

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-A

REPORT FINALE

DATA: marzo 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	26.03.2013 <i>Prima emissione</i>
	01	
	02	
	03	
	04	

IL COMMITTENTE:

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

FASE I^A

REPORT FINALE

SOMMARIO

1. RICHIAMI DI PROGETTAZIONE GEOTECNICA.....	1
1.1. Introduzione	1
1.2. Normativa	2
2. PRINCIPI DI CALCOLO DEI CEDIMENTI	3
2.1. Teoria del cedimento globale.....	3
2.2. Meccanica del continuo.....	4
2.3. Calcolo dei cedimenti	5
2.4. Analisi della curva di consolidazione sperimentale.....	5
3. ANALISI CONCLUSIVA.....	7

1. RICHIAMI DI PROGETTAZIONE GEOTECNICA

1.1. INTRODUZIONE

La progettazione delle opere in genere viene dapprima effettuata mediante modellizzazione delle caratteristiche fondamentali della progettazione geotecnica, con particolare riferimento alla formulazione della struttura geotecnica del sottosuolo. La scelta del modello, è generalmente affetta da varie incertezze ed influenza in modo determinante le analisi ed il loro risultato. La descrizione realistica del comportamento meccanico del terreno può essere effettuata impiegando relazioni semplici su modelli di calcolo però piuttosto complessi.

La progettazione geotecnica (studia il comportamento del terreno e, quindi, si occupa del progetto delle opere di terra, delle opere che interagiscono con il terreno e degli interventi sul terreno) si effettua prevedendo gli effetti delle azioni e degli interventi sul sottosuolo; è necessario, pertanto, svolgere preliminarmente delle indagini per identificare i terreni che costituiscono il substrato. Tuttavia, le informazioni che si ottengono non permettono mai di riconoscere completamente la natura e le caratteristiche dei terreni, in quanto le indagini possiedono sempre una valenza puntuale che può essere estesa all'intera area mediante complesse metodologie di interpolazione analitica e mediante approcci interpretativi fondati sull'esperienza in materia, allo scopo di formulare un modello geotecnico realistico del sottosuolo. Il tipo e l'estensione delle indagini in sito ed in laboratorio sono strettamente dipendenti dalle caratteristiche del progetto e la caratterizzazione meccanica viene effettuata dopo aver scelto un modello di comportamento del terreno in dipendenza dei problemi da analizzare e delle tecniche di analisi.

Si deve infatti tenere conto che le condizioni di resistenza a taglio del substrato dipendono dalla precedente storia degli sforzi efficaci e, più precisamente, oltre che dallo stato di sforzo esistente, anche dalla precedente storia e dal grado di anisotropia degli sforzi. In generale, pertanto, anche in un terreno omogeneo la resistenza è localmente variabile. Il terreno ha inoltre un comportamento fortemente non lineare e può subire deformazioni plastiche anche a bassi livelli di sforzo. Il comportamento reale del terreno è descrivibile con modelli di calcolo elastoplastici, valutando con attenzione i parametri da adottare in relazione ai livelli di sforzo e di deformazione prevedibili.

Tutto ciò porta a constatare che c'è da tenere in considerazione che i modelli utilizzati e i vari parametri utilizzati ai fini del calcolo sono affetti da una certa indeterminatezza, che concorrono alla definizione della più realistica interpretazione del comportamento geotecnico del substrato. Nel rispetto delle NTC, i coefficienti di sicurezza prescritti sono molto prudenziali per tenere in conto delle varie incertezze; essi generano pertanto dei risultati cautelativi che non devono essere superati se non in situazioni estremamente critiche.

1.2. NORMATIVA

Il rispetto delle indicazioni prescritte dalla Norme Tecniche vigenti (D.M. 14.01.2008 – Testo Unico) non garantisce l'ottimizzazione del progetto; accade infatti, pur rispettando le Norme, di applicare delle approssimazioni progettuali, con l'unico scopo di favorire la sicurezza, che possono sottovalutare l'efficienza, la stabilità o il comportamento deformativo dell'opera.

Nella nuova Normativa (D.M. 2008) la verifica alle condizioni di collasso, diviene verifica nei confronti degli stati limiti ultimi (SLU). La principale novità, in accordo con le indicazioni prescritte negli EuroCodici, consiste nell'introduzione dei coefficienti parziali per i parametri del terreno e per le azioni. Correttamente i coefficienti parziali tengono conto delle differenti incertezze degli elementi che compongono la verifica. Sono previste due verifiche, nelle quali non si tiene conto delle azioni variabili favorevoli: nella prima (A1+M1) si incrementano le azioni e nella seconda (A2+M2) si riducono i parametri di resistenza del terreno incrementando soltanto, in misura ridotta, le azioni variabili sfavorevoli. La capacità di risolvere i problemi di geotecnica si ottiene dalla comprensione della reale complessità dei fenomeni coinvolti, che se errata porta a valutazioni sensibilmente lontane dalla realtà con conseguenze imprevedibili. A questo scopo è possibile usare modelli costitutivi complessi, non come strumenti di previsione, ma per comprendere e interpretare il comportamento meccanico del terreno. Isolati in questo modo i fattori che influenzano prevalentemente la risposta del sistema geotecnico, si userà il modello più semplice possibile contenente questi fattori. I risultati ottenuti saranno esaminati tenendo conto delle incertezze nella definizione del modello e nella stima dei parametri. Per verificare le ipotesi si impiegherà un programma di controlli durante le differenti fasi dei lavori di costruzione.

2. PRINCIPI DI CALCOLO DEI CEDIMENTI

2.1. TEORIA DEL CEDIMENTO GLOBALE

Si ammette generalmente che il cedimento causato dal peso di una struttura si divida in tre parti:

- a) cedimento dovuto alla deformazione del terreno senza cambiamento del suo contenuto d'acqua o cedimento immediato o di contatto;
- b) cedimento dovuto a riduzione del volume di terreno causato dalla dissipazione della pressione dei pori o cedimento per consolidamento;
- c) cedimento dovuto a fenomeni viscosi.

Mentre il primo avviene generalmente durante l'esecuzione dei lavori e può considerarsi ultimato poco tempo dopo il completamento della costruzione, il secondo, che assume fondamentale importanza nei terreni argillosi, è molto lento nel tempo e può durare anni se non decenni dopo il completamento della costruzione.

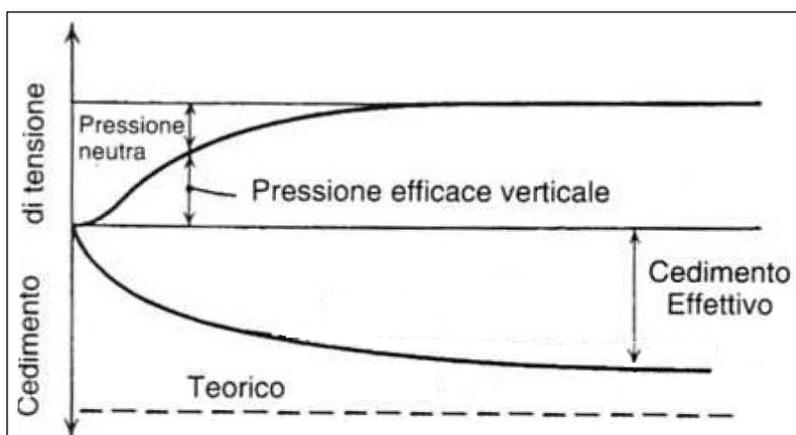


FIGURA 1
 Comportamento standardizzato del cedimento effettivo e teorico.

Per la previsione teorica del cedimento si utilizzano pertanto:

- **TEORIA DELL'ELASTICITÀ:** usata per i cedimenti immediati (la deformazione avviene senza cambiamento di volume);
- **TEORIA DELLA CONSOLIDAZIONE PRIMARIA MONODIMENSIONALE:** con cui si può impostare il calcolo teorico del cedimento dovuto alla variazione della pressione interstiziale ed alla rottura granulare;

- **TEORIA DELLA VISCOSITÀ:** valida nel caso di terreni che manifestano deformazioni di tipo viscoso (terreni molto organici).

Il cedimento globale risulta quindi generalmente costituito dai contributi dovuti a fenomeni immediati di tipo elastico, alla consolidazione ed (eventualmente) alla compressione secondaria (o *creep*). In terreni non coesivi e nelle argille non sature è prevalente il contributo del cedimento immediato, eventualmente accompagnato da una piccola componente viscosa. I cedimenti di consolidazione prevalgono invece nei suoli coesivi saturi, eccettuati i terreni molto organici, nei quali può essere prevalente il termine viscoso. Per suoli di questo tipo interessa valutare non solo l'entità del cedimento, ma anche il tempo necessario perché esso si stabilizzi.

2.2. MECCANICA DEL CONTINUO

Per poter applicare le teorie ed i metodi di calcolo della geotecnica, derivati dalla teoria dell'elasticità e della plasticità è necessario schematizzare il comportamento meccanico del terreno con modelli semplici richiamando i concetti della *Meccanica del continuo* (in modo tale da evidenziarne la validità e i limiti in quanto essi si applicheranno al calcolo dei cedimenti dei terreni). I modelli semplici elementari utilizzati sono due: il **solido elastico lineare** ed il **mezzo viscoso**. Il modello di **solido elastico lineare (FIGURA 2A)** è caratterizzato da una legge costitutiva indipendente dal tempo; il modello di **mezzo viscoso (FIGURA 2B)** è caratterizzato dall'esistenza di un legame tra le tensioni applicate (σ o τ) e le velocità di deformazione corrispondenti ($\dot{\epsilon}$ e $\dot{\gamma}$).

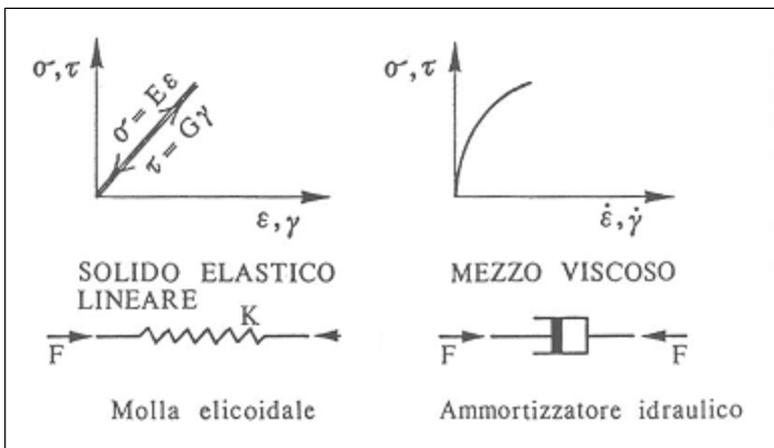


FIGURA 2A/2B
 Modelli di comportamento meccanico del terreno.

2.3. CALCOLO DEI CEDIMENTI

La previsione dei cedimenti assoluti e differenziali costituisce un compito estremamente difficile. Le cause sono da ricercare in molteplici fattori, legati ai seguenti aspetti:

- 1] Esistono molte incertezze per quanto concerne il calcolo delle tensioni indotte in un mezzo caratterizzato da anisotropia e eterogeneità;
- 2] I parametri di deformabilità sono influenzati dalla storia tensionale del deposito, dal disturbo subito dal campione durante la fase di prelievo e preparazione in laboratorio, dalla tecnica di riconsolidazione utilizzata, dal metodo adoperato per la misura delle deformazioni, dal livello delle sollecitazioni e dallo stress-path seguito;
- 3] L'entità dei cedimenti differenziali è condizionata dalla natura del deposito, dalla variabilità spaziale delle sue caratteristiche meccaniche, dalle modalità esecutive della fondazione, dal tipo della fondazione e dalla rigidità della sovrastruttura.

Risulta quindi complicato elaborare un modello che prenda in considerazione tutti questi fattori nel rispetto delle leggi della meccanica, che sia aderente alla realtà e sufficientemente agevole da poter essere facilmente adoperato. Si fa uso di METODI SEMPLIFICATI, a volte puramente empirici, la cui affidabilità è stata verificata confrontando le previsioni con le misure del comportamento di opere in vera grandezza. È necessario avere percezione della complessità del problema fisico e consapevolezza dei limiti dei modelli e schemi adottati.

2.4. ANALISI DELLA CURVA DI CONSOLIDAZIONE SPERIMENTALE

Per effetto di ciascun incremento di carico, la curva cedimenti-tempi sperimentale è caratterizzata dalla presenza di tre diverse fenomenologie di cedimento:

- un cedimento immediato, W_0 , dovuto a svariate concause sperimentali (deformabilità finita del sistema di applicazione dei carichi, non perfetta saturazione di provino ed elementi drenanti, etc.);

- un cedimento da consolidazione primaria, W_c , cioè dovuto al processo idrodinamico, descritto dalla ben nota teoria di TERZAGHI (1923), in cui deformazioni di volume e cedimenti sono associati a dissipazioni di sovrappressioni neutre Δu ;
- un cedimento da consolidazione secondaria, W_s , cioè associato a deformazioni di volume che avvengono indipendentemente dalla variazione nel tempo della pressione neutra; queste possono essere dovute, tipicamente, a deformazioni viscosi (o da 'creep') dei granuli (p.es. nei terreni ricchi di sostanze organiche) o dei contatti interparticellari (nel caso di terreni fini molto plastici), o ancora a rottura progressiva degli elementi (nel caso dei terreni a grana grossa con particelle fragili, come p.es. le piroclastiti, le sabbie calcaree organogene, i terreni prodotti da rocce metamorfiche alterate).

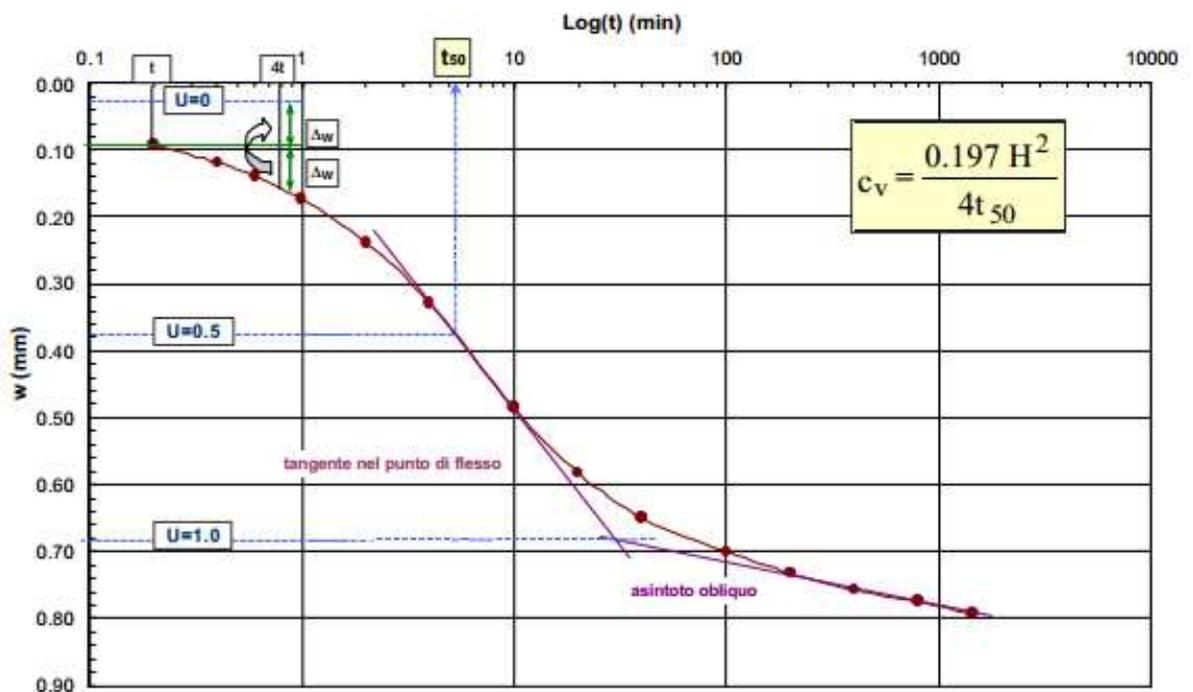


FIGURA 3 - Modello di comportamento edometrico.

3. ANALISI CONCLUSIVA

La trattazione affrontata nei paragrafi precedenti, ha avuto come scopo la descrizione delle problematiche gravanti in generale nel progetto geotecnico e in particolare nella modellazione geotecnica. In tale ambito partecipano in maniera determinante una serie di fattori, differenti teorie e modelli che determinano in larga parte l'esito dell'analisi.

La modellizzazione del sottosuolo costituente l'area di progetto presenta uno sviluppo piuttosto articolato che si esplica in prima analisi nella determinazione di:

- 1] natura dei litotipi che si susseguono consequenzialmente nel substrato;
- 2] configurazione stratigrafica del substrato;
- 3] caratteristiche elastico-meccaniche dei litotipi con relativa parametrizzazione.

Tali risultati possono essere ottenuti mediante un'adeguata campagna di indagine geognostica e prove di laboratorio; gli esiti delle indagini mediante pozzetti, sondaggi o prove penetrometriche (CPT o SPT) possiedono inevitabilmente una valenza locale (nel senso che sono rappresentative delle caratteristiche puntuali del sottosuolo), che devono essere necessariamente "estese" alla globalità dell'area mediante opportuni delicati procedimenti di interpolazione numerica e tecniche di natura probabilistica.

Nello studio del comportamento meccanico, il terreno viene assimilato ad un mezzo ideale continuo con caratteristiche indipendenti dalle dimensioni dell'elemento di volume considerato. Al sistema delle forze intergranulari e degli spostamenti tra i granuli si sostituiscono le tensioni e le deformazioni di un mezzo continuo, il cui legame costitutivo può essere governato da diverse teorie (elasticità, plasticità, viscosità), funzione della natura molecolare del terreno e del tipo di approccio con il quale si vuole affrontare il problema geotecnico.

È necessario inoltre tenere in considerazione che i parametri di calcolo utilizzati ai fini dell'analisi geotecnica vengono modificati (amplificati o ridotti in funzione del tipo di parametro e dell'approccio teorico intrapreso) secondo le prescrizioni delle norme in vigore (D.M. 14.01.2008 – Norme Tecniche per le Costruzioni, Cap. 5).

Ragionando in termini di raggiungimento di un sufficiente grado di sicurezza, i coefficienti applicati portano ad un teorico peggioramento delle caratteristiche elastico-meccaniche dei litotipi e ad una sottostima delle caratteristiche resistive degli stessi, con conseguente ottenimento di cedimenti superiori alle reali capacità deformative delle stratificazioni presenti.

Dal progetto geotecnico si ricava che i cedimenti attesi nell'area in cui è presente il rilevato della **Fase I^A** 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 5 campagne di rilievo⁽¹⁾ altimetrico previste, mediante le quali è stato possibile ricavare il cedimento avvenuto con riferimento alla testa degli assestimetri opportunamente disposti nell'area secondo le indicazioni contenute nel Piano di Monitoraggio. Il risultato ottenuto è stato che gli assestimetri hanno presentato cedimenti inferiori a quelli stimati (**TABELLA 1**) come previsto e giustificato dalle considerazioni sopra esposte. 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)
76	2,9	6,5
79	3,5	6,5
80	3,2	6,5
81	3,7	6,5

TABELLA 1 – Riepilogo dei cedimenti totali rilevati nella **Fase I^A A**.

ASSESTIMETRO	CEDIMENTO ATTESO	COEFFICIENTE DI SICUREZZA
76	50 %	2,0
79	60 %	1,7
80	55 %	1,8
81	63 %	1,6

TABELLA 2 – Riepilogo dei risultati ottenuti nella **Fase I^A A**.

⁽¹⁾ Date del rilievo: 18 e 25 febbraio, 4, 11 e 18 marzo.

Infine il trend evolutivo dei cedimenti dopo le prime tre settimane ha mostrato valori prossimi al millimetro per poi arrestarsi quasi del tutto nell'ultima lettura. Alla luce di dette constatazioni si può con sufficiente grado di sicurezza asserire che il cedimento, per i carichi applicati si sia sostanzialmente esaurito, in quanto presenta un andamento decrescente, in particolare localizzato nel ramo asintotico della curva di consolidazione, tipica dei terreni coesivi. Il comportamento deformativo rilevato presenta dei coefficienti di sicurezza che sono in linea con le approssimazioni applicate nel calcolo geotecnico.

In **FIGURA 4** 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 riducono nel tempo sino ad annullarsi con tendenza asintotica

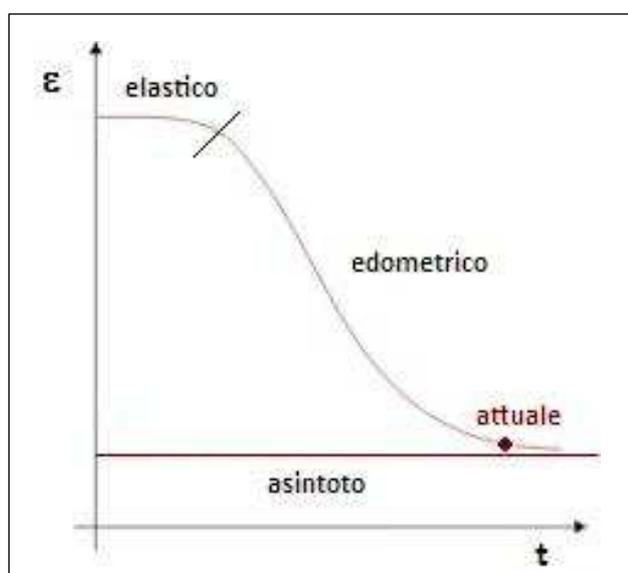


FIGURA 4 - Modello di comportamento edometrico.

|
|

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

Dott. Geol. Mauro Pompei



RILIEVO ED ELABORAZIONE DATI:

Ing. Paolo Putzulu

