

AUTORITÀ PORTUALE DI CAGLIARI

Provincia di Cagliari

REALIZZAZIONE DEL DISTRETTO DELLA CANTIERISTICA
PRESSO L'AREA DEL PORTO CANALE DI CAGLIARI
OPERE DI URBANIZZAZIONE DELL'AVAMPORTO EST
ATTUAZIONE DEL PIANO DI MONITORAGGIO

FASE I-B

REPORT FINALE

DATA: aprile 2013

REDATTO DA: Mauro Pompei
Paolo Putzulu



GEOTECHNA

Via Lorenzo il Magnifico n. 7
09134 Cagliari (Italy)
Tel./Fax +39 070 551417
e-mail: geotechna@fiscali.it
geotechna.cagliari@pec.it

IL DIRETTORE TECNICO
DELLA GEOTECHNA S.R.L.:

Dott. Geol. Mauro Pompei

RILIEVO ED ELABORAZIONE DATI:

Ing. Paolo Putzulu

	DATA	DESCRIZIONE
REVISIONI	00	30.04.2013 Prima emissione
	01	
	02	
	03	
	04	

IL COMMITTENTE:

Impresa di Costruzioni Pellegrini S.r.l.
Via Nazario Sauro n. 9
09123 Cagliari

FASE I-B

REPORT FINALE

SOMMARIO

1. INTRODUZIONE	1
2. ANALISI CONCLUSIVA.....	2

1. INTRODUZIONE

Richiamando per la trattazione teorica al Piano di Monitoraggio ed al Report Finale di cui alla Fase I-A, si riportano di seguito i risultati ed i commenti relativi all'esito del monitoraggio degli assestimetri effettuato per la Fase I-B.

Si tiene a precisare che per una valida interpretazione dei risultati del monitoraggio, è stato necessario un corretto approccio nella stima delle misure e nei riguardi delle relative intrinseche incertezze. Ciò in quanto nella misura di una qualsivoglia grandezza fisica si commettono inevitabilmente errori e quindi il valore ottenuto non è mai esattamente uguale a quello "reale" che non potrà mai essere noto con precisione arbitrariamente grande. Nel ripetere la misura della stessa grandezza col medesimo strumento, nelle medesime condizioni e seguendo la medesima procedura, la presenza delle varie cause di errore produce delle differenze casuali tra il valore misurato ed il valore vero, differenze variabili da una misura all'altra, ed in modo imprevedibile singolarmente. Pertanto i risultati di queste misure che verranno ripetute più volte in fase di rilievo fluttueranno apprezzabilmente in maniera casuale in un certo intervallo: l'ampiezza di queste variazioni definirà la precisione delle misure stesse.

Tuttavia, certe cause di errore possono dar luogo a una discrepanza tra valore misurato e valore vero che si riproduce in maniera inalterata e la cui inosservabilità delle fluttuazioni non garantisce che sia inferiore all'incertezza di lettura dello strumento. Gli errori di questo tipo (*"errori sistematici"*) non risultano immediatamente identificabili e le loro cause sono tra le più svariate: queste non verranno eliminate ma al più ridotte al minimo mediante applicazione di metodologie numeriche di controllo statistico e di analisi dei dati in fase di acquisizione delle variabili ed elaborazione dei risultati.

In questa sede, la valutazione degli errori è stata possibile grazie al significativo numero di misurazioni effettuate che si è cercato di effettuare a parità di condizioni. Ciò nonostante, nell'analisi del comportamento deformativo del substrato si è dovuto necessariamente tener conto di quelle fonti di incertezza che intervengono necessariamente nella fase di rilievo trigonometrico, rappresentate dalle *"condizioni operative ambientali"* governate da un'estrema variabilità di parametri specifici e caratterizzanti il sito in oggetto.

2. ANALISI CONCLUSIVA

Dal progetto geotecnico di cui alla fase esecutiva, i cedimenti attesi nell'area in cui è stato realizzato il rilevato della **Fase I-B** erano dell'ordine dei 6,5 cm compresi gli elastici immediati e quelli secondari a medio termine. Durante la fase di posa in opera del precarico con materiali scelti e del susseguente stazionamento nell'area in oggetto, si sono effettuate n. 7 campagne di rilievo⁽¹⁾ altimetrico al fine di verificare in maniera più accurata il comportamento deformativo del substrato. Mediante le letture è stato possibile ricavare il cedimento avvenuto degli assestimetri, opportunamente disposti nell'area secondo le indicazioni contenute nel Piano di Monitoraggio. Il risultato ottenuto è stato che allo stato attuale gli assestimetri hanno presentato cedimenti inferiori a quelli stimati (**TABELLA 1**) come previsto e giustificato dalle considerazioni sopra esposte nei reports precedenti.

C'è inoltre da considerare che il cedimento atteso è dell'ordine del 90% rispetto a quello teorico calcolato, come di consueto si è soliti considerare nella pratica geotecnica. Pertanto il cedimento verificatosi può essere considerato previsto entro sufficienti margini di sicurezza (**TABELLA 2**).

ASSESTIMETRO	CEDIMENTO RILEVATO (cm)	CEDIMENTO TEORICO CALCOLATO (cm)
64	5,6	6,5
65	5,1	6,5
74	2,3	6,5
75	4,3	6,5
77	4,9	6,5
78	4,3	6,5
82	5,3	6,5
95	3,9	6,5

TABELLA 1 – Riepilogo dei cedimenti totali rilevati nella **Fase I-B**.

⁽¹⁾ Date del rilievo: previsti il 13 Marzo, 2, 8, 15, 23, 29 Aprile + integrativo il 26 Aprile.

ASSESTIMETRO	CEDIMENTO ATTESO	COEFFICIENTE DI SICUREZZA
64	95%	1,1
65	87%	1,1
74	39%	2,5
75	73%	1,4
77	84%	1,2
78	73%	1,4
82	90%	1,1
95	66%	1,5
VALORE MEDIO	75%	1,4

TABELLA 2 – Riepilogo dei risultati ottenuti nella Fase I-B.

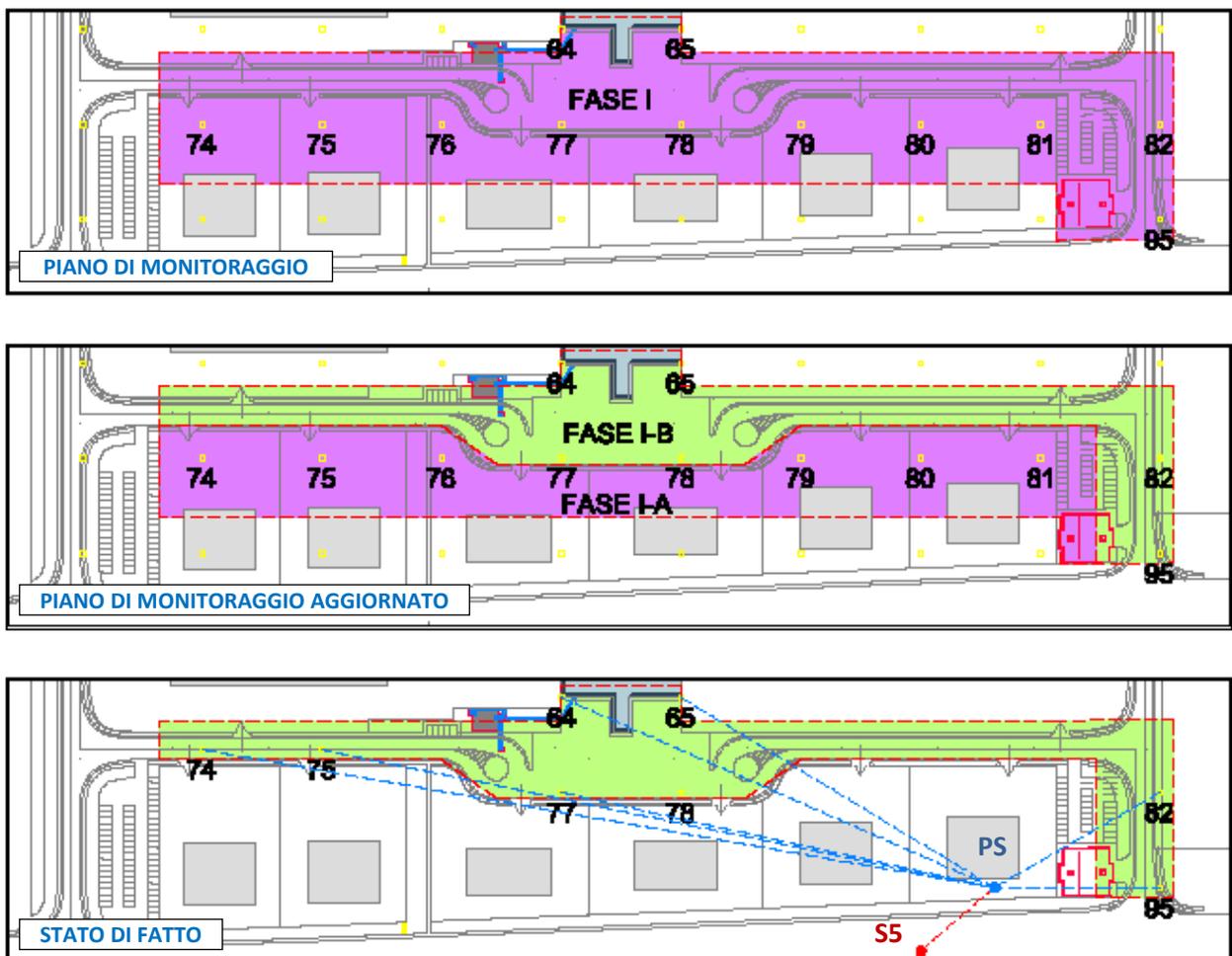


FIGURA 1 – Planimetria del Piano di Monitoraggio di progetto e quello operativo di I FASE.

Il trend evolutivo dei cedimenti dopo le prime due settimane ha mostrato un inaspettato innalzamento delle quote degli assestimetri che si è protratto per le successive due settimane per poi riassetarsi, nelle ultime due letture, al trend deformativo tipico di tali litotipi di natura limo-argillosa, caratterizzato da abbassamenti più o meno accentuati del rilevato in oggetto e conseguentemente degli assestimetri ivi presenti.

Tale comportamento deformativo può presumibilmente essere giustificato mediante un'attenta analisi dell'influenza di alcuni fattori che avendo differente origine, hanno concorso in maniera distinta e variabile alla realizzazione di tali particolarità nel percorso di assestamento.

Da un attento studio del problema si evince che le cause possono essere prodotte da:

- a) disturbo dello stato tensionale del substrato, provocato dalle lavorazioni adiacenti il rilevato in oggetto;
- b) Incertezza nelle misurazioni di campo, in funzione delle "condizioni operative ambientali".

Il disturbo tensionale del substrato in oggetto rappresenta probabilmente il fattore che maggiormente ha influito sul transitorio innalzamento del rilevato e dei relativi assestimetri installati. La variazione del cronoprogramma deciso dalla Direzione del Cantiere per motivi organizzativi, ha generato una situazione tale per cui contemporaneamente alla presenza del rilevato di **FASE I-B** nell'area di cantiere sono presenti, nelle immediate vicinanze, il rilevato di **FASE III-A** e quello di **FASE III-B**. Il progetto geotecnico non prevedeva la presenza di più rilevati che in particolare fossero realizzati nelle immediate vicinanze degli stessi, pertanto non erano stati presi in considerazione eventuali effetti dovuti alle interferenze sullo stato tensionale dell'opera.

La variazione del quadro tensionale può generare un fenomeno geotecnico definito come "dilatanza" per il quale viene vinta la resistenza al taglio del terreno che si mobilita nel corso di movimenti relativi tra le particelle e dal loro grado di mutuo incastro. Da una prova triassiale in laboratorio infatti si ottiene:

$$\frac{q}{p} = M - \frac{\partial \epsilon_v}{\partial \epsilon_s}$$

dove:

- q** = tensione deviatorica
- p** = tensione media
- M** = coefficiente di attrito critico
- ϵ_v = deformazione volumetrica
- ϵ_s = deformazione distorsionale

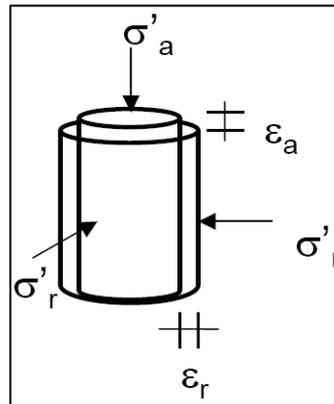


FIGURA 2
Stato tensionale triassiale.

In un mezzo particellare costituito da elementi di uguale natura e diametro, la disposizione geometrica degli elementi che corrisponde al massimo indice dei vuoti è quella in cui i relativi centri sono i nodi di un reticolo cubico (minimo stato di addensamento, $\epsilon_{MAX} \cong 0,91$). La disposizione che corrisponde al minimo indice dei vuoti è quella in cui i centri sono i nodi di un reticolo tetraedrico (massimo stato di addensamento, $\epsilon_{MAX} \cong 0,35$).

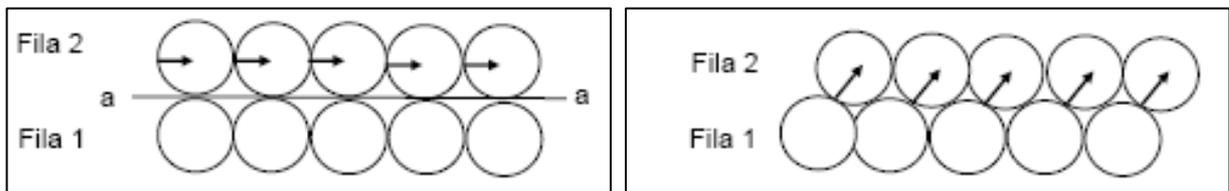


FIGURA 3A/3B – Stato di minimo e massimo addensamento per un mezzo particellare ideale.

All'aumentare della pressione deviatorica, in uno stato di compressione generata dal carico del rilevato (**FIGURA 3B**) come è ad oggi lo stato dell'arte, si realizza uno spostamento dei grani su un piano di scorrimento inclinato del moto incipiente. Iniziato il movimento, il piano di scorrimento riduce la propria inclinazione, i grani tenderanno a muoversi verso l'alto, ovvero il vettore spostamento avrà una componente verticale ascendente, e si determinerà un aumento di volume (*deformazione di espansione o dilatanza*).

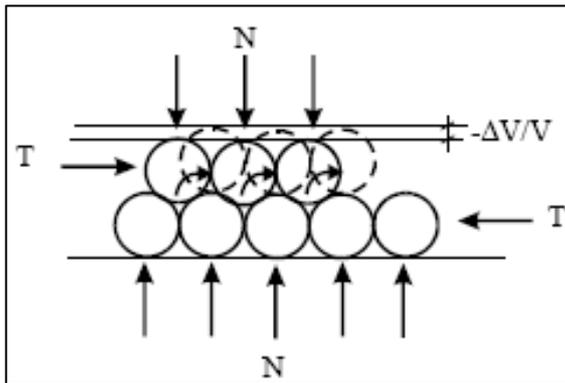


FIGURA 4
Aumento di volume in un mezzo ideale particellare

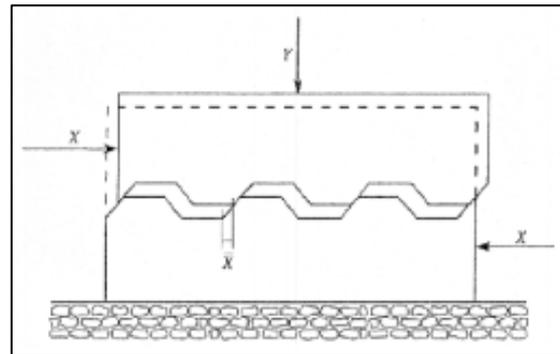
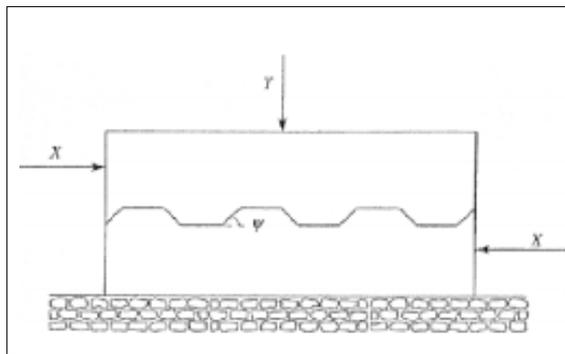


FIGURA 5A/5B – Innalzamento del rilevato per effetto dell'incremento della pressione di confinamento.

In definitiva per effetto della presenza dei rilevati adiacenti e in minima parte anche del transito nelle zone limitrofe di mezzi pesanti impegnati nella realizzazione dei manufatti in progetto (vasca industriale potabile di accumulo), si può provocare una compressione del substrato nelle aree adiacenti il rilevato di **FASE I-B** con conseguente incremento della pressione di confinamento della porzione di suolo di competenza che si trova in fase di consolidazione. Tale incremento genera una redistribuzione dei grani e delle tensioni litostatiche indotte con conseguente aumento di volume e lieve innalzamento della quota della porzione di rilevato (**FIGURA 5A/5B**).

Una ulteriore causa di variazione della pressione di consolidazione può essere data dalla velocità di realizzazione del rilevato. In funzione di essa infatti si possono creare fenomeni di dilatanza dovuti al fatto che il rilevato è posato per "aree", e la consequenzialità non celere della posa può far insorgere redistribuzioni differenziali delle tensioni indotte.

Nell'interpretazione del comportamento rilevato del substrato, è necessario inoltre considerare in minima parte l'incertezza nelle misurazioni di campo derivante dalle "condizioni operative ambientali" di cui si è già parlato in precedenza. Le condizioni operative (ambientali) influenzano le misure generando errori di tipo stocastico dovuti a:

- A. variazioni di temperatura;
- B. condizioni meteo (pressione atmosferica, umidità, pioggia, etc.);
- C. invecchiamento dei materiali;
- D. modifica delle condizioni al contorno (livelli idrici, lavorazioni in corso, etc.);
- E. condizioni ambientali;
- F. durata monitoraggio (giorni, mesi, anni);
- G. messe a terra.

Alla luce delle problematiche precedentemente esposte, si può affermare con sufficiente grado di sicurezza che le lievi anomalie presentate dal comportamento deformativo del substrato possano essere addebitabili a fattori di "disturbo" tensionale esterno con conseguente comparsa di fenomeni di alterazione volumetrica di natura meccanica che hanno interessato la porzione di suolo in oggetto. È da tenere in conto inoltre che l'incertezza intrinseca nella precisione del sistema di misurazione, in piccola parte, possa aver contribuito ad accentuare la discrepanza dal comportamento deformativo atteso. Si può facilmente constatare che il cedimento totale, prossimo a quello massimo teorico previsto, dopo 15 giorni successivi alla fase di carico ha presentato un diffuso incremento negativo (innalzamento della quota degli assestimetri) dovuto presumibilmente alle anomalie suesposte a cui ha fatto seguito un trend dapprima marcatamente decrescente per poi stabilizzarsi su un andamento di tipo asintotico.

Poiché il calcolo geotecnico, come già in precedenza accennato, si fonda su un approccio prescrittivo fortemente cautelativo, si considera il cedimento massimo teorico come un limite superiore difficilmente superabile se non in casi estremamente difficili e critici. Pertanto si pone l'attenzione sul raggiungimento attuale nel rilevato in oggetto, dopo circa 30 giorni di precarico, mediamente del 75% del cedimento teorico atteso ai 30 giorni e un coefficiente di sicurezza di 1,4.

Se si ragiona in termini di comportamento teorico di consolidazione, si può individuare un andamento tipico dell'assestamento per terreni coesivi caratterizzato da un primo tratto della curva di tipo parabolico (2° grado) per poi assestarsi, in corrispondenza dell'esaurimento della deformazione secondaria, su un comportamento lineare costante asintotico (FIGURA 6).

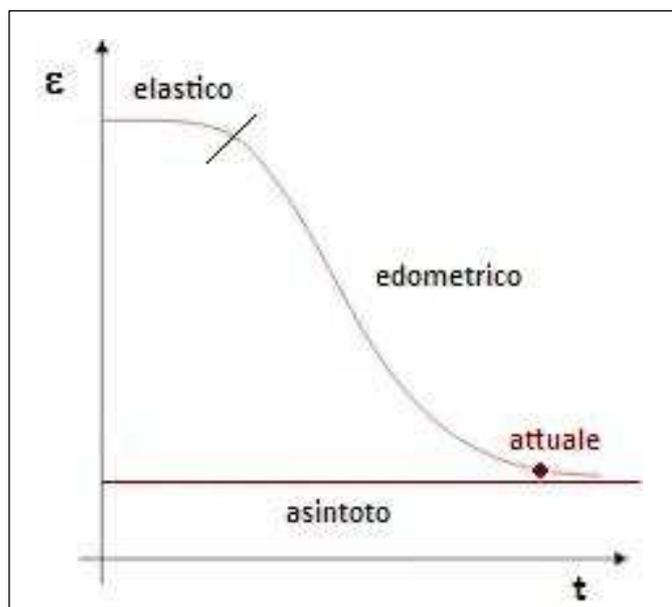


FIGURA 6 - Modello di comportamento edometrico.

Il comportamento deformativo rilevato presenta dei coefficienti di sicurezza che sono in linea con le approssimazioni applicate nel calcolo geotecnico.

In FIGURA 6 si è rappresentata graficamente la probabile situazione attuale della condizione deformativa del substrato; come ricavato dai rilievi altimetrici effettuati i cedimenti dopo un iniziale andamento marcatamente decrescente, si ridurranno nel tempo sino ad annullarsi con tendenza asintotica.

Nelle attività di monitoraggio si farà riferimento a condizioni di cui, in linea di massima, sarà possibile osservare ma non prevedere o modificare il comportamento, mentre nella previsione (progetto geotecnico) è sufficiente portare in conto solo le azioni e le condizioni al contorno che realmente potranno interessare l'opera in condizioni di SLE e di SLU. Con ciò si vuole rimarcare che il comportamento tensionale e deformativo ipotizzato è funzione di una previsione che sovrastima la situazione reale di progetto; pertanto in fase operativa presumibilmente graveranno sul rilevato sollecitazioni inferiori a quelle ipotizzate in fase di studio previsionale con conseguente decremento delle tensioni indotte nel substrato ormai stabilizzato dalle maggiori tensioni di precarico.

Alla luce di dette constatazioni e considerato che il trend del cedimento, dopo circa 30 giorni di precarico, è circa “mediamente” il 75% di quello atteso (con un coefficiente di sicurezza pari a 1,4), si ritiene fattibile – subordinatamente alle decisioni della D.L. – la possibilità di rimuovere il “precarico”.

IL DIRETTORE TECNICO DELLA
GEOTECHNA S.R.L.:

Dott. Geol. Mauro Pompei



RILIEVO ED ELABORAZIONE DATI:

Dott. Ing. Paolo Putzulu

