

# Trattamento a calce e cemento per il riciclo di sedimenti portuali

R. Proia<sup>1</sup>, E. Salvatore<sup>1</sup>, P. Croce<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Univerisità degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale

**SOMMARIO:** La nota illustra un'indagine sperimentale effettuata sui sedimenti dragati dal porto di Napoli con l'obiettivo di definire una procedura di trattamento idonea alla copertura di una vasca di colmata da adibire a terminal contenitori. Si descrivono preliminarmente le caratteristiche dei sedimenti e gli obiettivi progettuali. Si illustrano poi dettagliatamente le indagini di laboratorio effettuate per esplorare parametricamente gli effetti di due diversi possibili additivi (calce e cemento) variando le percentuali ponderali degli additivi medesimi e il fluido interstiziale (acqua dolce e acqua di mare). In una fase preliminare, sono stati monitorati i valori del pH per diverse percentuali di calce e cemento. Successivamente, i campioni sono stati preparati mediante compattamento al fine di simulare le condizioni di posa in opera. Le caratteristiche meccaniche sono state determinate mediante prove di compressione semplice.

**Keywords:** trattamento a calce, trattamento a cemento, miglioramento dei terreni, sedimenti marini.

## 1 INTRODUZIONE

La nota illustra i risultati di un'indagine sperimentale effettuata sui sedimenti dragati dal porto di Napoli con l'obiettivo di definire una procedura di trattamento idonea per realizzare lo strato di copertura di una vasca di colmata da adibire a terminal contenitori. Tale strato di copertura dovrà possedere le caratteristiche tipiche di un sottofondo stradale.

I sedimenti sono stati caratterizzati mediante prove di laboratorio sui campioni prelevati dal fondale del porto nelle aree di escavazione (Figura 1). I campioni analizzati risultano sostanzialmente omogenei dal punto di vista granulometrico (Figura 2), essendo tutti classificabili come "sabbia con limo", con percentuali di sabbia comprese tra il 57% ed il 68% e di limo tra il 28% ed il 37%; la componente argillosa è sempre inferiore al 5% mentre gli elementi ghiaiosi sono irrilevanti. Il materiale è privo di plasticità; il contenuto di sostanza organica è compreso tra 4 e 5%.

Il materiale, dragato mediante benna mordente, è stato trasportato su bettolina e sversato nella vasca. Il processo di sedimentazione e consolidazione è risultato molto rapido e ha consentito di riempire la vasca senza particolari difficoltà. Si pone ora il problema di realizzare uno strato di copertura idoneo a supportare la pavimentazione del piazzale. La soluzione ottimale, dal punto di vista ambientale, consiste nel riciclo dei sedimenti dragati, opportunamente compattati

ed eventualmente addizionati con calce e/o cemento al fine di conseguire caratteristiche meccaniche sufficienti a supportare la pavimentazione stradale ed il sovraccarico dei containers.

Per esplorare tale possibilità è stata svolta un'indagine sperimentale di laboratorio, utilizzando il campione di sedimento prelevato nel canale di accesso al porto (zona V in Figura 1) dove si prevede di dragare il materiale per il completamento dell'intervento. L'indagine è stata finalizzata a determinare gli effetti dei due diversi leganti (calce e cemento) variando le percentuali ponderali degli additivi medesimi e il fluido interstiziale (acqua dolce e acqua di mare).

In una fase preliminare, sono stati monitorati i valori del pH per diverse percentuali di calce e cemento. Successivamente, i campioni sono stati preparati mediante compattamento e le caratteristiche meccaniche sono state determinate mediante prove di compressione semplice.

Attualmente sono in corso di svolgimento ulteriori prove meccaniche, nonché indagini chimiche e microstrutturali al fine di approfondire e ampliare lo studio sperimentale. Si ritiene comunque che i dati disponibili forniscano già utili indicazioni per la soluzione di casi analoghi.

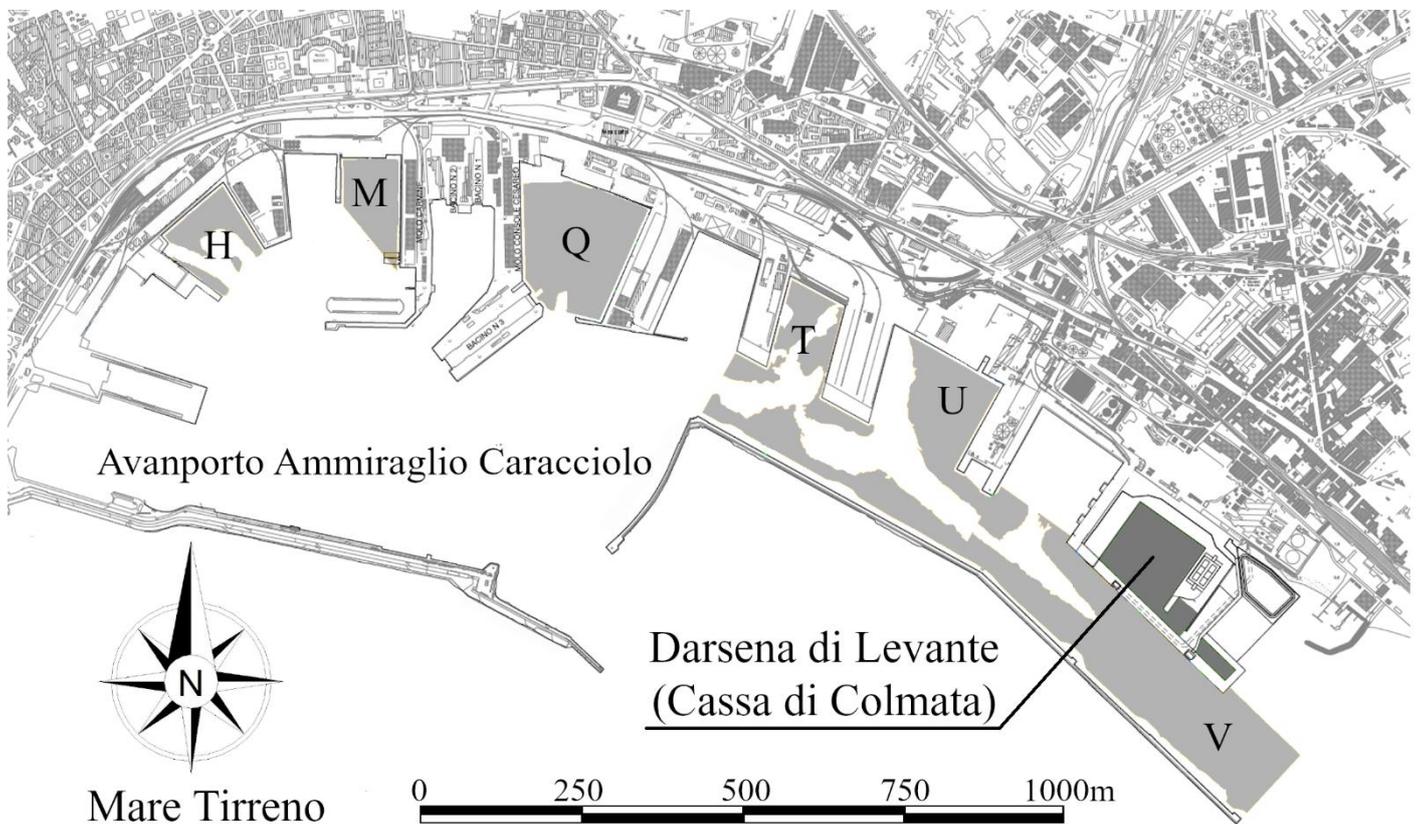


Figura 1. Planimetria del porto di Napoli con ubicazione della vasca di colmata e delle aree di dragaggio evidenziate in grigio.

## 2 MISCELAZIONE E COMPATTAMENTO DEI MATERIALI

Il materiale dragato, preventivamente essiccato in stufa alla temperatura di 40°C è stato successivamente sottoposto ad una leggera operazione di ripulitura rimuovendo i residui organici e plastici.

Le analisi fisiche eseguite sui sedimenti hanno mostrato un peso specifico del solido pari a 25.9kN/m<sup>3</sup> (UNI CEN ISO/TS 17892-3, 2005) ed un contenuto di sostanza organica pari al 3.8% (ASTM D2974-00, 2000).

Le analisi granulometriche, condotte secondo la norma ASTM D422-63 (1998) hanno evidenziato che i campioni prelevati dalle diverse zone di dragaggio possiedono una distribuzione granulometrica poco variabile, come si può osservare dalla Figura 2. In

particolare, i sedimenti dragati sono tutti classificabili come “sabbia con limo”.

Gli additivi utilizzati per la stabilizzazione sono calce e cemento. In particolare, è stata adoperata una calce viva con contenuto di ossido di calcio e magnesio superiore al 90% (classe CL90), classe di reattività R5 e classe granulometrica P2, secondo la specifica EN 459-1 (2010). Il cemento utilizzato è di tipo pozzolanico, classe IV-B con percentuale di componenti a comportamento pozzolanico minore del 55% e classe di resistenza 32.5 R secondo la specifica EN 197-1 (2011).

Le percentuali minime di additivo da adottare per il consolidamento sono state valutate, come suggerito da Jones et al. (2010), determinando il consumo iniziale di calce e cemento (C.I.C.). A tal fine è stato monitorato il pH delle miscele preparate a crescente

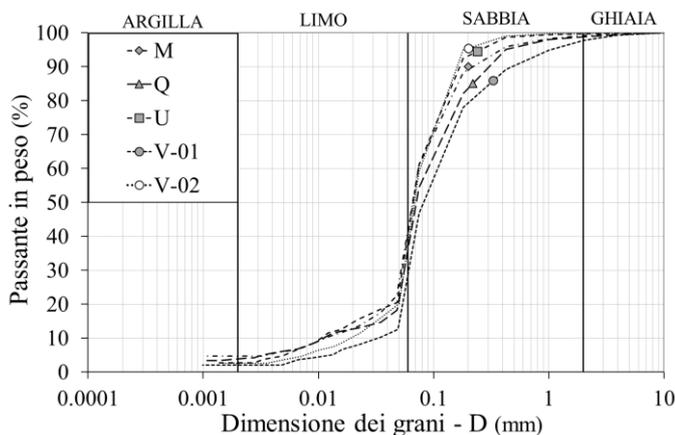


Figura 2. Distribuzione granulometrica dei campioni prelevati nelle aree di dragaggio.

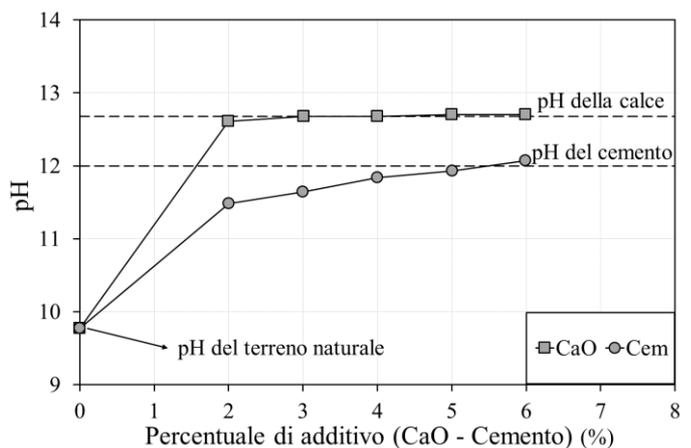


Figura 3. Curve di consumo iniziale di calce e cemento.

contenuto di additivo stabilizzante (ASTM D6276-99a, 1999). I risultati di tale analisi preliminare sono mostrati in Figura 3 per entrambi gli additivi adottati.

Coerentemente con studi pregressi (Eades and Grim, 1966), i diagrammi mostrano che il pH della miscela con calce aumenta al crescere della percentuale di additivo utilizzata sino a raggiungere un valore stabile in corrispondenza del 3% circa. La miscela condizionata a cemento mostra invece un incremento relativamente continuo del pH.

Le caratteristiche di compattamento, essenziali per pianificare e controllare la posa in opera dello strato di sottofondo, sono state determinate mediante la procedura tipo Harvard (Wilson, 1970). Le prove di compattamento sono state eseguite utilizzando sia acqua dolce (TW) che acqua di mare (SW), al fine di valutare la possibile influenza della salinità dell'acqua. Le curve di compattamento così ottenute sono riportate in Figura 4, rispettivamente per il sedimento naturale (Figura 4.a), per il sedimento trattato con il 3% di additivo (Figura 4.b) e per il sedimento trattato con il 5% di additivo (Figura 4.c).

Le caratteristiche di compattamento sono inoltre sintetizzate nella Tabella 1, dalla quale si evince che il contenuto d'acqua ottimo  $w_{opt}$  e la corrispondente densità massima  $\gamma_{d,max}$  non sono influenzati significativamente né dalla percentuale di legante né dalla salinità dell'acqua. Sulla base di queste evidenze sperimentali, le prove meccaniche illustrate nel paragrafo successivo sono state eseguite solo sui campioni preparati con acqua dolce.

### 3 RESISTENZA A COMPRESSIONE

L'influenza del tipo e del quantitativo di additivo sulla risposta meccanica del materiale trattato è stata indagata mediante prove di compressione uniassiale. A tal fine, il terreno asciutto è stato mescolato con il 3% e il 5% in peso di calce e cemento, rispettivamente. Il materiale è stato compattato mediante procedura Harvard, con un quantitativo d'acqua dolce pari all'ottimo e i campioni sono stati lasciati maturare alla temperatura di 20°C in sacchetti sigillati al fine di prevenire la riduzione di umidità. Sono stati così confezionati tre campioni per ciascuna composizione. Le prove di compressione sono state infine effettuate, dopo una stagionatura di sette giorni, procedendo con velocità di deformazione controllata pari a 10%/h.

I risultati ottenuti sono illustrati in Figura 5.a per i campioni trattati con calce ed in Figura 5.b per i campioni trattati con cemento, nel piano tensione deviatorica ( $q$ ) – deformazione assiale ( $\epsilon_a$ ). Le caratteristiche fisiche e meccaniche dei campioni testati sono riassunte in Tabella 2.

I risultati delle prove di compressione evidenziano che entrambi gli additivi inducono un significativo

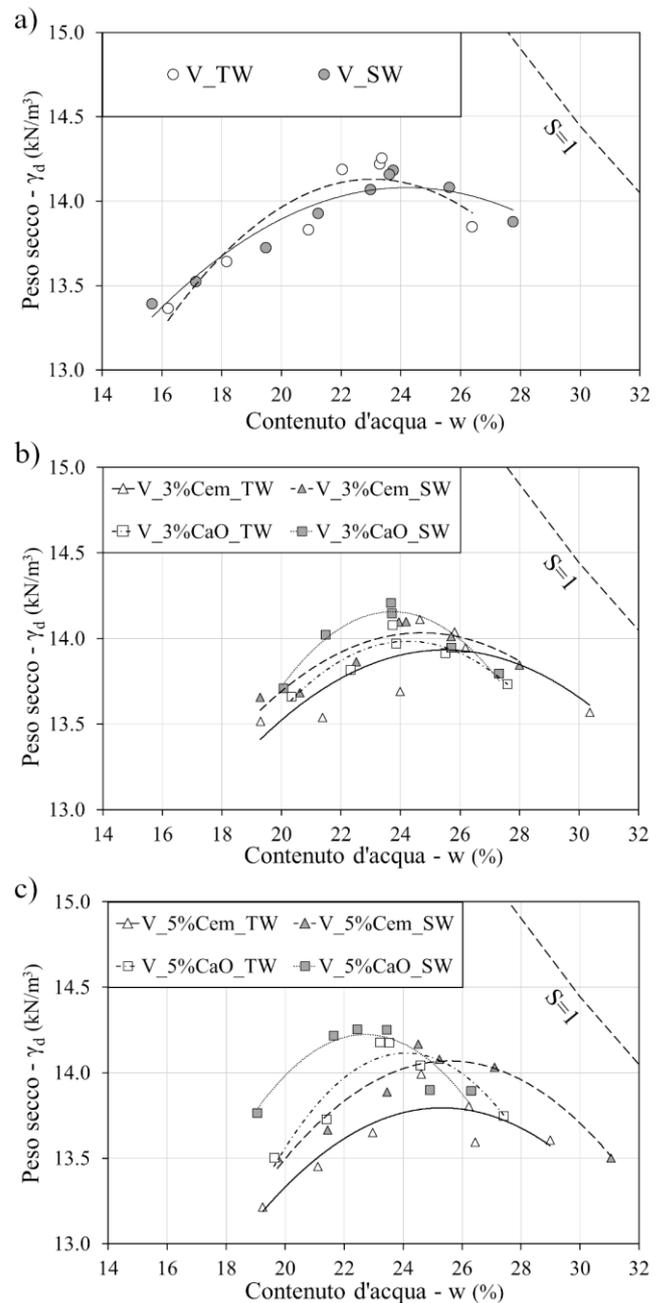


Figura 4. Curve di compattamento del materiale non trattato umidificato con acqua dolce (V\_TW) e acqua salata (V\_SW).

Tabella 1. Parametri di compattamento

Acqua	Additivo (%)	$\gamma_{d,max}$ (kN/m <sup>3</sup> )		$w_{opt}$ (%)	
		Cem	CaO	Cem	CaO
	0	14.13		23.04	
Dolce (TW)	3	13.93	13.99	25.50	24.26
	5	13.80	14.14	25.33	24.12
	0	14.11		24.30	
Salata (SW)	3	14.00	14.15	24.64	23.72
	5	14.07	14.23	25.56	22.73

miglioramento della risposta meccanica del materiale. In particolare, il trattamento a calce (Figura 5.a) conferisce al materiale un marcato incremento della resistenza a compressione, pari a oltre il 400%, per una percentuale di additivo del 3%. Si osserva tuttavia che la resistenza non si incrementa ulteriormente passando dal 3% al 5% di calce.

D'altra parte, si osserva che l'aggiunzione del 3% di cemento (Figura 5.b) produce un più contenuto aumento di resistenza, pari a circa il 100%, che risulta più esigua di quella prodotta dal trattamento a calce con la medesima percentuale. Tuttavia, diversamente a quanto osservato per la calce, si registra un notevole incremento di resistenza, fino a circa l'850%, elevando la percentuale di cemento al 5%.

Per caratterizzare la rigidità del materiale si è ritenuto opportuno determinare il modulo tangente valutato al 50% della resistenza di picco.

Tali valori del modulo sono riportati in Tabella 2 ed in Figura 6. Si osserva che il trattamento a calce produce un significativo irrigidimento passando dai circa 5MPa del terreno naturale a 30MPa del terreno trattato al 3%, ma tale valore non aumenta ulteriormente elevando il quantitativo di calce al 5%. Al contrario, l'aggiunta del 3% di cemento produce un aumento di rigidità sino a circa 7MPa e un ulteriore considerevole incremento fino a circa 87MPa elevando al 5% la percentuale di additivo.

Tabella 2. Caratteristiche fisiche e meccaniche dei campioni sottoposti a prova di compressione uniassiale.

ID	Additivo	$w_a$ (%)	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\sigma_c$ (kPa)	$E_{50}$ (Mpa)
V_TW-C1	NO	0	13.88	77	4.95
V_TW-C2	NO	0	13.84	82	4.66
V_TW-C3	NO	0	13.87	71	4.39
V_3%CaO_TW-C1	CA	3	14.01	406	37.27
V_3%CaO_TW-C2	CA	3	13.94	400	31.89
V_3%CaO_TW-C3	CA	3	13.91	410	28.72
V_5%CaO_TW-C1	CA	5	13.97	441	31.37
V_5%CaO_TW-C2	CA	5	13.87	372	24.37
V_5%CaO_TW-C3	CA	5	13.91	403	31.11
V_3%Cem_TW-C1	CE	3	13.84	159	6.23
V_3%Cem_TW-C2	CE	3	13.85	166	6.70
V_3%Cem_TW-C3	CE	3	13.82	159	7.45
V_5%Cem_TW-C1	CE	5	13.55	706	87.90
V_5%Cem_TW-C2	CE	5	13.56	729	88.82
V_5%Cem_TW-C3	CE	5	13.61	753	84.80

Additivo: CA – calce, CE – cemento;  $w_a$ : concentrazione in peso di additivo rispetto al terreno asciutto;  $\gamma_d$ : peso specifico secco;  $\sigma_c$ : resistenza a compressione uniassiale;  $E_{50}$ : modulo di rigidità secante ricavato al 50% della resistenza.

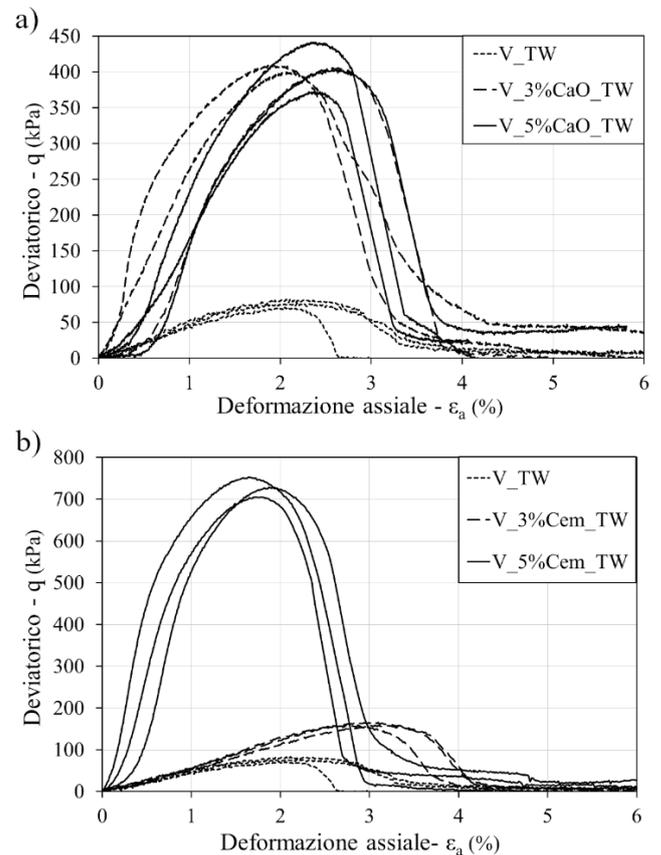


Figura 5. Risultati delle prove di compressione uniassiale eseguite sul materiale trattato con calce (a) e cemento (b).

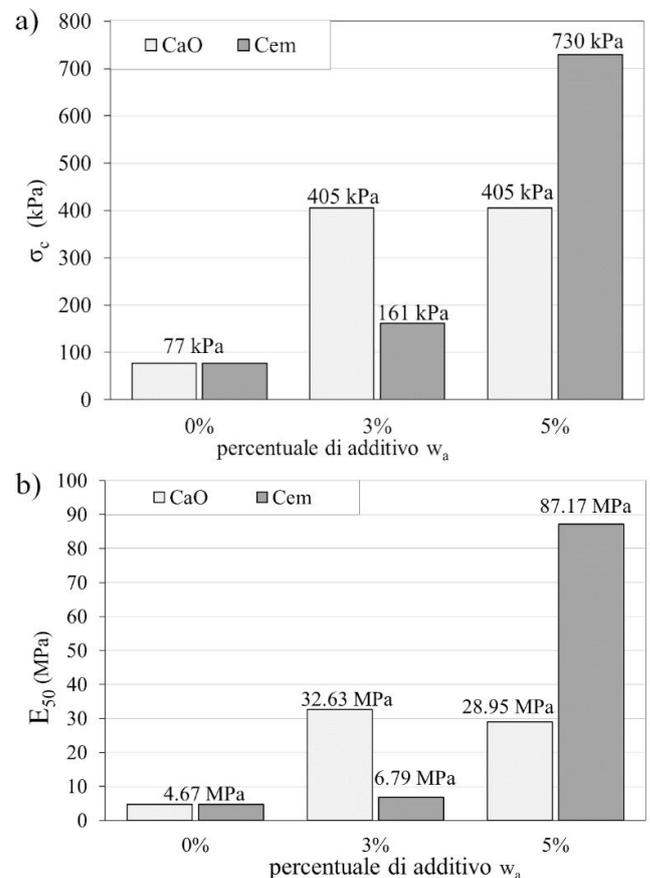


Figura 6. Grafici riepilogativi dei valori di resistenza (a) e rigidità (b) misurati con le prove di compressione uniassiale.

Il differente comportamento meccanico riscontrato per i due additivi può essere attribuito ai diversi processi fisico-chimici indotti dalla calce e dal cemento.

Studi pregressi (Vitale et al., 2016a; Vitale et al., 2016b) hanno infatti mostrato come l'aggiunzione di calce nei terreni vada ad alterare la chimica dell'acqua di porosità innalzandone il pH. Come conseguenza si produce dunque un aumento delle forze di attrazione elettrochimica tra le particelle della componente più fina che si traduce alla scala dell'elemento di volume in un incremento di rigidità e resistenza al taglio. Poiché la variazione di pH indotta dal trattamento rimane pressoché costante per concentrazioni di calce superiori al 3% è logico attendersi che quantitativi maggiori non producano ulteriori miglioramenti della risposta meccanica.

Con l'aggiunta di cemento invece, il pH incrementa progressivamente con il crescere della percentuale di additivo. Si osserva inoltre che il miglioramento meccanico indotto dall'aggiunta di cemento è da imputarsi principalmente alla formazione di cristalli di portlandite come prodotto delle reazioni di idratazione del cemento (Portland Cement Association, 1992). Tali cristalli, in quantità proporzionale a quella dell'additivo miscelato formano connessioni rigide tra i grani del terreno che vanno ad occludere i pori dello scheletro solido conferendogli maggiore resistenza e rigidità.

#### 4 CONCLUSIONI

Sono stati illustrati i primi risultati di un'indagine sperimentale finalizzata al riuso dei sedimenti dragati dal Porto di Napoli, mediante trattamento a calce o cemento, per la realizzazione di un terminal container.

In una fase preliminare, sono stati monitorati i valori del pH per diverse percentuali di calce e cemento. Si è così riscontrato che il pH della miscela con calce aumenta al crescere della percentuale di additivo utilizzata, sino a raggiungere un valore stabile in corrispondenza del 3% circa. La miscela condizionata a cemento mostra invece un incremento relativamente continuo del pH.

Le caratteristiche di compattamento sono state determinate mediante la procedura tipo Harvard. Le prove di compattamento sono state eseguite utilizzando sia acqua dolce che acqua di mare, al fine di valutare la possibile influenza della salinità dell'acqua. Si è così riscontrato che il contenuto d'acqua ottimo  $w_{opt}$  e la corrispondente densità massima  $\gamma_{d,max}$  non sono influenzati significativamente né dalla percentuale di legante né dalla salinità dell'acqua.

Le caratteristiche meccaniche sono state determinate mediante prove di compressione semplice, condotte sui campioni additivati e compattati all'ottimo di Proctor con acqua dolce, dopo 7 giorni di maturazione. In sintesi, le prove di compressione hanno

mostrato che il 3% di calce è sufficiente per produrre un significativo miglioramento meccanico del sedimento, ma ulteriori aggiunte di calce non determinano effetti apprezzabili né sulla resistenza né sulla rigidità. Al contrario, il 3% di cemento determina un miglioramento contenuto delle caratteristiche meccaniche, ma un'ulteriore aggiunta di cemento fino al 5% conferisce alla miscela compattata una notevole resistenza e rigidità.

Attualmente sono in corso di svolgimento ulteriori prove di compressione uniassiale, su campioni stagionati a diversi tempi di maturazione. Sono state inoltre intraprese indagini chimiche e microstrutturali (scansioni al microscopio elettronico e diffrattometria ai raggi x) per indagare i processi chimico-fisici responsabili dei comportamenti meccanici osservati. Si ritiene comunque che i dati disponibili forniscano già utili indicazioni per la soluzione di casi analoghi.

Si evidenzia infine che il contenuto di sostanza organica non irrilevante (4÷5%) dei sedimenti non sembra avere effetti significativi sul comportamento meccanico del materiale.

#### BIBLIOGRAFIA

- ASTM D2435-96 (1996). Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading.
- ASTM D422-63 (1998). Standard test method for particle-size analysis of soils.
- ASTM 2974-00 (2000). Standard test methods for moisture, ash, and organic matter of peat and other organic soils.
- ASTM D4318-00 (2000). Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils.
- C.N.R. 1978. Determinazione della massa volumica reale dei granuli di un aggregato. *Bollettino Ufficiale (Norme Tecniche)*, Anno XII, Pt IV.
- Eades, J.L., Grim, R.E. 1996. A quick test to determine lime requirements for lime stabilisation. *Highway Research Board Record*, 139, pp. 61-72
- EN, B. (2011). 197-1: 2011. *Cement, Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements*. London, England: British Standard Institution (BSI).
- Jones, D., Rahim, A., Saadeh, S. & Harvey, J.T. 2010. *Guidelines for the stabilization subgrade soils in California*. University of California Pavement Research Center.
- Portland Cement Association 1992. *Soil-Cement Laboratory Handbook*. Portland Cement Association, Illinois, USA.
- Wilson, S. 1970. Suggested Method of Test for Moisture-Density Relations of Soils Using Harvard Compaction Apparatus. in *Special Procedures for Testing Soil and Rock for Engineering Purposes: Fifth Edition*. 101-103. <https://doi.org/10.1520/STP38484S>
- UNI CEN ISO/TS 17892-3 (2005). Indagini e prove geotecniche - Prove di laboratorio sui terreni - Parte 3: Determinazione della massa volumica dei granuli solidi - Metodo del picnometro.
- UNI, E. 459-1:(2010). Calci da costruzione - Parte 1: Definizioni, specifiche e criteri di conformità.
- Vitale, E., Russo, G., & Deneele, D. 2016a. Multi-scale analysis on the effects of lime treatment on a kaolinite soil. In *Proceedings of the 1st IMEKO TC-4 International Workshop on Metrology for Geotechnics, Benevento, Italy* (pp. 17-18).

Vitale, E., Cecconi, M., Croce, P., Deneele, D., Pane, V., Russo, G., & Vecchietti, A. 2016b. Influence of pore water chemistry on hydraulic conductivity of kaolinite suspensions. *Procedia Engineering*, 158, 81-86.

## RINGRAZIAMENTI

Le indagini sperimentali illustrate nell'articolo sono state effettuate nell'ambito di una convezione di ricerca stipulata tra l'Università di Cassino e del Lazio Meridionale e la NEA – Napoli Escavi Ambientali S.c.a.r.l. Gli Autori ringraziano l'Ing. Carlo Alberto Marconi per il prezioso contributo allo svolgimento della ricerca.

L'ossido di calcio adoperato nelle prove è stato gentilmente fornito dalla Unicalce S.p.A.

## ABSTRACT

### PORT SEDIMENTS RECYCLING BY LIME AND CEMENT TREATMENT

Keywords: lime stabilization, cement stabilization, ground improvement, marine sediments.

The paper reports the preliminary results of an experimental study on lime and cement treatment of the sediments dredged from the Port of Naples. The investigation is aimed at the reuse of the sediments for the construction of a terminal for containers. The pH values were monitored for various percentages of lime and cement. It was thus found that the pH of the mixture with lime increases as the percentage of additive increases, until it reaches a stable value at about 3%.

The cement-conditioned mixture, on the other hand, shows a relatively continuous pH increase. The compaction characteristics were determined by the Harvard type procedure. The tests were performed using both fresh and sea water, in order to evaluate the possible influence of water salinity. It was thus found that the optimum water content  $w_{opt}$  and the corresponding maximum dry density  $\gamma_{dmax}$  are not significantly affected neither by the percentage of binder nor by the salinity of the water. The mechanical characteristics were investigated by means of uniaxial compression tests performed on Proctor-compacted samples, using fresh water, after 7 days of curing. Such tests have shown that sediments treatment by 3% of lime produces a significant mechanical improvement of the material, but further additions of lime do not determine appreciable effects on either strength or stiffness. On the contrary, treatment by 3% of cement induces a rather limited improvement of the mechanical characteristics, but a further addition of cement up to 5% provides the compacted mixture with remarkable stiffness and strength. Further uniaxial compression tests are currently underway on samples cured at different time intervals. Chemical and microstructural investigations have also been undertaken in order to investigate the chemical-physical processes responsible for the observed mechanical behaviour. It is believed, however, that the data published in this paper already provide useful indications for the technical solution of similar cases. It is finally noted that the non-irrelevant percentage of organic matter (4÷5%) in the sediments shows no significant effects on the mechanical behaviour of the material.