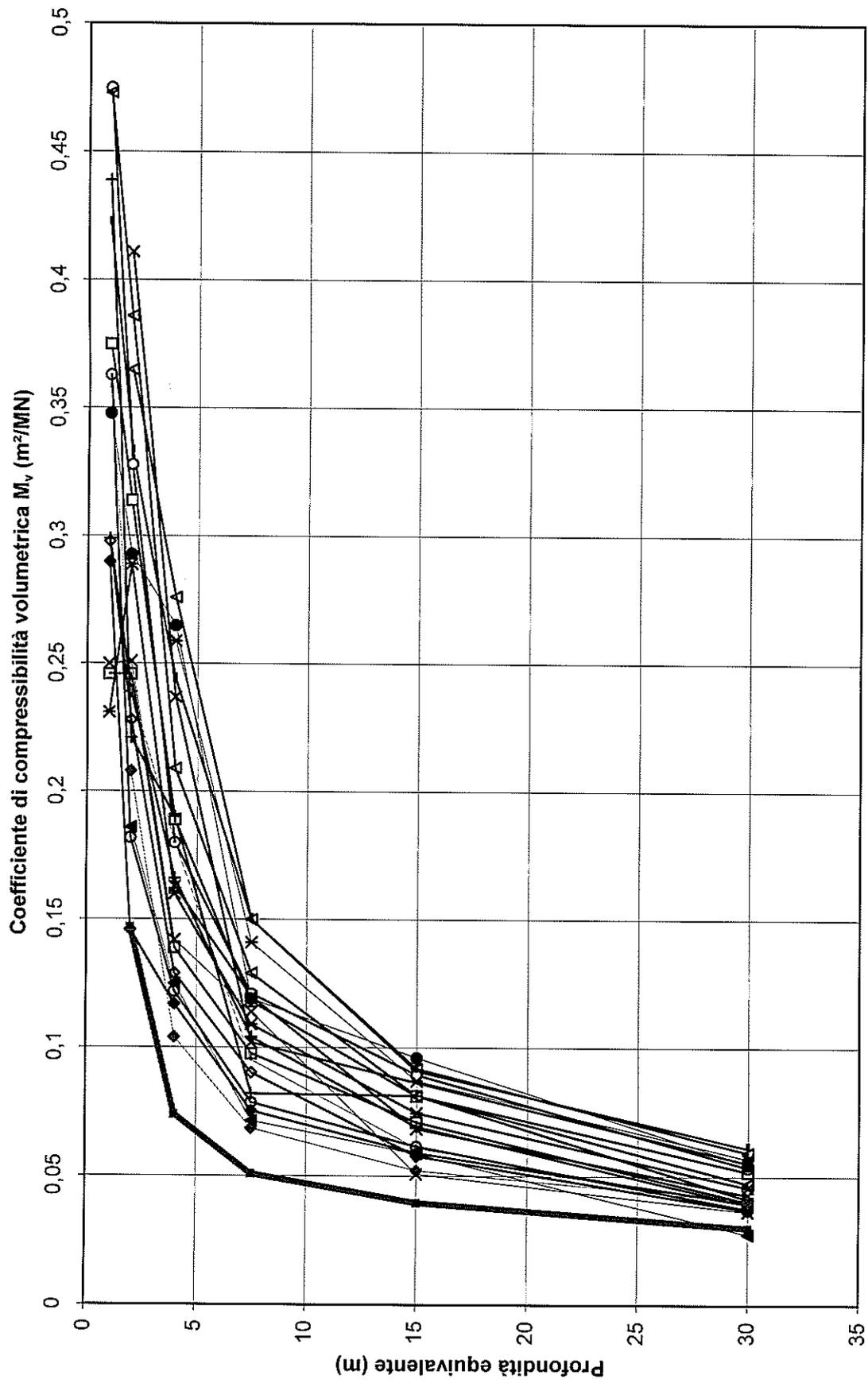


Fig. 15 - Limi con sabbia grigio-azzurri: Variazioni del coefficiente di compressibilità volumetrica con la profondità

Tabella 4 - Argille con limi grigio-azzurre: Quadro riassuntivo delle prove di laboratorio eseguite

Camp No.	Prof. (m)	A (%)	L (%)	S (%)	G (%)	WL (%)	WP (%)	IP (%)	γ_r (g/cm ³)	γ_t (g/cm ³)	γ_d (g/cm ³)	w (%)	e	n (%)	s (%)	SS ₂₀₀	c' (kN/m ²)	ϕ' (°)	Sostanza Organica (%)	OCR
B2/C5	22.0-22.5	34	55	12	0	35	18	17	2,75	2,03	1,64	24	0,676	40	96	ML				
B3/C5	24.0-24.5	19	62	19	0	31	18	12	2,73	2,05	1,66	24	0,651	39	100	CL			0,4	
B5/C3	21.5-22.0	25	60	16	0	37	18	19	2,74	2,04	1,66	22	0,644	39	95	CL			0,6	
B5/C4	24.5-25.0	18	65	17	0	31	18	12	2,73	1,98	1,53	29	0,787	44	100	CL				
B6/C5	24.5-25.0	20	61	20	0	34	17	17	2,72	2,03	1,64	24	0,666	40	98	CL				
C1/C4	21.0-21.5	26	58	16	0	34	18	17	2,74	2,04	1,66	23	0,648	39	97	CL				
C2/C4	22.0-22.5	26	62	12	0	34	18	16	2,74	2,03	1,66	22	0,654	40	94	CL				
C3/C4	21.5-22.0	26	60	14	0	37	17	20	2,75	2,02	1,63	24	0,692	41	96	CL				2,3
C3/C5	28.5-29.0	14	74	12	0	33	19	14	2,72	2,03	1,63	24	0,667	40	100	CL				2,2
C4/C4	21.0-21.5	21	63	16	0	35	17	18	2,73	2,02	1,60	26	0,705	41	100	CL				2,8
C4/C5	27.0-27.5	26	59	15	0	34	18	16	2,72	2,04	1,66	23	0,644	39	99	CL				2,4
MEDIA		23	62	15	0	34	18	16	2,73	2,03	1,63	24	0,676	40	98				0,5	2,4
SCARTO		5	5	3	0	2	1	3	0,01	0,02	0,04	2	0,042	1	2				0,1	0,3
MINIMO		14	55	12	0	31	17	12	2,72	1,98	1,53	22,00	0,64	39	94				0,4	2,2
MASSIMO		34	74	20	0	37	19	20	2,75	2,05	1,66	29,00	0,79	44	100				0,6	2,8

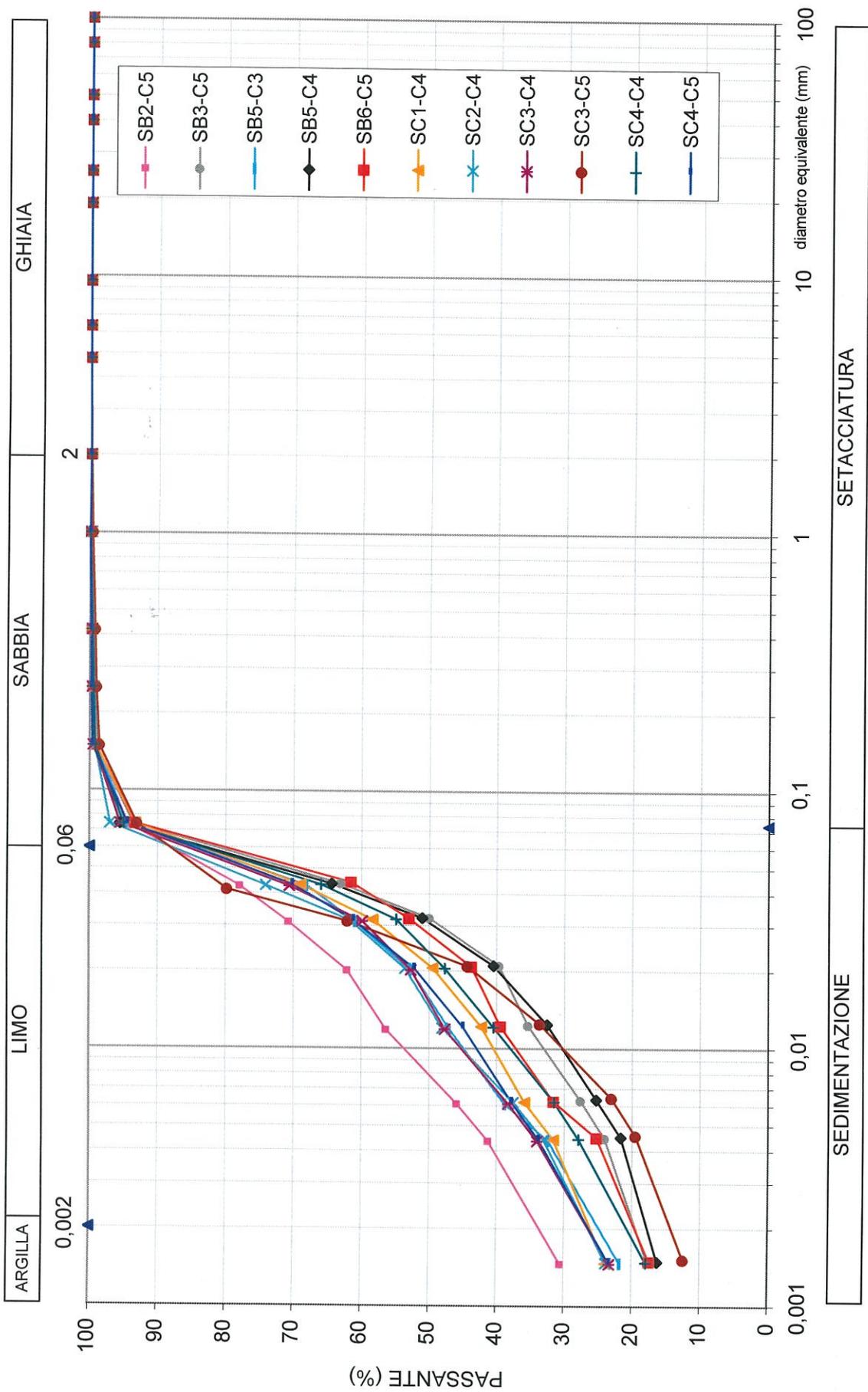


Fig. 16 - Argille con limi grigio-azzurre: Fascia Granulometrica

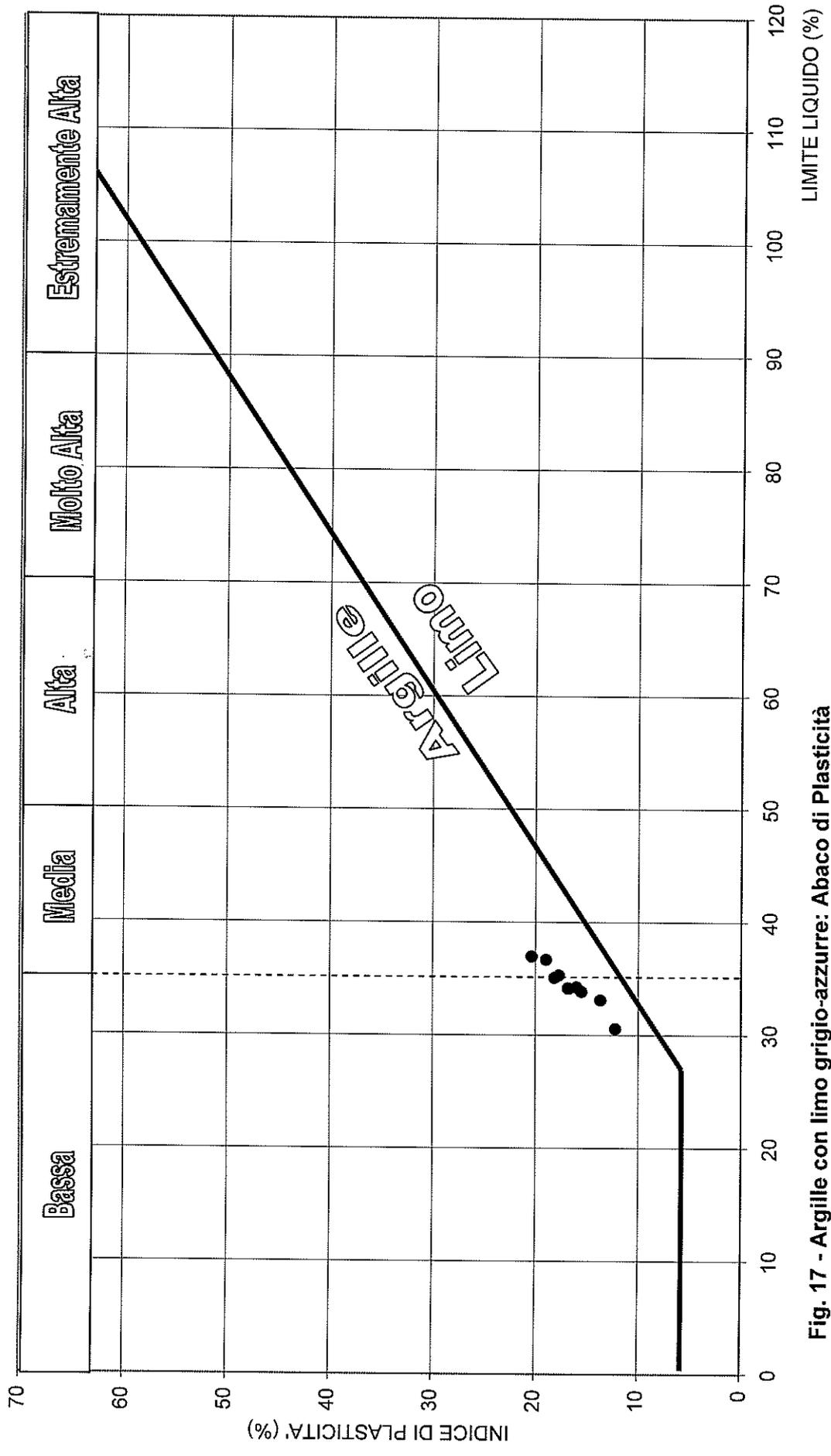


Fig. 17 - Argille con limo grigio-azzurre: Abaco di Plasticità

verosimilmente coerente con il basso grado di consolidazione raggiunto dalla formazione.

Per quanto riguarda le caratteristiche di resistenza meccanica, sulla scorta dei risultati delle prove di compressione triassiale svolte, del tipo consolidato e non drenato (TRX, CIU), esse sono esprimibili attraverso i seguenti parametri in termini di tensioni totali e di tensioni efficaci rispettivamente (Figg. 18 e 19):

$$c = 0,12 \text{ Kg/cm}^2 \quad \phi = 15^\circ.$$

$$c' = 0 \text{ Kg/cm}^2 \quad \phi' = 25^\circ.$$

Nelle Figure 20 e 21 è anche riportato l'andamento della resistenza a taglio τ in funzione della profondità equivalente (corrispondente alla tensione imposta sul provino in fase di prova). Da essi si traggono i seguenti valori di resistenza, sia in termini di tensioni totali che efficaci:

profondità	Resistenza totale	Resistenza efficace
15 < z < 20 m	$\cong 92 \text{ kPa} = 0,92 \text{ Kg/cm}^2$	$\cong 159 \text{ kPa} = 1,59 \text{ Kg/cm}^2$
20 < z < 25 m	$\cong 120 \text{ kPa} = 1,20 \text{ Kg/cm}^2$	$\cong 206 \text{ kPa} = 2,06 \text{ Kg/cm}^2$
25 < z < 30 m	$\cong 150 \text{ kPa} = 1,50 \text{ Kg/cm}^2$	$\cong 253 \text{ kPa} = 2,53 \text{ Kg/cm}^2$

Per quanto riguarda, infine, la compressibilità di detti litotipi, in Figura 22 è riportato l'andamento del coefficiente di compressibilità (m_v) con la profondità. La linea più scura rappresenta il limite minimo del coefficiente di compressibilità e può essere considerata rappresentare un valore conservativo di m_v .

Più in generale, sempre a riguardo della compressibilità di questi terreni, dall'esame delle curve di compressibilità edometrica si trae che il materiale in esame presenta generalmente compressibilità medio-alta, come evidenziato dai parametri $C_c = 0,162-0,197$ e $M = 171-207 \text{ kg/cm}^2$ relativi all'intervallo di carico $6-12 \text{ kg/cm}^2$.

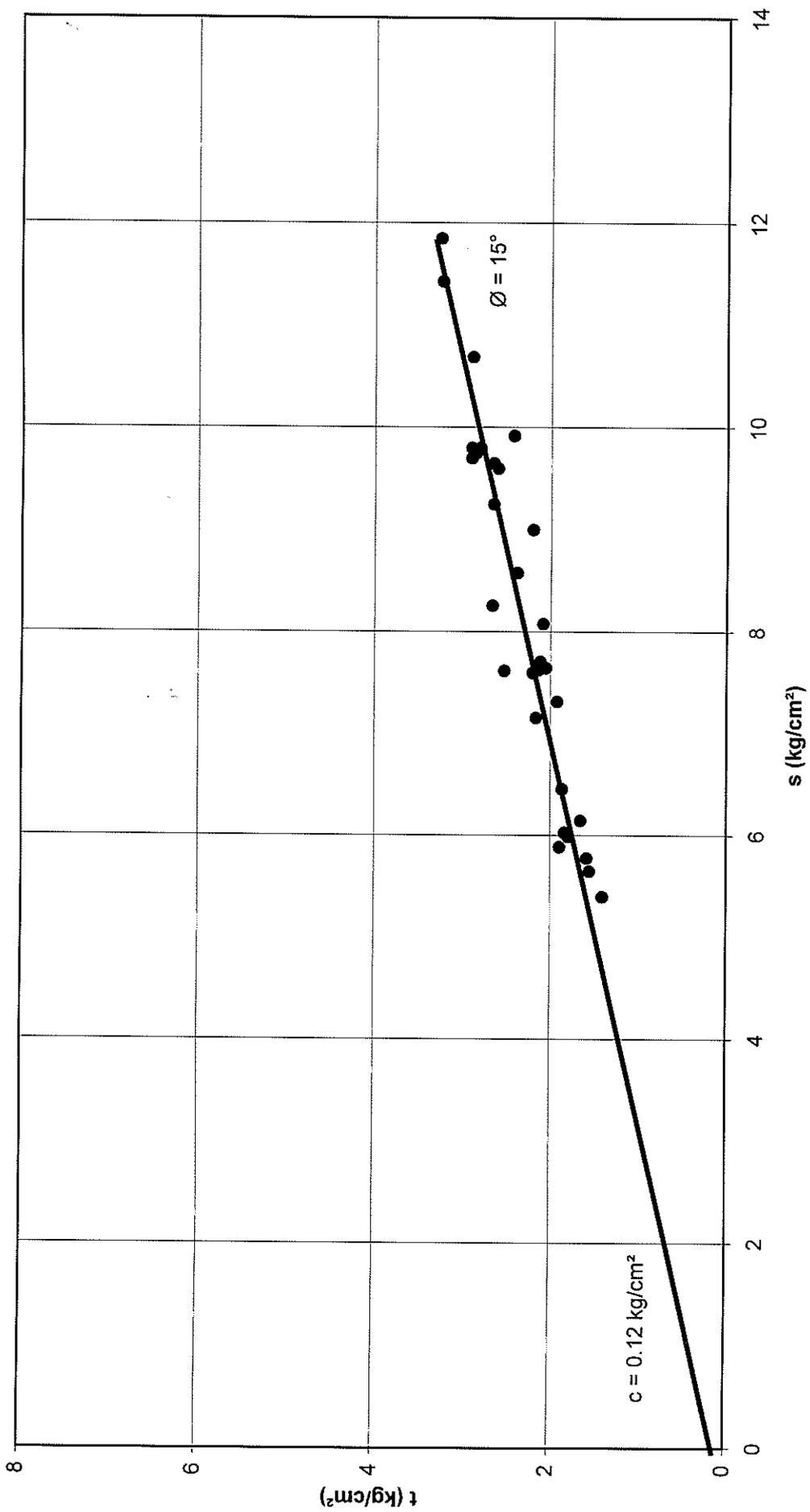


Fig. 18 - Argille con limo grigio-azzurro: Prove di compressione TRX, CIU. Rappresentazione col metodo dei punti di sollecitazione - Tensioni totali

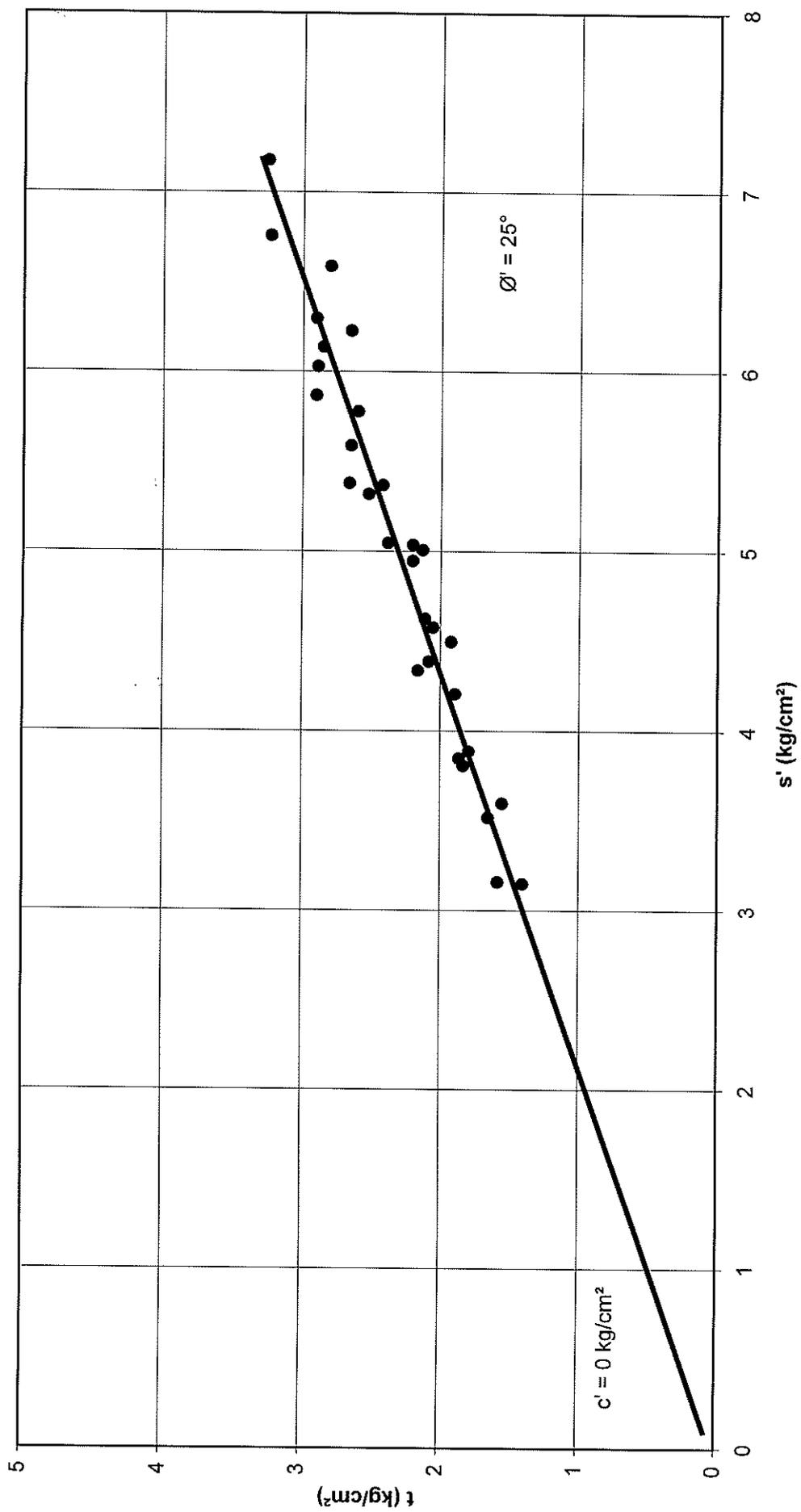


Fig. 19 - Argille con limo grigio-azzurro: Prove di compression TRX, CIU. Rappresentazione col metodo dei punti di sollecitazione - Tensioni efficaci

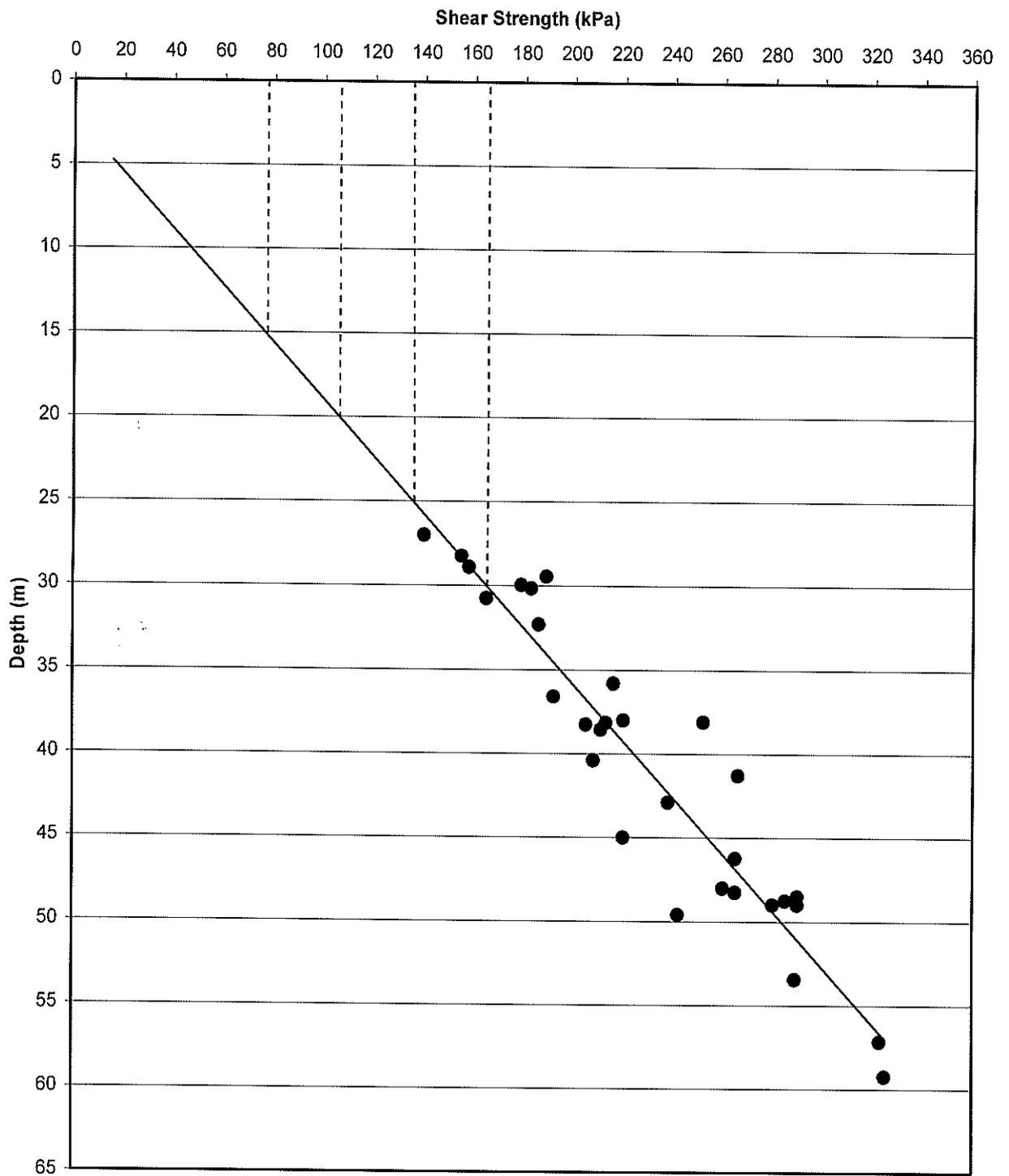


Fig. 20 - Argille con limi grigio-azzurre: Variazione della resistenza al taglio σ con la profondità equivalente

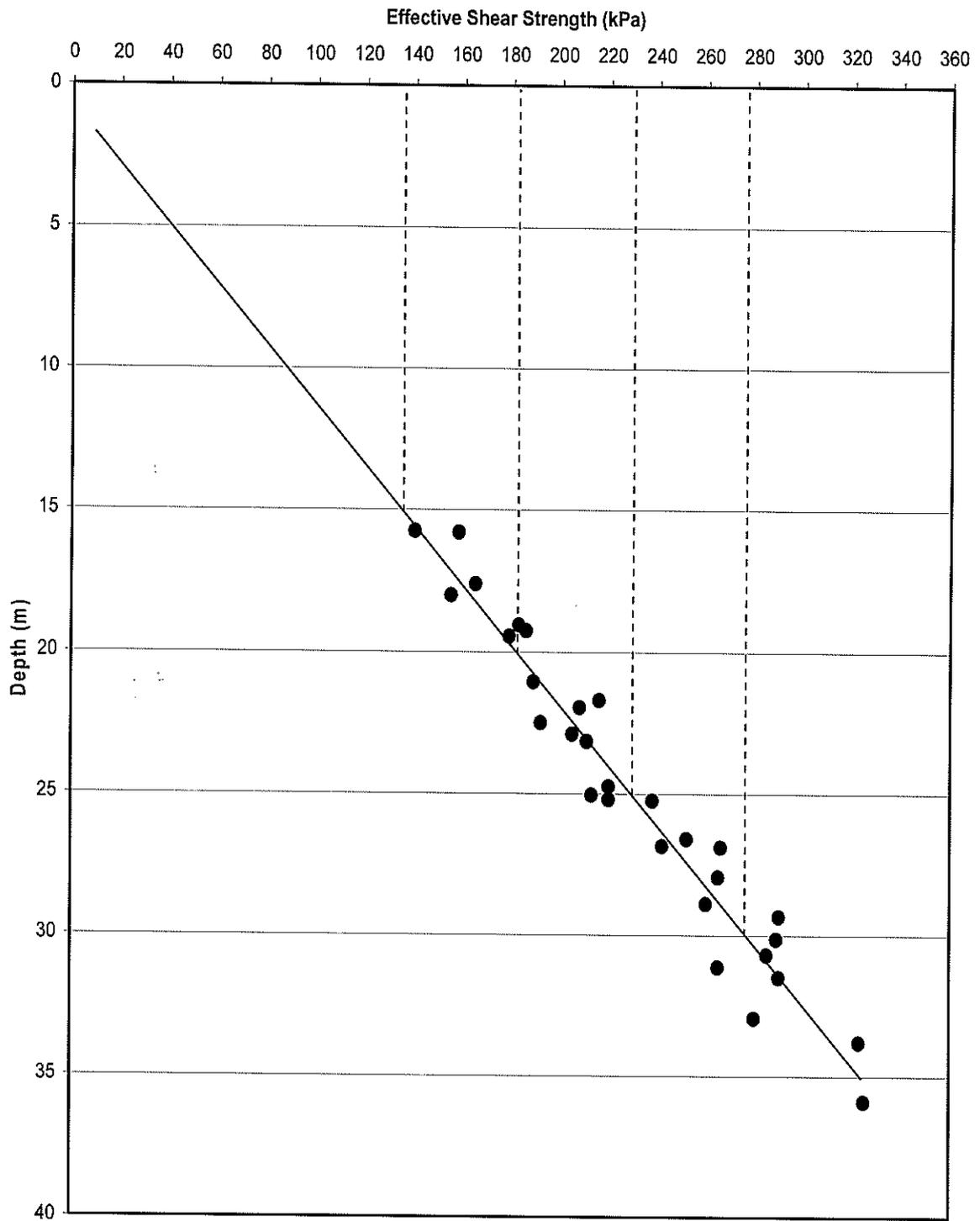


Fig. 21 – Argille con limi grigio-azzurre: Variazione della resistenza al taglio σ' con la profondità equivalente

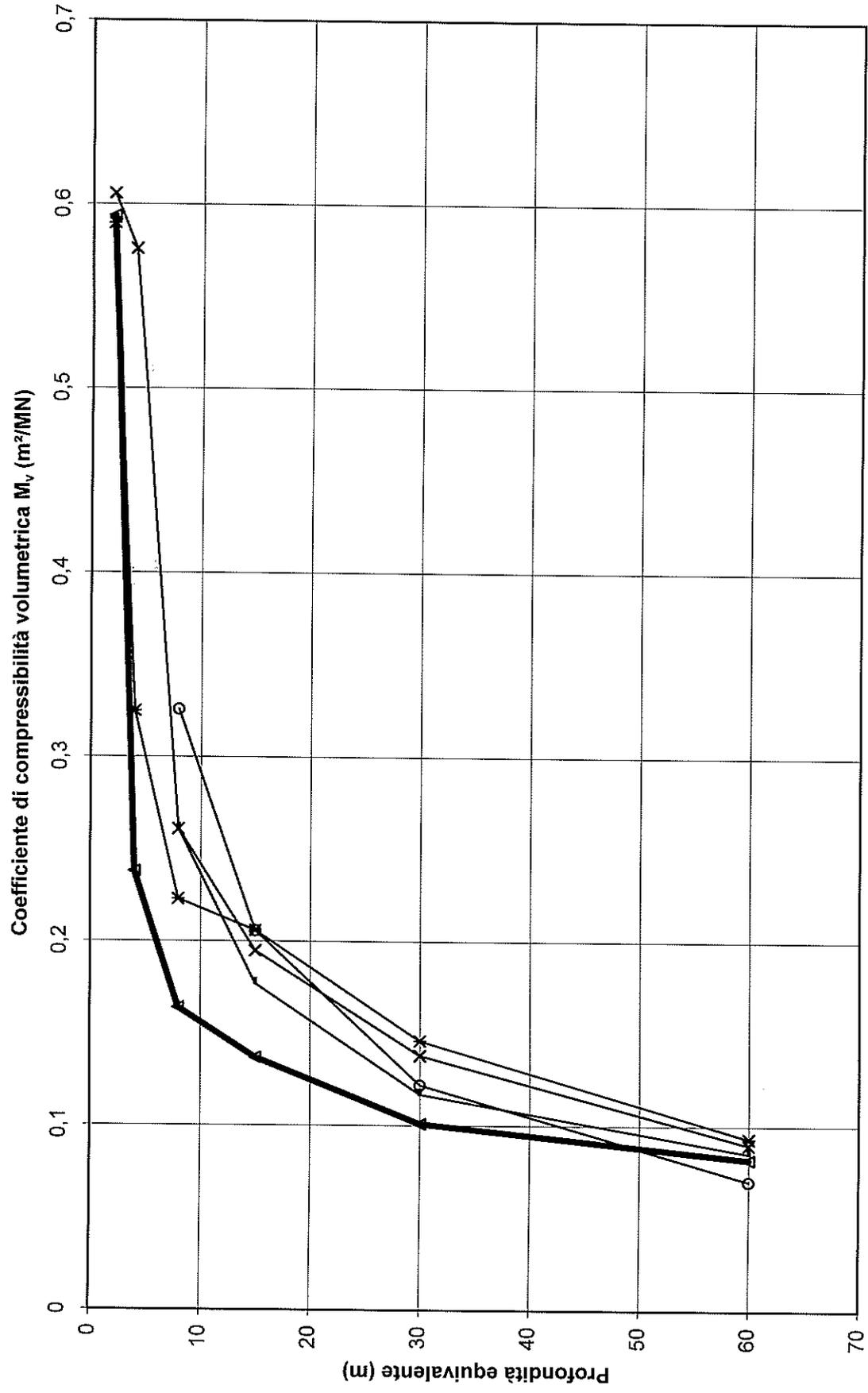


Fig. 22 - Argille con limo grigio-azzurro: Variazioni del coefficiente di compressibilità volumetrica con la profondità

6. ANALISI AMBIENTALI

6.1. Quadro normativo in materia di scarico di materiali provenienti dallo scavo dei fondali marini

Il Porto di Brindisi è stato riconosciuto dal D.M. 468/2001 sito di bonifica di interesse nazionale. Questo comporta che, secondo la normativa vigente, qualsivoglia operazione di dragaggio e scarico dei materiali dragati, nonché la stessa realizzazione della colmata con i materiali provenienti dal dragaggio, devono essere precedute dalla caratterizzazione ambientale dei sedimenti del fondale marino interessato. Ai risultati delle indagini ambientali è infatti legata sia la scelta del sito di recapito finale dei materiali dragati (in alto mare, in vasche di colmata o in discarica) sia le caratteristiche costruttive delle vasche di colmata atte a ricevere tali materiali. I riferimenti normativi principali a tal riguardo sono il D.M. 24/01/1996 del Ministero dell'Ambiente sulle escavazione di materiali dal fondo dei porti, il D.M. 471/99 "Regolamento per la bonifica dei siti inquinati", il D.M. 18/9/2001 n.468 "Programma nazionale di bonifica e ripristino ambientale dei siti inquinati" e la Conferenza dei Servizi Interna del 23/11/2001 sui criteri di progettazione delle strutture di conferimento dei materiali dragati (casce di colmata). Il D.M. 24/01/1996 del Ministero dell'Ambiente stabilisce che (art.3) gli scarichi in mare sono autorizzabili solo quando sia stata dimostrata l'impossibilità di deposizione o utilizzo dei materiali dragati a terra con minori rischi ambientali e che il conferimento di detti materiali in casce di colmata realizzate sotto costa deve essere comunque privilegiato quando le condizioni morfologiche ed ambientali lo consentano. Nel caso in cui i materiali dragati presentano livelli di inquinamento non troppo elevati l'attuale legislazione consente ancora il conferimento di detti materiali in aree confinate a contatto con il mare (vasche di colmata) con opportuni accorgimenti. Infine se i livelli di inquinamento rilevati sono elevati il materiale dragato deve essere stoccato e conferito a discarica. I criteri di progettazione delle strutture di contenimento nel caso in cui queste vengano individuate in aree confinate a contatto con il mare sono stati definiti durante la Conferenza dei Servizi interna tenutasi presso il Ministero dell'Ambiente il 23/11/2001. Seguendo il criterio

che non si deve in ogni caso determinare un aumento delle concentrazioni di inquinanti nel sito di destinazione, è stato stabilito quanto segue:

- se i materiali escavati hanno un livello di inquinamento rispondente ai valori riportati nella colonna A, tabella 1 del D.M. 471/99, questi possono essere collocati in vasca di colmata previa impermeabilizzazione dei soli argini (con coefficiente di permeabilità $>10^{-7}$)
- se i materiali escavati hanno un livello di inquinamento superiore ai limiti riportati in colonna A, ma inferiore ai limiti della colonna B ridotti del 10% (tabella 1 del D.M. 471/99), questi possono ancora essere collocati in vasca di colmata previa impermeabilizzazione sia degli argini che del fondo.

Da quanto detto appare evidente che, alla luce delle nuove normative ambientali, la scelta dell'utilizzo dei materiali dragati per la formazione della colmata, nel caso in cui questi non presentino elevati livelli di inquinamento, è obbligata e prescinde da criteri di convenienza economica o fattibilità tecnica.

6.2. Risultati delle analisi ambientali eseguite ai sensi del D.M. 471/99

Per l'area marina di Capo Bianco, all'interno del Porto di Brindisi, interessata da progetti di escavo (aree D1 e D2) e di banchinamento (area "POL" Marina Militare, area rigassificatore Brindisi GNL S.p.A. e area di raccordo fra le due) l'ICRAM ha predisposto il Piano di caratterizzazione ambientale ai fini della bonifica, approvato in Conferenza di Servizi in data 17/07/2003. Detto Piano prevedeva la disposizione, in ragione di una maglia quadrata 100x100 m, di n. 36 stazioni di prelievo in tutte le aree di indagine, di cui 8 all'interno dell'area "POL" e 21 all'interno dell'area di escavo antistante. Nelle stazioni di prelievo era previsto l'estrazione di carote di lunghezza variabile da 2 a 5 m. Più in particolare il piano prevedeva il prelievo di sezioni di carota corrispondenti ai seguenti livelli (a partire dal fondale marino): 0-10 cm, 10-30 cm, 30-50 cm, 100-120 cm e 180-200 cm per le carote di lunghezza pari a 2 m; era inoltre previsto il prelievo degli ultimi 20 cm di carota per ogni metro lineare di carota oltre i due metri e la sezione corrispondente agli ultimi 20 cm di carotaggio.

I sondaggi ambientali sono stati eseguiti dalla ditta IDROGEO S.r.l. durante la campagna di indagini geognostiche, sulla base del Piano di caratterizzazione ambientale predisposto dall'ICRAM e sotto la diretta supervisione di un funzionario dello stesso Istituto. Sono stati eseguiti 21 sondaggi nell'area da dragare, 8 sondaggi nell'area di colmata e 8 sondaggi nell'area di raccordo, distribuiti in corrispondenza dei vertici di maglie quadrangolari di lato pari a 100 m (v. Fig. 23). Il prelievo dei campioni di terreno da sottoporre ad analisi ambientali è stato eseguito direttamente dai tecnici dell'ARPA Puglia, Dipartimento Provinciale di Brindisi, che hanno preso in consegna i campioni e hanno eseguito le analisi chimico-fisiche previste.

I risultati delle analisi sono riportati nel Rapporto ARPA dell'Aprile 2005 allegato al Rapporto finale dell'Autorità di Bacino dell'Aprile 2005. Le analisi condotte hanno riguardato:

- pH e potenziale redox su tutti i campioni prelevati (n. 193);
- granulometria, peso specifico e contenuto naturale d'acqua, concentrazioni di metalli (Al, As, Cd, Cr, Hg, Ni, Pb, Cu, Zn, V), IPA, IPB, pesticidi organoclorurati, azoto e fosforo, carbonio organico totale, cianuri, idrocarburi C>12 e idrocarburi C≤12, solventi aromatici (BTEX) e Cromo VI, per un totale di 167 campioni;
- composti organostanici (TBT) su 27 campioni;
- clorobenzeni e ammine aromatiche su 25 campioni;
- diossine e furani su 2 campioni;
- parametri microbiologici su 8 campioni.

Dal confronto fra i risultati delle indagini nelle aree POL e di scavo D1 e D2 ed i "valori di intervento" definiti dalla ICRAM non si evidenzia alcuna contaminazione da parte dei parametri analizzati, ad eccezione del Cadmio per il quale è stato riscontrato un superamento del valore indicato nella Tabella ICRAM (pari a 1 mg/kg s.s.) limitatamente al campione prelevato dal livello 100-120 cm nella stazione M2 con una concentrazione di Cadmio pari a 2 mg/kg s.s..

Per quanto riguarda i parametri microbiologici, non è stata rilevata alcuna forma di contaminazione nelle aree di banchinamento e di scavo oggetto della caratterizzazione.

Sulla scorta dei risultati delle indagini, il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del territorio, ha stimato in 6954 m³ circa il volume complessivo di sedimenti da bonificare, suddivisi in 2106 m³ nell'area interessata dal dragaggio e 4848 m³ nell'area interessata dal banchinamento.

Circa la destinazione di detti sedimenti contaminati, il Ministero ha indicato la loro rimozione e il conferimento in vasca conterminata mediante impermeabilizzazione della capacità di 72000 m³, indicando tre possibilità differenti per l'ubicazione della stessa:

- area interna all'area POL;
- area interna alla zona di raccordo fra l'area POL e l'area GNL;
- vasca di colmata nell'area di Costa Morena Est.

Nulla è detto circa i sedimenti non contaminati, il che fa ritenere che il volume eccedente le necessità della colmata può trovare localizzazione sia a terra che in mare.

7. OSSERVAZIONI IN MERITO ALLA POSSIBILITA' DI RIUTILIZZO A COLMATA DEI MATERIALI SCAVATI

7.1. Considerazioni generali

Il principale obiettivo da perseguire nella realizzazione di una colmata è quello di creare uno strato di materiale il più possibile omogeneo, avente proprietà geotecniche definite e compatibili con la capacità portante e le caratteristiche deformative richieste dalle strutture da realizzare.

In genere per la formazione delle colmate vengono impiegati materiali granulari. Un materiale più economico può essere costituito da sabbia di diametro compreso nel range 0,10÷0,60 mm, in quanto presenta una buona distribuzione granulometrica e buone caratteristiche di drenaggio. E' normalmente accettabile anche una miscela di sabbia e ghiaia. La percentuale massima di frazione fine accettabile nel materiale da colmata dipende dalla distribuzione granulometrica totale. Per esempio un materiale ben gradato e con un'alta percentuale di particelle grossolane è in grado di inglobare

nella matrice una più alta percentuale di particelle fini, raggiungendo densità elevate. Materiali con una distribuzione granulometrica più fine e meno gradata, invece, si consolidano meno bene. Infine, materiali granulari più fini di 0,10 mm potrebbero essere soggetti a eccessive perdite durante le operazioni di dragaggio, trasporto e posa in opera. Detti materiali hanno anche una influenza negativa sulle operazioni di compattazione e sugli assestamenti di lungo periodo, per cui non sono da considerarsi adatti per la formazione di colmate. Inoltre un'alta percentuale di materiale fine ha una forte influenza negativa sulle proprietà dinamiche della terra in risposta ad un'azione sismica; infatti, con una più alta percentuale di materiale fine non coesivo generalmente si incrementa il rischio di liquefazione del materiale.

Venendo agli aspetti legati alla movimentazione del materiale, durante le fasi di trasporto e deposizione del materiale dragato nell'area di colmata si verifica una naturale tendenza alla separazione delle varie particelle che costituiscono il materiale. Nel caso di pompaggio del materiale, ad esempio, il materiale più grosso si deposita vicino al punto di scarico e le particelle più piccole vengono trasportate più lontano. Il materiale fine ha anche la tendenza ad accumularsi dinanzi al fronte di avanzamento della colmata. Questi livelli deboli e meno permeabili costituiti dal materiale più fine possono venire coperti dalla successiva deposizione di materiale più grossolano. Quindi la superficie finita della colmata potrebbe apparire solida e uniforme, ma potrebbe nascondere tasche e strati con contenuto d'acqua maggiore e capacità portante inferiore. Le variazioni di densità generate da questo meccanismo avranno anche un conseguente effetto sui comportamenti deformazionali della colmata, in termini di assestamento totale e differenziale, sia nel breve che nel lungo periodo.

Infine, per quanto riguarda il comportamento della colmata, si osserva che la consolidazione naturale dei materiali granulari, posti in opera con metodi idraulici, quando il diametro delle particelle è superiore a 0,10 mm, è normalmente abbastanza rapida senza necessità di ulteriori processi. Comunque, quando la permeabilità della colmata è bassa, o quando il colmamento avviene in condizioni sommerse o parzialmente sommerse, la consolidazione naturale avviene più lentamente. In tali condizioni può essere necessaria la compattazione della colmata per migliorare le

caratteristiche di addensamento del materiale. Fuori acqua, la compattazione sistematica di strati di materiale granulare si esegue facilmente usando piatti vibranti o compattatori a piastra. Per il massimo effetto, la frequenza delle vibrazioni e lo spessore degli strati deve essere scelto in funzione delle caratteristiche del materiale. Comunque, l'efficacia della compattazione da vibrazione superficiale diminuisce con la profondità. Aumentando la potenza del vibratore si può estendere l'influenza della compattazione a maggiori profondità, ma se lo spessore della colmata eccede i 2 m, sono necessari metodi alternativi come la vibro-compattazione e la compattazione dinamica ('vibro-compaction' e 'dynamic compaction').

7.2. Possibilità di riutilizzo a colmata del materiale dragato

Fra i materiali di cui è previsto il dragaggio, sulla scorta dei risultati dell'indagine geognostica, i Depositi recenti più prossimi alla linea di costa presentano una grande variabilità granulometrica che non consentirebbe di realizzare una colmata sufficientemente omogenea. Inoltre la presenza, nella parte più superficiale, di materiale argilloso e/o materiale organico, se messo a colmata, potrebbe dar luogo a effetti non trascurabili e poco prevedibili sugli assestamenti primari e secondari di lungo periodo della colmata stessa.

Al contrario lo stesso materiale presente nell'area indagata posta più a largo dalla linea di costa mostra più alte caratteristiche di omogeneità per spessori più consistenti. Il materiale che costituisce questa porzione dei depositi recenti è costituito da sabbia limosa da fine a grossolana (sondaggi SL1, SL2, SL3). La Tabella 5 seguente mostra i dati delle analisi granulometriche condotte su questo materiale.

	ARGILLA (<0,002mm)	LIMO (0,002 - 0,06mm)	SABBIA (0,06 - 2mm)	GHIAIA (2 - 20mm)
Minimo	3	14	80	0
Massimo	4	15	81	3
Medio	4	15	81	2

Tabella 5 – Distribuzione granulometrica nei Depositi recenti

La distribuzione granulometrica di questo materiale può essere espressa usando il coefficiente di uniformità (C_u) definito come segue:

$$C_u = D_{60} / D_{10}$$

dove D_{60} e D_{10} sono i diametri corrispondenti rispettivamente al 60% e al 10% del passante.

Più alto è il valore di questo coefficiente, maggiore è il range di dimensioni di particelle del terreno. Una buona distribuzione granulometrica del terreno è indicata da un Coefficiente di Uniformità maggiore di 2. Nel caso in questione il valore calcolato è compreso tra 12 e 16. Inoltre, il riferimento alle rispettive curve di distribuzione granulometrica rivela che nella sabbia prevale generalmente la frazione media (0,2-0,6 mm), mentre circa il 20-30% del materiale ha dimensioni inferiori al limite raccomandato di 0,10 mm.

Nelle Tabelle 6 e 7 seguenti è riportata, invece, la distribuzione granulometrica degli strati di Sabbia con limo giallastra e Limo con sabbia grigio-azzurro sottostanti ai depositi recenti. E' facilmente rilevabile che i due materiali sono di fatto abbastanza simili, eccetto che la Sabbia con limo giallastra è leggermente più grossolana (minore frazione limosa e maggiore frazione ghiaiosa).

	ARGILLA (<0,002mm)	LIMO (0,002 – 0,06mm)	SABBIA (0,06 – 2mm)	GHIAIA (2 – 20mm)
Minimo	2	30	33	0
Massimo	9	58	53	28
Medio	5	42	45	8

Tabella 6 – Distribuzione granulometrica della Sabbia con limo giallastra

	ARGILLA (<0,002mm)	LIMO (0,002 – 0,06mm)	SABBIA (0,06 – 2mm)	GHIAIA (2 – 20mm)
Minimo	2	14	26	0
Massimo	11	67	85	2
Medio	6	52	43	0

Tabella 7 – Distribuzione granulometrica del Limo con sabbia grigio-azzurro (a causa delle caratteristiche di granoclassazione, i dati per il limo grigio-azzurro sono stati selezionati per essere rappresentativi del materiale che può essere dragato e non per l'intero strato)

I valori del Coefficiente di Uniformità per questi due materiali sono:

Sabbia giallastra: $C_u = 6.5$

Limo grigio-azzurro: $C_u = 12.5$.

Le Tabelle 6 e 7, unitamente ai dati sopra evidenziati, mostrano che questi materiali hanno caratteristiche favorevoli per distribuzione granulometrica, anche se un più attento esame delle rispettive curve granulometriche rivela che la frazione di sabbia è di fatto quasi esclusivamente costituita da sabbie fini (0,06-0,2 mm) e che circa l'80% di entrambi è costituito da materiali più fini del limite raccomandato circa le dimensioni (0,10 mm).

Alla luce di quanto sopra, sembra chiaro che il migliore materiale ai fini della realizzazione della colmata è rappresentato da quella parte dei Depositi recenti posta più al largo, seguiti dalle Sabbie giallastre ed infine dallo strato di Limo grigio-azzurro, considerato il meno favorevole.

7.3. Volumi disponibili e volumi utilizzabili

La Tabella 8 seguente mostra i volumi totali disponibili di materiale da dragare potenzialmente utilizzabile in colmata. Tali volumi sono stati calcolati a partire dai dati batimetrici e dai risultati dei sondaggi geognostici. Si noti che il volume di Depositi recenti disponibili per la colmata è stato calcolato relativamente alla sola parte più a largo dell'area da dragare, scartando il materiale più vicino alla costa che mostra una maggiore variabilità (materiale che potrebbe utilmente essere adoperato per la colmata dell'area di raccordo POL-GNL).

TIPO DI MATERIALE	VOLUME TOTALE (m ³)
Depositi recenti	512.700
Sabbia con limo	261.200
Limo con sabbia	210.600

Tabella 8 – Volumi totali dei materiali da dragare utilizzabili in colmata

Da quanto esposto in tabella è possibile notare che il volume utilizzabile di Depositi recenti è approssimativamente il 120% del volume richiesto per la colmata (429.000 m³, cui si aggiunge il volume necessario per il riempimento dei cassoni, pari a 50.000 m³ circa). Depurando la suddetta quantità del volume di materiale non utilizzabile per i motivi sopra esposti, stimando per eccesso detta quantità pari al 50% del totale, il volume di materiale proveniente dai Depositi recenti utilizzabile per la colmata si riduce a 256.000 m³.

Per valutare il potenziale volume in colmata di qualunque materiale marino dragato è poi necessario considerare i cambi volumetrici che si verificano durante le varie fasi di dragaggio, trasporto e posa in opera. Per esempio, potrebbe esserci una riduzione di volume dovuta alla perdita di materiale fine oppure un incremento di volume dovuto a fenomeni di dilatanza causati dai processi di escavazione. Il cambio volumetrico potrebbe essere influenzato da diversi fattori ed è dipendente sia dalle caratteristiche del materiale dragato che dal metodo di dragaggio e trasporto. Raccomandazioni generali suggeriscono che, usando una draga a tazze, il volume di materiale posto a colmata tende ad aumentare rispetto al volume iniziale, a causa della dilatanza, ma diminuisce a causa della perdita di materiale fine, per cui il rapporto volume finale/volume iniziale può essere assunto variabile da 1,1 a 0,6. Questo suggerisce che per i Depositi recenti tale rapporto può essere assunto prossimo all'unità, per esempio 0,9. Al contrario, l'alto contenuto di materiale fine delle Sabbie giallastre e del Limo grigio-azzurro suggerisce di assumere un valore di tale rapporto più vicino al valore più basso, per esempio 0,7.

La Tabella 9 seguente mostra i volumi finali dei materiali di colmata, ottenuti con una stima cautelativa che utilizza i sopra menzionati fattori.

Tipo di materiale	Volume totale (m ³)	Volume utile stimato (m ³)	Fattori di riduzione	Volume totale stimato (m ³)
Depositi Recenti	512.700	≥256.000	0,9	230.400
Sabbia con limo	261.200	~261000	0,7	182.800
Limo con sabbia	210.600	~210000	0,7	147.400

Tabella 9 – Stime dei volumi finali in colmata dei materiale effettuate considerando la presenza di porzioni di materiale scadente e i cambi volumetrici dovuti alle operazioni di dragaggio, trasporto e sistemazione a colmata.

I valori stimati sopra esposti mostrano che il materiale proveniente dallo scavo del fondale è sufficiente non solo per la colmata dell'area POL, ma anche per quella dell'area di raccordo POL-GNL. Va osservato che queste sono stime teoriche che non tengono conto di eventuali cambi volumetrici successivi alla realizzazione della colmata dovuti a compattazione meccanica o ad assestamenti di lungo periodo. Misurazioni, controlli e prove in situ durante l'esecuzione dei lavori sono necessarie per fornire stime più accurate dei cambi volumetrici dovuti alle operazioni di dragaggio, trasporto e posa in opera.

7.4. Modalità di prelievo dei materiali del fondale

Le modalità di prelievo dei materiali presenti sui fondali marini sono riconducibili essenzialmente a due tecnologie: a) prelievo con pompa aspirante, b) prelievo con draga a tazze.

La prima tecnica si presta in particolare per l'aspirazione di materiali sabbiosi e/o limosi sciolti e consente lo sversamento diretto del materiale anche a distanza di alcune centinaia di metri dal punto di estrazione. Il difetto principale di questa tecnica è rappresentata dal fatto che il materiale solido si trova disperso in una grande massa d'acqua e richiede tempi lunghi per la decantazione.

La seconda tecnica si presta sia al prelievo di materiali sabbiosi sciolti che di materiali dotati di bassa coesione. Essa richiede l'utilizzazione di un natante di appoggio (chiatta) su cui scaricare il materiale prelevato, da trasportare successivamente a colmata o a rifiuto. Con questa tecnica il materiale estratto si presenta saturo, ma allo stato solido. Il difetto principale di questa tecnica è rappresentato dalla profondità (≥ 4 m) dello specchio di mare necessaria perchè la chiatta a fondo apribile possa scaricare il materiale.

Nel caso in esame, i materiali rinvenuti, anche alla luce dei risultati delle prove geotecniche di laboratorio, si prestano ad una facile escavazione, dal momento che sono classificabili come terreni sciolti (sabbie e sabbie calcarenitiche), ovvero come terreni debolmente coesivi (sabbie con limi e limi con sabbie).

La scelta della tecnica di prelievo dipende quindi dalla tempistica delle operazioni da svolgere e dalla rapidità con cui si vogliono conseguire i parametri geotecnici finali dei terreni posti a colmata.

Esemplificativamente, in questa sede si può prefigurare la seguente tempistica degli interventi:

- a) escavazione del fondale per l'imbasamento dei cassoni in c.a. prefabbricati: parte del materiale scavato in questa fase sarà avviato a discarica, parte sarà utilizzato per zavorrare i cassoni a mano a mano che essi vengono varati;
- b) posizionamento in opera dei cassoni e zavorramento degli stessi;
- c) escavazione del fondo marino per l'approfondimento delle quote del fondale stesso;
- d) costituzione della colmata a tergo dei cassoni.

Per quanto riguarda la fase a, lo scrivente ritiene conveniente l'utilizzazione di draghe a tazza in modo da ottenere materiale con il minor contenuto d'acqua possibile. Il suddetto materiale, caricato su chiatte a fondo apribile, sarà trasportato a discarica controllata.

Raggiunta la quota di imbasamento dei cassoni, sarà realizzato lo scanno di imbasamento con tout-venant di cava e saranno varati i cassoni, allagando i compartimenti interni (fase b). Per zavorrare i cassoni si utilizzerà lo stesso materiale di scavo, il cui prelievo potrà avvenire con l'una o l'altra delle tecniche su illustrate. Infatti, poiché il cassone è stabile già con le camere interne piene di acqua, si potrà anche ricorrere alla draga aspirante, pompando il materiale di scavo direttamente nelle camere interne.

L'approfondimento delle quote del fondale (fase c) potrà essere effettuata mediante draga a tazze almeno fino a quando le quote della zona da ricolmare consentiranno l'arrivo di chiatte a fondo apribile. Successivamente potrà essere più conveniente utilizzare la draga aspirante riversando direttamente il materiale nella cassa di colmata.

7.5. Utilizzabilità dei materiali per la costruzione della colmata e per il riempimento dei cassoni

Circa la utilizzabilità del materiale presente sul fondale marino ai fini del progetto in questione, occorre distinguere due aspetti: quello della realizzazione della colmata e quello del riempimento dei cassoni cellulari.

Il secondo aspetto è sicuramente quello che pone meno problemi. Infatti, il materiale di riempimento dei cassoni ha il solo scopo di zavorrare i cassoni ai fini della stabilità degli stessi. Da questo punto di vista può essere utilizzato qualsiasi tipo di materiale inerte e pertanto i materiali disponibili in loco sono sicuramente adatti allo scopo.

Per quanto riguarda l'altro aspetto (costruzione della colmata), la scelta dei materiali è sicuramente più importante in quanto, come già chiarito nei paragrafi precedenti, le loro caratteristiche influenzano non solo il comportamento meccanico (stabilità del manufatto), ma anche i tempi di utilizzazione del manufatto (consolidazione dei materiali e cedimenti conseguenti). A tal riguardo si riportano di seguito alcune considerazioni tratte da casi reali di colmate realizzate in tempi recenti.

7.5.1. Esperienze recenti di colmate a mare

Una delle esperienze più interessanti di riempimenti a mare è rappresentata dalla realizzazione di una grossa colmata nel porto di Fukuoka City in Giappone. La colmata presenta, infatti, una superficie di circa 400 ettari ed ha richiesto 28 milioni di metri cubi di materiali. Da detta esperienza sono tratte le considerazioni che seguono, la cui validità è del tutto generale per problemi simili. I materiali utilizzati per la colmata sono stati estratti dal fondale marino, utilizzando due tecniche differenti (pompaggio e dragaggio), e sono costituiti da terreni argilloso-limosi con sabbia. Nel caso di materiali trasportati idraulicamente (mediante pompaggio) il contenuto d'acqua è risultato molto elevato. Nel caso di materiale dragato il contenuto d'acqua è risultato molto più ridotto. In entrambi i casi il materiale che si deposita sul fondo si trova in condizioni di non consolidazione. Poiché i parametri di consolidazione della miscela acqua-terra, nel campo dei livelli di sforzo ordinari, dipendono in larga misura dal contenuto d'acqua

iniziale, i parametri geotecnici degli strati di colmata ottenuti con l'uno o l'altro metodo possono essere alquanto differenti tra loro, per cui si rende necessario determinare i parametri di consolidazione di entrambi i tipi di materiale, effettuando opportune analisi di laboratorio. Se le sperimentazioni effettuate sono appropriate al problema, è possibile effettuare una previsione credibile dei tempi necessari per la consolidazione del materiale della colmata per effetto del carico progressivamente crescente su di esso agente. E' possibile in tal caso anche programmare l'uso di tecniche per l'accelerazione della consolidazione, quali dreni verticali, sovraccarico del manufatto, ecc.. Il problema presenta comunque non poche difficoltà, come dimostrano i risultati dei controlli effettuati in corso d'opera e dopo il termine dei lavori, mediante assestimetri e controlli del materiale in sito.

7.5.2. Caso in esame

Nel caso in esame il materiale da utilizzare è costituito da una alternanza di sabbia con limo e di limo con sabbia, con bassa percentuale di argilla. Detti materiali in sito presentano caratteristiche geotecniche discretamente buone pur avendo subito una bassa consolidazione naturale (infatti, sulla base dei risultati di laboratorio il materiale può essere definito normal consolidato o leggermente sovraconsolidato). Le operazioni di prelievo provocheranno comunque la distruzione della struttura da essi acquisita nel tempo e il rimescolamento del materiale che, una volta riversato in mare, tenderà a depositarsi sul fondo configurandosi come sabbia e limo, nella migliore delle ipotesi, ovvero come alternanza di livelli sabbioso-limosi e di livelli limoso-sabbiosi, nella peggiore, anche in relazione alla granulometria del materiale versato.

Inizialmente il materiale che si depositerà sul fondo si presenterà soffice, acquisendo un grado di consolidazione progressivamente crescente a mano a mano che si incrementa l'altezza della colmata. E' tuttavia verosimile attendersi che il materiale finale rimanga a lungo in uno stato di normal consolidazione, salvo intervenire con opportune tecniche.

Tutto ciò premesso, alla luce dei risultati delle prove di laboratorio svolte sui campioni estratti, in questa sede si ritiene di poter affermare che il materiale scavato e posto a colmata possa conseguire caratteristiche geotecniche tali da poterlo ritenere idoneo per detto scopo.

Per quanto riguarda le caratteristiche geotecniche che i materiali sabbiosi, sabbioso-limosi e limoso-sabbiosi assumeranno dopo la collocazione a colmata, in attesa dei risultati di specifiche prove geotecniche (di cui si dirà in un successivo paragrafo), tenuto conto delle modalità di messa in opera che riproducono in qualche modo il processo naturale di deposizione di detti terreni, tenuto conto che si tratta di materiale con permeabilità medio-alta (per cui sotto carico si dissipano rapidamente le pressioni interstiziali), si ritiene che esse non saranno molto dissimili dai valori del materiale naturale in sito. Pertanto, sulla scorta dei risultati delle indagini, si ritengono sufficientemente realistici i valori esposti in Tabella 10:

	γ_d	γ_t	c'	ϕ'
Sabbia con limo in sito	1,56÷1,67	1,99÷2,06	0	37°
Limo con sabbia in sito	1,52÷1,71	1,95÷2,07	0	35°
Sabbia e limo a colmata	1,60	1,90	0	32°

Tabella 10 – Caratteristiche geotecniche dei materiali sabbioso-limosi

7.6. Controllo della colmata in fase di costruzione

In base alle previsioni progettuali, la colmata fino a quota +0,80 m s.m. sarà costituita dal materiale sabbioso-limoso estratto dal fondale marino; al di sopra di quella quota, fino a +3,00 m s.m. circa, sarà invece costituita da tout-venant di cava. Dei due materiali quello che riveste il maggiore interesse dal punto di vista dei controlli è sicuramente il materiale sabbioso-limoso del fondale.

Rimandando all'Appendice per i dettagli, si prevede sin d'ora le seguenti azioni finalizzate al controllo della messa in opera del materiale e del suo comportamento nel

tempo: a) laboratorio di cantiere, b) controllo delle deformazioni verticali del rilevato della colmata.

Ai fini di una valutazione speditiva in corso d'opera della idoneità all'impiego del terreno dragato quale materiale di colmata, si procederà in corso d'opera al controllo granulometrico, alla determinazione dei Limiti di Atterberg e delle caratteristiche fisiche. Dette semplici prove di caratterizzazione geotecnica potranno essere condotte presso un laboratorio di cantiere, dotato delle necessarie attrezzature e di un tecnico allo scopo istruito.

Ai fini del controllo delle deformazioni verticali della colmata, si prevede la realizzazione di due o tre verticali assestometriche che consentano di seguire nel tempo l'addensamento del materiale della colmata per effetto dell'incremento del carico litostatico sovrastante. Trattandosi di un manufatto che cresce progressivamente in acqua andrà studiato in modo particolare l'irrigidimento dell'assestometro onde evitare lo "effetto bandiera" prodotto dal disomogeneo incremento del carico, dal moto ondosso, ecc. durante la fase di costruzione.

I cedimenti del corpo del rilevato saranno misurati avvalendosi di assestometri a piastra ubicati a differenti altezze nell'ambito dello spessore della colmata. Potrebbe a tal fine prevedersi la costruzione di tre verticali di misura, ciascuna costituita da tre punti di controllo degli spostamenti.

Una volta terminata la colmata, la misura degli spostamenti delle piastre verrà effettuata alla sommità delle aste stesse mediante misura topografica di precisione.

L'utilizzazione dei sistemi di misura sopra descritti consentirà di osservare il comportamento deformativo sia del terreno di fondazione che del terreno della colmata durante tutto il periodo di costruzione della colmata e dopo il termine costruzione.

8. CAPACITA' PORTANTE DEI TERRENI DI FONDAZIONE DEI CASSONI CELLULARI E DELLE SCOGLIERE DI CONTENIMENTO

Le opere in progetto comprendono:

- a) cassoni in c.a. costituenti il bordo esterno della zona di colmamento;
- b) scogliere in pietrame costituenti il bordo interno della zona di colmamento;
- c) colmata in terra.

La banchina in cassoni è impostata ad una profondità dal livello medio mare pari a -12,50 m circa nelle condizioni più sfavorevoli, presenta una altezza massima di 15,50 m e una larghezza massima alla base pari a 11 m (Fig. 24). Le scogliere in pietrame sono, invece, poggiate sul fondale naturale a quota -6.00÷-8.00 m dal livello medio mare (Fig. 25).

Di seguito viene valutata la capacità portante del terreno di fondazione dei cassoni e di quello delle scogliere.

8.1. Capacità portante del terreno di fondazione dei cassoni

Attribuendo al cassone un peso di volume medio pari a 2,20 t/m³, mediato fra peso della struttura in c.a. e peso del materiale sabbioso-limoso di riempimento, il carico da esso trasmesso al terreno di fondazione è pari a:

$$Q_t = 2,20 \times (15,50 \times 11,00 \times 1,00) / (11,00 \times 1,00) = 34,10 \text{ t/m}^2 \text{ circa.}$$

Per quanto riguarda il carico limite del terreno di fondazione, costituito dai limi sabbiosi su descritti, assunti i parametri geotecnici di seguito esposti:

$$\gamma_t = 2,00 \text{ t/m}^3$$

$$c_u = 0,60 \text{ kg/cm}^2 \quad \text{con } \phi = 0$$

$$\phi' = 30^\circ \div 35^\circ \quad \text{con } c' = 0$$

risulta:

$$\begin{aligned} Q_{lim} &= 0,5 \gamma' B N_\gamma + \eta q N_q = 0,5 \times 1,00 \times 11,00 \times 30 + 0,5 \times 1,00 \times 10,00 \times 23 = \\ &= 165 + 115 = 280 \text{ t/m}^2 \end{aligned}$$

Segue, assunto in prima approssimazione un coefficiente di sicurezza pari 4 per tenere conto della eccentricità dei carichi sul piano di fondazione:

SEZIONE C - C

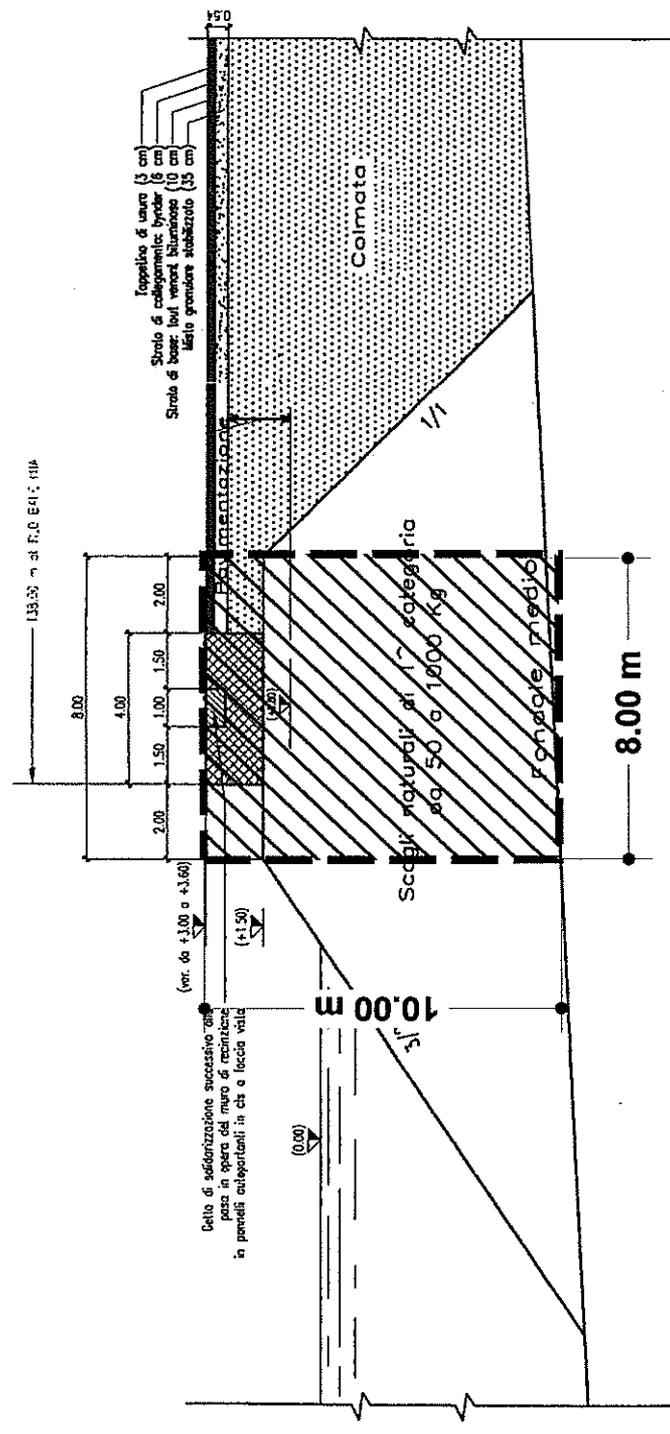


FIG. 25 - Schema di calcolo della capacità portante dei terreni di fondazione della scogliera

$$Q_{amm} = Q_{lim} / 4 = 280 / 4 = 70 \text{ t/m}^2 > Q_t = 34,1 \text{ t/m}^2$$

Pertanto il terreno è in grado di sopportare senza rompersi i carichi trasmessi dalla struttura dei cassoni.

8.2. Capacità portante del terreno di fondazione delle scogliere

Considerando, a vantaggio di sicurezza, la sola parte centrale della scogliera, costituita da un solido a sezione rettangolare (v. Fig. 25), con ragionamento analogo a quello sviluppato al paragrafo precedente si ottiene:

$$Q_t = 2,00 \times (10,00 \times 8,00 \times 1,00) / (8,00 \times 1,00) = 20 \text{ t/m}^2 \text{ circa}$$

$$\begin{aligned} Q_{lim} &= 0,5 \gamma' B N_\gamma + \eta q N_q = 0,5 \times 1,00 \times 8,00 \times 30 + 0,5 \times 1,00 \times 10,00 \times 23 = \\ &= 120 + 115 = 235 \text{ t/m}^2 \end{aligned}$$

$$Q_{amm} = Q_{lim} / 4 = 235 / 4 = 59 \text{ t/m}^2 > Q_t = 20 \text{ t/m}^2$$

Pertanto il terreno è in grado di sopportare senza rompersi i carichi trasmessi dalla struttura della scogliera.

9. ASSESTAMENTO STIMATO DEL MATERIALE DI COLMATA NON COMPATTATO

Come è noto, i cedimenti registrati in una colmata realizzata con materiale granulare ben compattato sono normalmente trascurabili, con la maggiore parte del cedimento che solitamente si sviluppa immediatamente dopo l'imposizione del carico. A causa della difficoltà di campionamento in terreni granulari, non ci sono test di laboratorio utilizzabili per determinare le caratteristiche di consolidazione di tali materiali. Conseguentemente, l'assestamento delle fondazioni poste su materiale granulare viene stimato con metodi semi-empirici basati su prove SPT e su altre prove

in-situ. Burland e Burbidge hanno stabilito una relazione empirica per calcolare l'assestamento dei terreni granulari basato sui valori N_{SPT} . Per usare questo modello e stimare il potenziale assestamento in un materiale di colmata non compattato è necessario fare alcune assunzioni circa i parametri di densità relativa.

Le densità relative dei materiali di colmata sono fornite da Burland e Burbidge sulla base del valore N_{SPT} del corrispondente materiale in sito ridotto ad una data percentuale. Per colmate realizzate mediante pompaggio di materiali sabbiosi medio-fini gli autori indicano valori compresi tra il 35% e il 45% di N_{SPT} in-situ, se i materiali sono depositi in acqua e compresi tra il 50% e il 65% se depositi fuori acqua. Considerando la presenza di materiale limoso nei depositi da utilizzare per la colmata, si ritiene prudente scegliere lo scenario peggiore (35% per materiale sommerso e 50% per materiale fuori acqua).

La Tabella 11 mostra i dati di SPT modificati usando questi fattori, assumendo che i Depositi recenti costituiranno la parte sottomarina della colmata e la Sabbia con limo giallastra la parte emersa.

Materiale di colmata	Valori medi di N_{SPT}	Fattore di correzione	Valori stimati di N_{SPT} per materiale in opera
Depositi recenti	30	0,35	11
Sabbia con limo	34	0,50	17

Tabella 11 – Dati di N_{SPT} modificati per stimare i valori corrispondenti al materiale in colmata non compattato

Considerando la vicinanza dei due valori di N_{SPT} stimati e l'incertezza dell'esatta proporzione dei Depositi recenti e delle Sabbie giallastre nella colmata, per scopi pratici, è ragionevole assumere una media globale stimata di $N_{SPT} = 14$ per tutto il materiale di colmata non compattato.

Gli assestamenti riportati nella Tabella 12 seguente sono stati calcolati usando il metodo 'Adjusted Elasticity' (Burland e Burbidge, 1985) e le seguenti assunzioni:

- Carico netto sulle fondazioni di 100 kPa (equivalente ad un serbatoio di 20 m di diametro e 10 m di altezza)

- Fattori di fluttuazione del carico che riflettono il periodico riempimento e svuotamento dei serbatoi
- Scenario 1: Rappresentativo della situazione peggiore, ovvero spessore maggiore del materiale di colmata (9 m)
- Scenario 2: Rappresentativo delle condizioni medie, ovvero usando la profondità media del materiale di colmata (6,5 m)
- Media stimata di N_{SPT} in-situ = 14, relativa a materiale di colmata non compattato (Tabella 11)
- Valore minimo di assestamento calcolato usando i valori medi dell'Indice di Compressibilità (I_c) nell'abaco proposto da Burland e Burbidge (Fig. 26).
- Valore massimo dell'assestamento calcolato usando i limiti superiori dei valori di Compressibilità (I_c).

	Assestamento immediato (mm)		Assestamento di lungo periodo (mm) (30 anni)		Assestamenti totali (mm)	
	min	max	Min	max	min	max
Scenario 1 (peggiore)	42	150	39	135	81	285
Scenario 2 (medio)	37	130	35	120	72	250

Tabella 12 - Valori di assestamento stimati per materiale di colmata non compattato

I valori su calcolati forniscono utili indicazioni sui valori limite degli assestamenti per il materiale da utilizzare a colmata. Burland e Burbidge hanno precisato che i valori superiori di I_c conducono probabilmente ad una sovrastima dell'assestamento delle sabbie sciolte. Comunque tenendo presente che il caso in esame può essere considerato una situazione estrema (ovvero libera deposizione subacquea di materiale di colmata senza compattazione), sembra ragionevole in questo caso assumere come validi detti valori limite superiore. E' importante notare che l'assestamento totale di progetto sarà dato dalla somma dell'assestamento della colmata e di quello del terreno sottostante, dovuti al carico netto applicato.

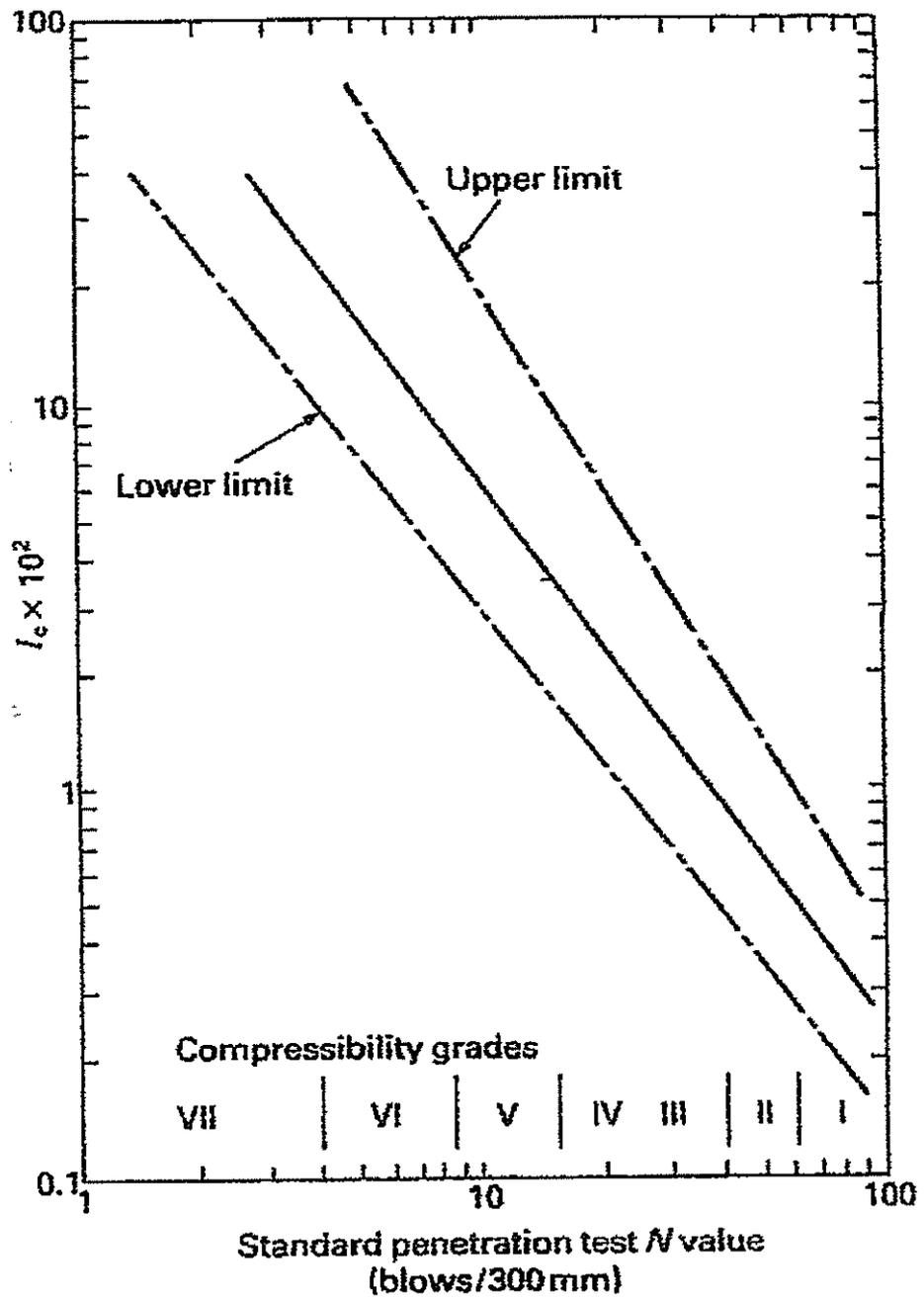


Fig. 26
 Valori degli indici di compressibilità per sabbie e ghiaie
 (Burland e Burbidge, 1985)

10. ZONE DI TRANSIZIONE GRANULOMETRICA E PALI DRENANTI

10.1. Zone di transizione granulometrica

L'utilizzazione, per la costruzione del corpo della colmata, dei materiali provenienti dallo scavo del fondale, la cui fascia granulometrica ricade nel campo delle sabbie e dei limi, implica la necessità di realizzare una zona di transizione granulometrica fra la colmata e la scogliera di chiusura, da un lato, e fra la colmata e il rinfiango dei cassoni, dall'altro. Detta necessità discende dal fatto che, in assenza di una zona di transizione, potrebbe verificarsi una migrazione di materiale sottile (sabbia e limi) dal corpo della colmata verso la scogliera e verso il rinfiango, con conseguente cedimento del piano della colmata.

Le caratteristiche granulometriche della zona di transizione sono state ricavate con la regola dei filtri, a partire dalla fascia granulometrica del corpo della colmata e di quella della scogliera.

Come è noto la regola dei filtri richiede che siano verificate le seguenti due condizioni:

- a) $5 D_{15b} < D_{15f} < D_{85b}$ (essendo D_{15b} e D_{85b} il diametro della frazione passante al 15% e all'85% del materiale di base da proteggere e D_{15f} il diametro corrispondente al 15% del materiale da filtro);
- b) la fascia granulometrica del materiale da filtro deve essere simile alla fascia granulometrica del materiale da proteggere.

Nella Fig. 27 allegata sono riportate le fasce granulometriche della zona di transizione e dei rinfianchi dei cassoni, ricavate con la regola dei filtri.

10.2. Pali drenanti

Il materiale costituente il corpo della colmata è costituito da sabbie e limo. Trattasi di materiale dotato di discrete caratteristiche di permeabilità per cui i tempi di consolidazione del manufatto non dovrebbero essere particolarmente lunghi (cfr. par. 9.). C'è tuttavia da osservare che le dimensioni della colmata (400x150 m circa),

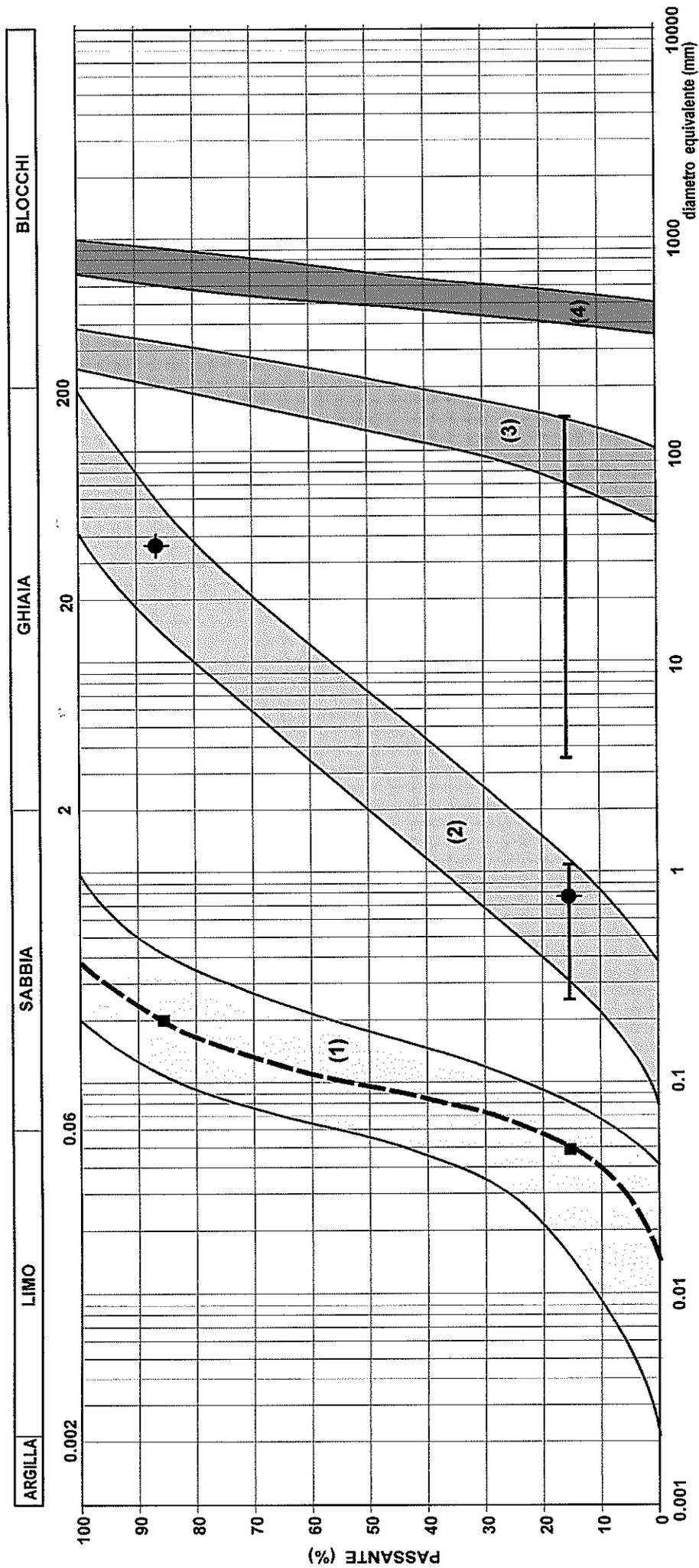


Fig. 27 - Fasce granulometriche delle varie zone della colmata:
1) corpo della colmata 2) Zona di transizione 3) Rinfianchi dei cassoni prefabbricati 4) Scogliere

rendono particolarmente lungo il percorso di filtrazione dal momento che le uniche zone drenanti sono quelle costituite dai materiali formanti la scogliera e il rinfiacco dei cassoni. Pertanto, al fine di accelerare il processo di consolidazione del materiale in argomento sono stati inseriti alcuni pozzi drenanti distribuiti all'interno della colmata, secondo una maglia quadrata di lato pari a 20 cm. Detti pozzi saranno riempiti di materiale drenante sabbioso-ghiaioso e saranno collegati in testa dallo strato di tout-venant di cava che completa la colmata a partire da quota +0,80 m s.m. Per quanto riguarda le caratteristiche granulometriche del materiale drenante, esse sono le stesse adottate per la zona di transizione granulometrica di cui al paragrafo precedente.

11. CALCOLO DEI CEDIMENTI DEI CASSONI

Per la valutazione dei cedimenti dei cassoni, poiché i terreni di fondazione sono costituiti da sabbie e limi, si è fatto ricorso alla teoria di Burland e Burbridge:

$$S = f_s f_i f_t (Q' - 2/3 \sigma_{v' \max}) B^{0.7} I_c \quad (\text{mm})$$

Dove:

$f_s =$	Fattore di forma
$f_i =$	Correzione per spessore degli strati
$f_t =$	Fattore di tempo
$Q' =$	Pressione efficace lorda (kPa)
$\sigma_{v' \max} =$	Tensione verticale efficace alla quota di imposta della fondazione (kPa)
$B =$	Larghezza fondazione (m)
$I_c =$	Indice di compressibilità

Risulta:

$$f_s = ((1,25 \times L/B) / (L/B + 0,25))^2$$

$$f_i = (H/z_i) (2 - H/z_i) \quad (f_i = 1 \text{ per } z_i < H)$$

essendo:

z_i = profondità significativa ($\cong 6\text{m}$ per $B = 11\text{ m}$)

H = spessore strato compressibile = 10m

$$f_t = 1 + R_3 + R \log t/3$$

ove:

t = tempo espresso in anni (pari a 1 per cedimenti immediati)

R_3 è una costante = 0,3 per carichi statici

R è una costante = 0,2 per carichi statici

Nel caso in esame (cfr. Fig. 28), risulta:

$$f_s = ((1,25 \times L/B) / (L/B + 0,25))^2 = ((1,25 \times 160/11) / (160/11 + 0,25))^2 = 1,51$$
$$f_i = (H/z_i) (2 - H/z_i) = (10/6) (2 - 10/6) = 0,56$$

Per quanto riguarda l'Indice di Compressibilità I_c esso si ricava dalla formula seguente:

$$I_c = 1,706 / N_{AV}^{1,4}$$

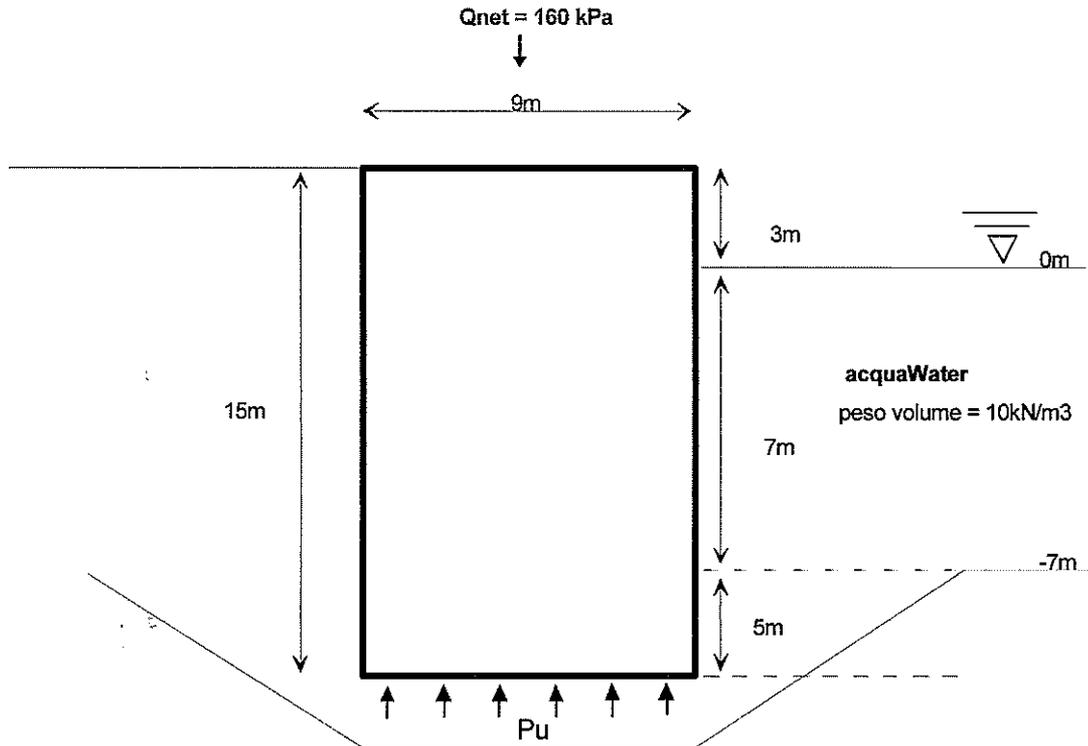
ove N_{AV} rappresenta la media dei valori di N_{SPT} all'interno della profondità significativa z_i .

Per $N_{SPT} = 25$, risulta $N_{AV} = 92$ e $I_c = 1,0185$.

Fig. 28 Schema di calcolo e parametri geotecnici

Peso netto = (peso cassone) - (pressione idrostatica) - (peso terreno scavato)

Peso netto = (15 x 22) - (12 x 10) - (5 x (20-10))



LIMO SABBIOSO

peso volume = 20 kN/m³

$M_v = 0.0365 \text{ m}^2 / \text{MN}$

SPT 'N' = 33

-22m

ARGILLE AZZURRE

peso volume = 20 kN/m³

$M_v = 0.0961 \text{ m}^2 / \text{MN}$

11.1 Cedimento immediato

Trascurando, a vantaggio di sicurezza, il secondo termine in parentesi, risulta:

$$S_i = 1,51 \times 1 \times 1 \times 160 \times 11^{0,7} \times 0,0185 = 24 \text{ mm}$$

11.2 Cedimento a lungo termine (30 anni)

Per $t = 30$ anni risulta

$$F_t = 1 + 0,3 + 0,2 \log 30/3 = 1,5$$

$$S_{30} = 1,51 \times 1 \times 1,5 \times 160 \times 11^{0,7} \times 0,0185 = 36 \text{ mm.}$$

11.3 Cedimento di consolidazione

Un altro tipo di approccio al problema può essere effettuato utilizzando la classica teoria della elasticità. Il modello utilizzato è quello riportato nella Figura 29. Il calcolo dei cedimenti è riportato nella tabella 13 che segue.

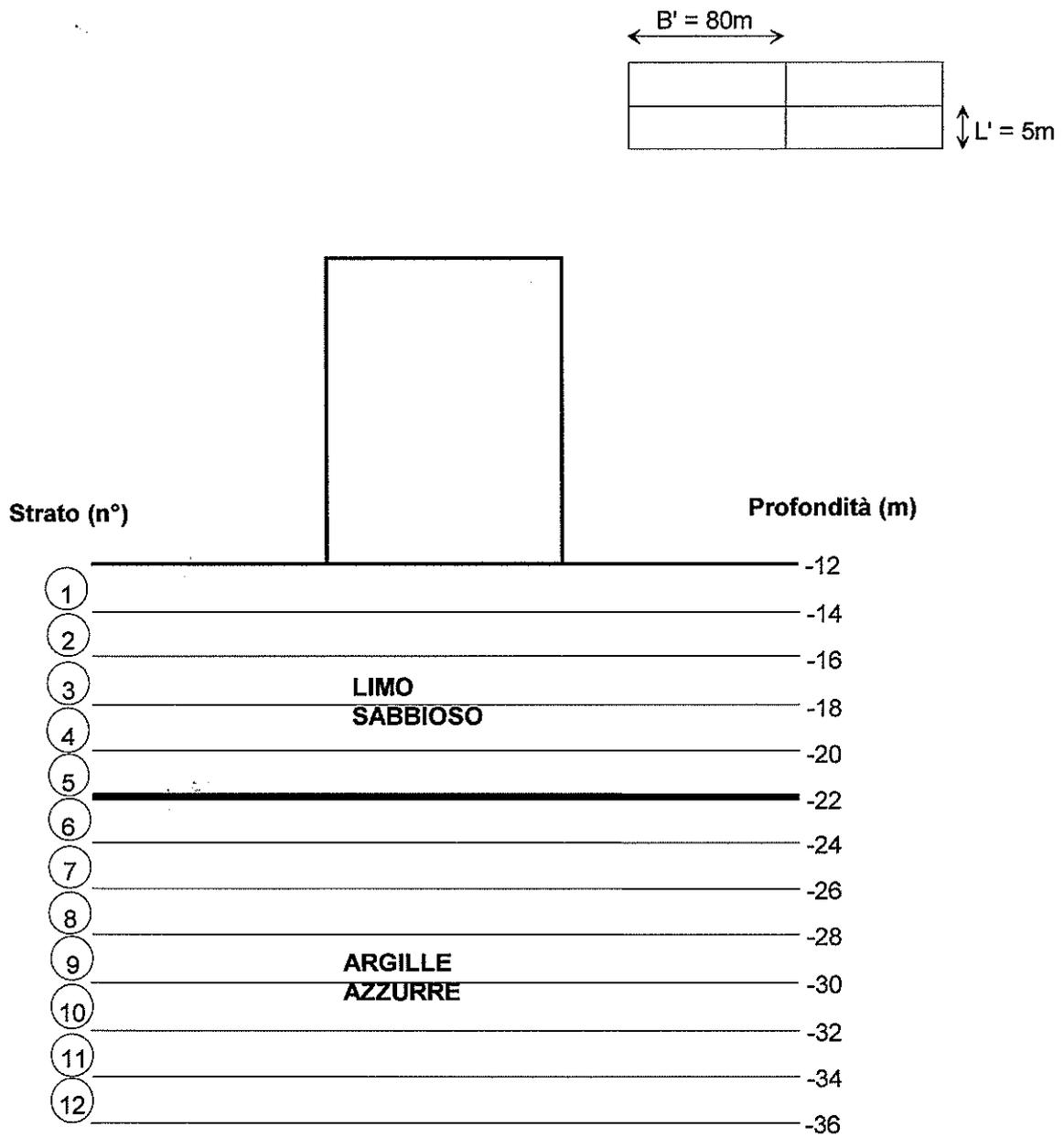


Fig. 29 – Schema di calcolo dei cedimenti dei cassoni con la teoria dell'elasticità

TAB. 13 - Valutazione dei cedimenti utilizzando la classica teoria della consolidazione										
Strato n°										
	Profondità al di sotto della fondazione (m)									
	Quota in asse allo strato									
	Tensione totale agente (kPa)									
	Pressione dell'acqua (kPa)									
	Tensione efficace (kPa)									
	Fattore di influenza (If)									
	25% di incremento tensionale									
	Incremento tensionale in asse									
									Mv (msq./MN)	S (mm)
1	12 a 14	1	20	10	10	0,24919	39,87	159,5	0,0365	
2	14 a 16	3	60	30	30	0,23263	37,22	148,9	0,0365	11
3	16 a 18	5	100	50	50	0,20458	32,73	130,9	0,0365	10
4	18 a 20	7	140	70	70	0,17197	27,52	110,1	0,0365	8
5	20 a 22	9	180	90	90	0,13745	21,99	88,0	0,0365	6
6	22 a 24	11	220	110	110	0,13741	21,99	87,9	0,0961	17
7	24 a 26	13	260	130	130	0,11541	18,47	73,9	0,0961	14
8	26 a 28	15	300	150	150	0,09014	14,42	57,7	0,0961	11
9	28 a 30	17	340	170	170	0,09007	14,41	57,6	0,0961	11
10	30 a 32	19	380	190	190	0,06194	9,91	39,6	0,0961	8
11	32 a 34	21	420	210	210	0,06178	9,88	39,5	0,0961	8
12	34 a 36	23	460	230	230	0,06155	9,85	39,4	0,0961	7

Pertanto, il cedimento degli strati limoso-sabbiosi è pari a 47 mm, mentre quello del basamento argilloso è pari a 76 mm.

Introducendo i fattori di correzione di Skempton e Bjerrum, ovvero quelli di Burland, si ottengono i valori corretti dei cedimenti, riportati nelle Tabelle 14 e 15 seguenti:

TAB. 14 - Fattori correttivi utilizzati per il calcolo dei cedimenti a partire dai dato edometrici			
	Skempton & Bjerrum	Burland et al	
	Fattore di riduzione	Cedimento immediato	Cedimento di consolidazione
Limo sabbioso	$U_g = 0,5$	0,7 ed	0,3 ed
Argille azzurre	$U_g = 0,7$	0,5 ed	0,5 ed

TAB. 15 Valori corretti dei cedimenti				
	Modello di terreno			
	Terreno non coesivi		Terreno coesivo	
	Immediato	Lungo termine	Immediato	Lungo termine
Limo sabbioso	24 mm	12 mm	17 mm	7 mm
Argille azzurre	0	0	26 mm	27 mm

Bari, Settembre 2005

APPENDICE A

Attività di sperimentazione e di controllo

APPENDICE A – Attività di sperimentazione e di controllo

1. Generalità

Fino alla profondità di 9-12 m dal livello medio mare, profondità massima alla quale è previsto avvenga lo scavo, il fondale marino è costituito da litotipi sabbiosi, con inclusi elementi ciottolosi di natura calcarenitica, sabbioso-limosi e limoso-sabbiosi.

La possibilità di utilizzare detti materiali ai fini della realizzazione della colmata, alla luce dei risultati delle sperimentazioni di laboratorio condotte, non è da escludere, fatta salva la opportunità di procedere, preventivamente alla progettazione, a particolari sperimentazioni geotecniche di laboratorio e, successivamente, in corso d'opera, al monitoraggio della colmata, per seguire la evoluzione della consolidazione dei materiali nel tempo in modo da poter prevedere il tempo necessario perché i cedimenti della colmata si esauriscano.

In particolare si tratta quindi di:

1. prevedere un laboratorio di cantiere attrezzato per la esecuzione di quelle prove di controllo che consentano di verificare le caratteristiche acquisite dal materiale posto in opera, per certificare la sua rispondenza al progetto;
2. installare in corso d'opera idonea strumentazione per il controllo degli spostamenti dei terreni di fondazione e del materiale costituente la colmata stessa.

Nel seguito si passa ad una breve descrizione delle suddette attività programmate, rimandando ovviamente alla relazione del progetto esecutivo delle opere, i particolari.

2. Sperimentazione di laboratorio

Per quanto attiene alla sperimentazione di laboratorio da sviluppare come preludio dell'inizio dei lavori, questa è mirata alla previsione del decorso dei processi deformativi della colmata sotto carico ed alla valutazione delle caratteristiche meccaniche del materiale in opera.

Salvo a definire il modello da attuare a tal fine col laboratorio specialistico che condurrà le prove, si prevede orientativamente di procedere al riempimento di un

contenitore cilindrico in policarbonato trasparente, del diametro approssimativo di 100 cm e dell'altezza di circa 170-200 cm, a strati orizzontali per semplice sversamento dalla sommità di idoneo materiale proveniente dal dragaggio del fondale. Per detta sperimentazione ci si avvarrà di alcuni metri cubi di materiale dragato appositamente dal fondale. Nel modello di laboratorio tra due strati successivi, dello spessore orientativo di circa 30 cm, verrà inserito un sottile foglio di materiale di contrasto.

Ultimato il riempimento del cilindro, si procederà, mediante pressa di adeguata portata, alla graduale applicazione di un carico esterno tale da simulare il peso del riempimento, sino alla quota effettiva prevista nel progetto della colmata progettata.

I cedimenti in corrispondenza dei singoli strati di materiale di contrasto verranno misurati per via diretta sulla parete del contenitore, valendosi di opportuni riscontri millimetrati. Detto contenitore sarà inoltre strumentato con estensimetri elettrici (strain-gauges), in grado di misurare le deformazioni diametrali in corrispondenza di 4 punti diametralmente opposti a 3 differenti altezze. Note dette deformazioni, si potrà risalire alle tensioni orizzontali indotte dal materiale sul contenitore e conseguentemente alla valutazione del coefficiente di spinta a riposo (K_0).

Nel corso delle operazioni di riempimento cilindrico dovrà evidentemente essere pieno di acqua ed in tutte le fasi (dal riempimento all'applicazione del carico esterno attraverso la pressa) dovranno essere garantite adeguate realistiche condizioni di drenaggio. Per quanto la condizioni di saturazione del materiale sedimentato nel modello di laboratorio sembrerebbe rendere superfluo l'accertamento delle variazioni delle pressioni interstiziali nel corso della prova, pur tuttavia il modello potrebbe essere attrezzato con 3 piezometri elettrici, immersi nel terreno a differenti profondità.

La Fig. A.1 riporta schematicamente le differenti fasi in cui si prevede vengano svolte le prove.

La sperimentazione riguarderà tre differenti tipologie di materiale, giudicate sufficientemente rappresentative della differente qualità dei materiali da impiegare per la costituzione della colmata.

I risultati della sperimentazione qui suggerita consentiranno di acquisire una serie di valori di parametri di ingresso per un modello numerico che consenta, avvalendosi dei comportamenti dei materiali rilevabili dalle numerose analisi

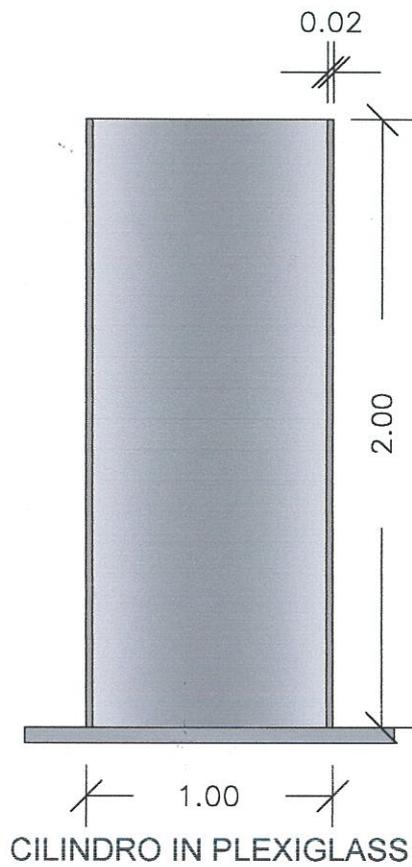
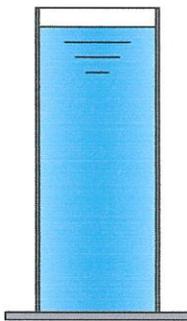


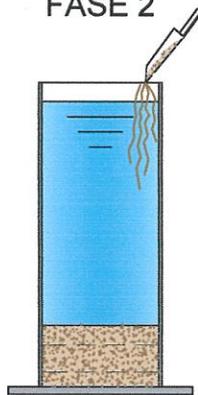
FIG. A.1
 Schema della prova sperimentale di laboratorio sui materiali dragati proposta.

FASE 1



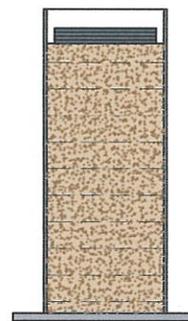
riempimento
cilindro con
acqua

FASE 2



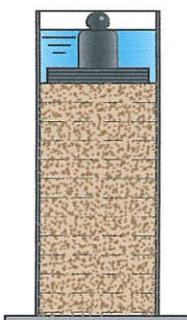
versamento
del terreno

FASE 3



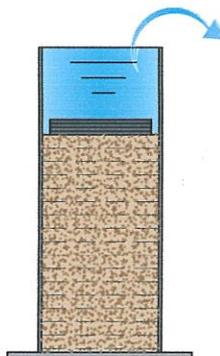
applicazione piastra

FASE 4



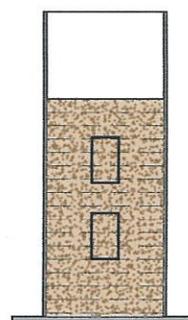
applicazione carichi
progressivamente
crescenti

FASE 5



estrazione
acqua in
eccesso

FASE 6



prelievi di campioni
per prove geotecniche
di laboratorio

geotecniche svolte sui sedimenti di partenza, di studiare la consolidazione del materiale sotto carichi progressivamente crescenti.

La materia non trova riferimenti certi nella letteratura scientifica, riguardante in particolare il comportamento delle colmate in materiali fini, onde la sperimentazione suggerita deve obiettivamente ritenersi un procedimento sperimentale di avanguardia finalizzato alla previsione di cedimenti dei materiali stessi immersi in acqua marina, elementi che non conviene sottovalutare per il miglior esito degli interventi progettati.

In calce alla presente Appendice si riporta una Stima dei costi relativi all'esecuzione di n.3 prove di laboratorio dianzi descritte.

3. Laboratorio di cantiere

Ai fini di una valutazione speditiva in corso d'opera della idoneità all'impiego del terreno dragato quale materiale di colmata, si procederà in corso d'opera al controllo granulometrico, alla determinazione dei Limiti di Atterberg e delle caratteristiche fisiche. Dette semplici prove di caratterizzazione geotecnica verranno condotte presso un laboratorio di cantiere, dotato delle necessarie attrezzature e di un tecnico allo scopo istruito.

4. Installazione in corso d'opera di idonea strumentazione per il controllo degli spostamenti del materiale costituente la colmata

Il monitoraggio in corso d'opera dei cedimenti del materiale costituente la colmata potrà attuarsi avvalendosi di assestimetri, da installare secondo quanto all'incirca illustrato nel seguito in corrispondenza di sezioni di massima altezza della colmata (cfr. Fig. A.2).

I cedimenti del corpo del rilevato saranno misurati avvalendosi di assestimetri a piastra ubicati a differenti altezze nell'ambito dello spessore della colmata. Si prevede a tal fine la costruzione di tre verticali di misura, ciascuna costituita da tre punti di controllo degli spostamenti, da collocare orientativamente alla profondità di -2 m, -5 m e -8 m dal l.m.m..

L'assestimetro a piastra è costituito da una piastra in acciaio di forma quadrata di lato 50 cm, da un'asta di misura in acciaio inox del diametro di 25 mm (in barre della lunghezza di due metri accoppiabili, da una guaina corrugata in cui scorre l'asta e da una borchia terminale di misura. Al fine di assicurare adeguate condizioni di stabilità all'intero sistema di misura, questo sarà a sua volta inserito, con l'ausilio di opportuno anelli centrotori, entro un tubo metallico di adeguato diametro (orientativamente 18-100 cm), opportunamente ancorato alla base.

Nel caso dei lavori, nonché a colmata ultimata, la misura degli spostamenti delle piastre verrà effettuata alla sommità delle aste stesse mediante livellazione topografica di precisione.

L'utilizzazione dei sistemi di misura sopra descritti consentirà di osservare il comportamento deformativo del complesso colmata-terreno di fondazione durante tutto il periodo di costruzione della colmata e dopo il termine costruzione.

Per quanto riguarda la stima dei costi relativi alla costituzione delle verticali assestimetriche descritte ed all'esecuzione dei cicli periodici di misure ipotizzati con cadenza quindicinale per l'intera durata dei lavori, si rimanda al Computo metrico estimativo ed al Quadro economico dei lavori.

**AUTORITA' PORTUALE DI BRINDISI
PORTO DI BRINDISI**

**SPERIMENTAZIONI DI LABORATORIO MIRATE ALLA VALUTAZIONE, IN CORRISPONDENZA DI TRE
DIFFERENTI TIPOLOGIE DI MATERIALE, DEL DECORSO DEI PROCESSI DEFORMATIVI DELLA COLMATA
SOTTO CARICHI PROGRESSIVAMENTE CRESCENTI E DELLE CARATTERISTICHE MECCANICHE DEI
MATERIALI IN OPERA**

art.	descrizione	u.m.	q.tà	n° di parti simili	prezzo unitario (€)	importo (€)
1	Ricerca di mercato dei materiali idonei alla costruzione del contenitore cilindrico in polycarbonato e progettazione dello stesso compresi tutti i componenti e gli accessori	a.c.	1	1	1.750,00	1.750,00
2	Realizzazione di contenitore cilindrico in polycarbonato trasparente, del diametro di circa 100 cm ed altezza di circa 170 cm, di adeguato spessore, dotato di anelli di contenimento e di fondello a tenuta, di riferimento graduato a tutta altezza fissato all'esterno del contenitore, di rubinetti di scarico nonché di piastre metalliche circolari per la ripartizione dei carichi verticali	a.c.	1	1	3.600,00	3.600,00
3	Fornitura e posa in opera sulla parete del contenitore cilindrico di estensimetri elettrici (strain gauges) per la misura delle deformazioni circonferenziali collegati mediante cavi elettrici a centralina di acquisizione dati in continuo (data logger). Verranno applicati n° 4 estensimetri diametralmente opposti in corrispondenza di tre diverse sezioni poste a differenti altezze	a.c.	1	3	950,00	2.850,00
4	Impiego di centralina di acquisizione dati (data logger) dagli estensimetri elettrici posti in opera nel contenitore cilindrico, per tutta la durata della prova stimata in giorni 30	a.c.	1	3	630,00	1.890,00
5	Fornitura e posa in opera nel contenitore cilindrico di piezometri elettrici immersi nel terreno a differenti profondità per la misura delle pressioni interstiziali, dotati di cavo elettrico di lunghezza idonea al collegamento con gli strumenti di misura. Verranno posti in opera n° 3 piezometri.	a.c.	1	1	3.150,00	3.150,00
6	Preparazione del campione di prova, comprensivo di movimentazione del materiale dragato reso in laboratorio, creazione di strati di separazione ottenuti con materiale colorato, operazioni di saturazione del materiale e di rilievo dei pesi del materiale	a.c.	1	3	2.350,00	7.050,00
7	Applicazione al campione di prova dei carichi assiali con sistema idraulico autocompensante mediante l'utilizzo di pressa idraulica da 300 tonnellate e lettura diretta dell'evoluzione dei processi di sedimentazione, in conformità a programma fornito dal Consulente, per una durata massima della prova di giorni 30	a.c.	1	3	10.600,00	31.800,00
8	Sovraprezzo all'articolo 7 per ogni giorno di proseguimento della prova oltre i 30 giorni previsti.	g	5	1	290,00	1.450,00

art.	descrizione	u.m.	q.tà	n° di parti simili	prezzo unitario (€)	importo (€)
9	Operazioni di campionamento del materiale sedimentato che dovrà essere effettuato con grande accuratezza al fine di ottenere un campione il più indisturbato possibile. Per ogni simulazione verranno prelevati n° 3 provini	a.c.	1	3	310,00	930,00
10	Esecuzione sul materiale campionato di prove geotecniche di laboratorio consistenti nella determinazione del peso specifico reale, del peso volume umido e secco, del contenuto naturale di acqua, analisi granulometrica per setacciatura e sedimentazione, limiti di Atterberg, prova di compressione triassiale CD ovvero di taglio CD, prova di compressione edometrica fino al carico di 50 Kg/cmq con il rilievo delle curve cedimento-tempo. Le prove verranno condotte su n° 3 campioni per ogni simulazione	a.c.	1	3	2.600,00	7.800,00
11	Operazioni di rimozione, al termine della prova, con mezzi manuali, sia del materiale già sottoposto a prova, sia della strumentazione di misura installata, con trasporto a rifiuto del materiale	a.c.	1	3	1.500,00	4.500,00
12	Rapporto tecnico riepilogativo delle prove, rilievi e misure effettuate, corredato di documentazione fotografica	a.c.	1	1	2.150,00	2.150,00
TOTALE						68.920,00