

VERIFICA DEL GRADO DI COMPATTAZIONE MEDIANTE L'USO DEL CONE PENETRATION TEST

Nunziante Squeglia

*Dipartimento di Ingegneria Civile – Università di Pisa
squeglia@ing.unipi.it*

Diego C. F. Lo Presti

*Dipartimento di Ingegneria Civile – Università di Pisa
d.lopresti@ing.unipi.it*

Sommario

Nella presente nota è presentato un metodo innovativo per il controllo del grado di compattazione di opere in materiali sciolti. Il metodo è basato sull'ipotesi che la resistenza penetrometrica misurata in sito in corrispondenza del manufatto sia paragonabile a quella misurabile in laboratorio in una mini camera di calibrazione, ovviamente sullo stesso terreno. La sperimentazione ha permesso di verificare, anche attraverso misure "dirette" del grado di compattazione, la validità del metodo e di tracciare gli indirizzi futuri, che al momento hanno portato alla progettazione di una apparecchiatura che consente il controllo dello stato tensionale applicato.

Introduzione

La presente nota riporta le indagini e gli studi effettuati per il controllo della compattazione di un argine a servizio di una cassa di espansione sul torrente Freddana. Il lavoro è frutto di una convenzione tra la Provincia di Lucca ed il Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Pisa (Laboratorio Geotecnico). Le attività risono consistite nella esecuzione di prove di classificazione (granulometria, aerometria e limiti di Atterberg) dei materiali utilizzati per la costruzione dell'argine e nella ideazione di una metodologia innovativa per il controllo del grado di compattazione raggiunto, attraverso l'uso di prove penetrometriche statiche. Questa metodologia ha richiesto lo sviluppo di una mini camera di calibrazione e di un mini penetrometro da laboratorio, di una serie di indagini di taratura ed infine l'esecuzione dei controlli sul rilevato arginale in vera grandezza. I controlli sul rilevato in vera grandezza sono consistiti in una serie di dodici prove penetrometriche statiche, quattro prove dilatometriche e una serie di quattro prelievi di campioni cubici.

Descrizione del metodo e delle apparecchiature utilizzate.

Il metodo proposto è stato basato inizialmente su due ipotesi: la prima riguarda il confronto tra la resistenza alla punta (q_c) di un penetrometro standard, avente diametro di 35.7 mm, e quella di un altro penetrometro con diametro minore (e.g. 8 mm) che si assume essere la stessa; la seconda che la resistenza alla punta (q_c) misurata in camera di calibrazione (CC) in condizione BC3 (deformazione laterale impedita) corrisponda, nel caso di terreni del tipo A4 o A6 (CNR UNI 10006), a quella che si misurerebbe nel medesimo terreno e nelle medesime condizioni ma in assenza di confinamento laterale.

Procedure simili sono riportate in alcune norme AFNOR che prevedono la realizzazione di un rilevato sperimentale e l'uso di penetrometri dinamici. A latere della discussione si vuole sottolineare che i controlli che normalmente si eseguono sui rilevati arginali sono

normalmente mutuati dalle procedure di controllo utilizzate per i rilevati stradali, ovviamente con intenti e performances diverse.

L'apparecchiatura appositamente realizzata per la ricerca (Figura 1), consiste di una mini CC avente diametro interno di 152.4 mm e altezza 116 mm. Si tratta in pratica della fustella utilizzata per la prova di compattazione Proctor che raggiunge un'altezza complessiva di 167.0 mm con la presenza del collare. Il provino viene ricostruito all'interno della suddetta fustella con la metodologia prescelta ed alla densità desiderata. In una prima versione dell'apparecchiatura, al provino veniva applicata una pressione verticale di consolidazione mediante un pistone pneumatico che agiva sulla base inferiore del provino, mentre in un successivo sviluppo dell'attrezzatura la pressione è stata applicata mediante una membrana in lattice.

La prova penetrometrica effettuata in laboratorio utilizza un minipenetrometro appositamente realizzato per le prove nella mini CC, dotato di rivestimento per escludere l'attrito laterale. Il mini penetrometro ha una punta di diametro di 8.0 mm e angolo di apertura di 60°. La punta viene spinta dall'alto alla velocità di 2cm/s (come nella prova standard) ed è centrato sul provino mediante una boccola.

La resistenza alla punta viene determinata misurando attraverso una cella di carico la forza necessaria ad infiggere il minipenetrometro.

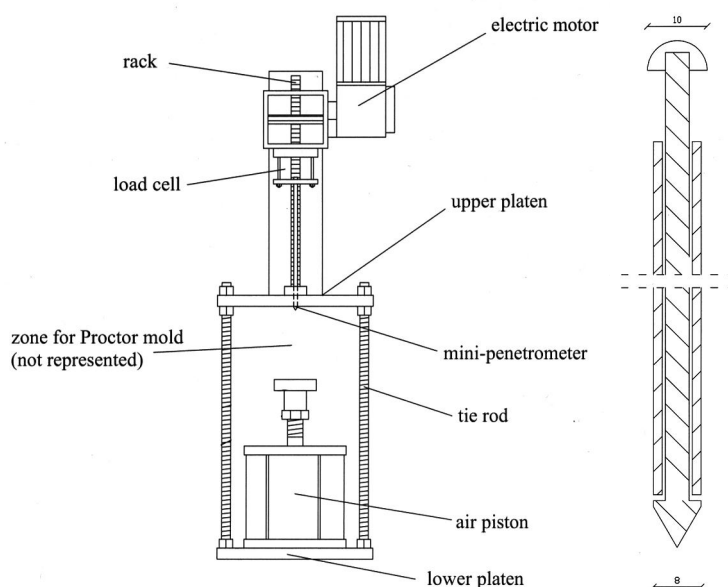


Figura 1. Schema dell'apparecchiatura e dettaglio del mini penetrometro.

Verifica del metodo.

La verifica del metodo è stata effettuata procedendo ad una serie di prove sia in sito, sia in laboratorio. La verifica in sito è stata condotta nel sito di Calendasco (limi-sabbiosi sopra falda) spingendo nel terreno sia la punta standard sia il mini - penetrometro lungo verticali contigue. Sono state effettuate quattro verticali con la punta standard e quattro con il mini - penetrometro. La Figura 2 mostra l'involuppo dei massimi e dei minimi per le due punte. Gli intervalli di misura così definiti, appaiono ben sovrapponibili e non si evidenziano differenze sistematiche da riferire alle dimensioni delle punte ma piuttosto alla variabilità naturale dei terreni in sito. Per effettuare la verifica in laboratorio, sono state eseguite prove di taratura su provini confezionati con sabbia del Ticino, denominata TS4. La sabbia del Ticino è un materiale su cui esiste un'ampia letteratura tecnica che ne documenta il comportamento (si

veda ad esempio Jamiolkowski et al. 2000, 2001).

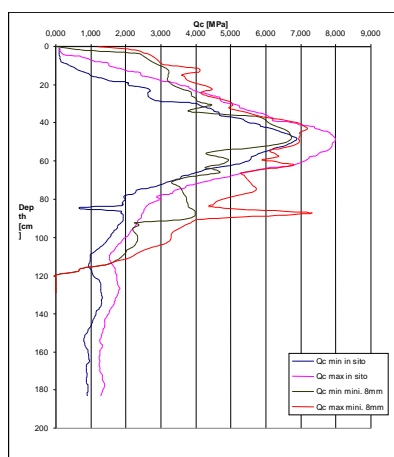


Figura 2. Confronto tra punta standard e punta da 8 mm.

Sono quindi state effettuate alcune prove penetrometriche con il mini - penetrometro su campioni di TS4 ricostruiti all'interno della mini CC. I campioni sono stati ricostruiti con una densità relativa all'incirca pari al 50% e successivamente sono stati assoggettati a differenti pressioni verticali. Per tali prove il rapporto diametro(miniCC)/diametro(mini - penetrometro) è pari a $152.4/8 = 19.5$.

I risultati di prova sono stati confrontati con quelli disponibili in letteratura e relativi una grande CC (1200 mm di diametro) con un penetrometro standard (35.7 mm di diametro) in condizioni BC1 e con un rapporto diametro(CC)/diametro(penetrometro) pari a 33.6. L'andamento della q_c con la profondità per i campioni consolidati alle pressioni di 100 kPa, 150 kPa e 300 kPa è riportato in Figura 3.

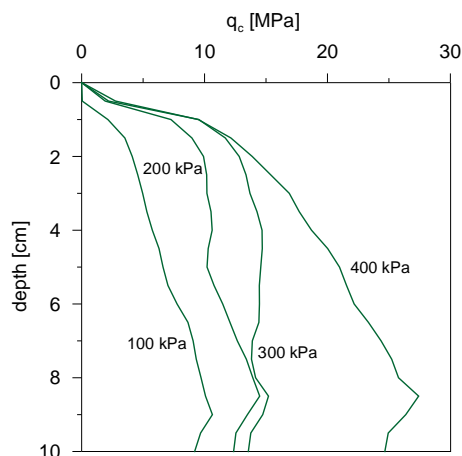


Figura 3. Esempio di misure registrate nella miniCC su TS4.

Si nota che in alcuni casi la $q_{c,mini}$ mostra un valore costante con la profondità, mentre in altri casi si osserva un continuo aumento. Si rammenta che il disco di base è posto a 11 cm e che la sua presenza influenza i valori di q_c già a profondità di 8-9 cm. Analogamente a quanto fatto per le prove nella CC, nel caso di andamento continuamente crescente della q_c , si è considerato il valore a metà altezza della CC (Garizio, 1997) e più precisamente quella corrispondente alla profondità di 5 cm. Le correlazioni tra $q_{c,std}$ e $q_{c,mini}$ sono risultate ottimali in un intervallo di stato tensionale compreso tra 100 e 300 kPa, mentre al disopra di questi stati tensionali le differenze sono più evidenti. In ogni caso per l'applicazione in esame

l'intervallo di stato tensionale copre quello che normalmente si incontra in sito.

Applicazione ad un caso reale.

Il caso è relativo alla costruzione di un argine di una cassa di espansione su di un affluente del fiume Serchio in cui le principali prescrizioni progettuali relative alla costruzione sono: uso di materiale classificabile come A4 o A6, costruzione per strati di max 30 cm e compattazione minima pari al 90% dell'ottimo Proctor. Il controllo del grado di addensamento è stato effettuato mediante l'esecuzione di prove CPTe in laboratorio (con il mini - penetrometro) su campioni del terreno impiegato per la costruzione del rilevato, l'esecuzione di prove CPTe in sito con il penetrometro standard ed infine mediante il prelievo di campioni indisturbati o a parziale disturbo in sito con differenti metodi e determinazione del peso di volume secco. In quest'ultimo caso è stato utilizzato anche il carotiere autoinguinante, sviluppato dal CNR di Pisa (Principe et al. 1997), per il prelievo in sito di campioni continui, a basso grado di disturbo e che può essere impiegato in terreni coesivi, da mediamente a poco consistenti, e granulari, da ben addensati a sciolti. In laboratorio sono state eseguite prove CPTe con il mini - penetrometro su campioni del materiale di costruzione dell'argine compattato nella fustella sia al 90% che all'80% dell'ottimo del Proctor modificato. Attraverso questa procedura sono state ricavate le relazioni che legano il grado di addensamento allo stato tensionale e quindi alla profondità. La figura 4 mostra i risultati delle prove effettuate sull'argine ed i valori del grado di addensamento ricavati mediante la mini CC e le misure dirette del peso dell'unità di volume.

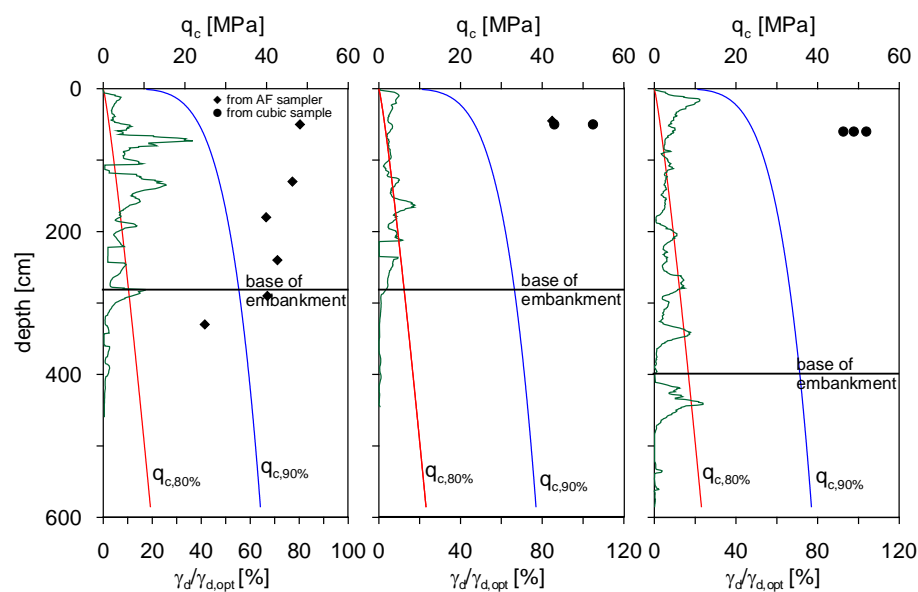


Figura 4. Risultati delle prove in sito effettuate. Le ascisse dei punti sono riferiti all'asse inferiore.

Come si evince dalla figura 4, il grado di compattazione non rispetta i requisiti minimi richiesti e l'accordo tra le misure dirette e quelle dedotte mediante le prove penetrometriche è buono.

In una seconda fase della sperimentazione è stato indagato il ruolo della tensione orizzontale sulle misure ottenute in sito. A tale scopo sono state eseguite sette prove penetrometriche e quattro prove dilatometriche che hanno consentito di stimare il coefficiente di spinta a riposo K_0 e quindi lo stato delle tensioni geostatiche. L'elaborazione per la determinazione del coefficiente K_0 è riportata di seguito e fa riferimento alla formulazione di Jamiolkowski et al. (1988). In particolare il valore di K_0 è stato determinato dal parametro K_D ottenuto dalle prove dilatometriche e dalla resistenza alla punta delle prove penetrometriche condotte in prossimità

delle rispettive verticali DMT utilizzando la seguente espressione:

$$K_o = 0.376 + 0.095 \cdot K_D - 0.0046 \frac{Q_c}{\sigma'_{vo}} \quad (1)$$

dove K_D è l'indice ricavato dalla prova dilatometrica (Marchetti e Crapps 1981).

La Figura 5 riassume i risultati ottenuti. Le sigle DMT1_1 e DMT1_2 indicano rispettivamente che la prova DMT1 è stata interpretata una volta utilizzando i risultati della CPTe1 e la seconda volta quelli della CPTe2, eseguita in una verticale vicina. Le sigle DMT2_1 e DMT4_1 indicano che le rispettive DMT sono state interpretate utilizzando la CPTe20d, mentre le sigle DMT2_2 e DMT4_2 impiegano i risultati della CPT315d.

L'equazione che interpola i valori riportati nelle verticali 1 e 2 in Figura 5 ha la seguente espressione:

$$K_o = 1.45 \cdot Z^{-0.794} \quad (2)$$

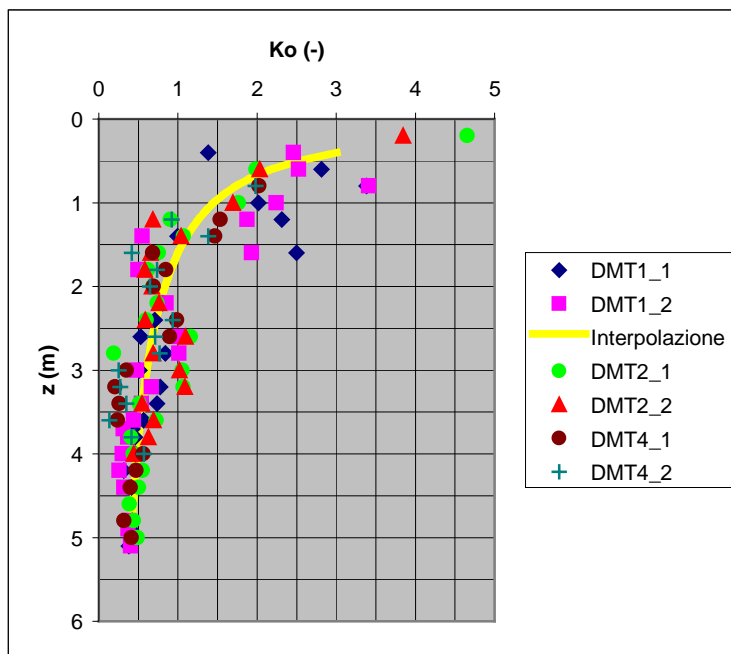


Figura 5. Andamento di K_o con la profondità.

La conoscenza delle tensioni geostatiche consente di valutare il grado di addensamento utilizzando equazioni del seguente tipo (Jamiolkowski et al. 1988, Garizio 1997):

$$q_c = A \cdot (\sigma'_{vo})^n \cdot (\sigma'_{ho})^n \cdot \exp(B \cdot D_r) \quad (3)$$

La precedente espressione può essere semplificata, per un determinato grado di addensamento, nel seguente modo:

$$q_c = C_o \cdot (K_o)^n \cdot (z)^{2n} \quad (4)$$

Analisi statistiche eseguite sui risultati di prove penetrometriche in CC su campioni ricostruiti di diverse sabbie hanno fornito valori per l'esponente n pari a circa 0.5 (Garizio 1997). In realtà queste regressioni mostrano che l'effetto della tensione orizzontale è dominante nella

misura di q_c e quindi bisognerebbe determinare due diversi esponenti per le due tensioni geostatiche. I risultati delle prove di taratura eseguite nella mini CC con un minipenetrometro sul materiale usato per costruire l'argine e compattato al 90% del Proctor Modificato consentono di esprimere la resistenza alla punta con la seguente equazione:

$$q_c = 17.6 \cdot (z)^{0.07} \quad (5)$$

Per riferire questo risultato alle condizioni di sito si sono formulate le seguenti ipotesi:

- nella mini CC, per effetto delle deformazioni laterali impedito si attinge un valore di K_0 pari o molto prossimo a K_p (stimato pari a circa 4.6);
- l'esponente n dell'equazione (4) si è assunto pari a 0.5
- l'andamento di K_0 in sito è espresso dall'equazione (2)

Con queste assunzioni si ricava che la q_c varia da 12 a 6 MPa all'aumentare della profondità dalla cresta dell'argine a 5 m, cogliendo quindi le osservazioni eseguite in sito.

Sviluppi futuri della ricerca.

La sperimentazione ha permesso di verificare, almeno per il caso pratico esaminato, la validità del metodo nel controllo del grado di compattazione di un'opera in materiale sciolto. La stessa sperimentazione, alla luce delle esperienze riportate in letteratura, ha confermato l'importanza della forma dello stato tensionale anche nel caso dei materiali utilizzati per la costruzione dei rilevati arginali. Allo scopo di indagare in modo più appropriato questo aspetto è in fase di preparazione una seconda versione della mini CC che consentirà di avere sia un maggiore rapporto tra diametro della camera e diametro del cono sia la possibilità di variare in modo indipendente le tensioni verticali ed orizzontali.

Bibliografia

- Garizio G.M. (1997) *"Determinazione dei parametri geotecnici e in particolare di K_0 da prove penetrometriche"* M.Sc. Department of Structural Engineering, Politecnico di Torino
- Jamiolkowski M., Ghionna V.N., Lancellotta R. & Pasqualini E. (1988). *"New correlations of penetration tests for design practice"*. Proc., Penetration Testing 1988, ISOPT 1, Orlando, Florida, J. De Ruiter ed., Vol. 1 pp: 263-296
- Marchetti S. & Crapps D.K. (1981) *"Flat Dilatometer Manual"*. GPE Inc. Gainesville, Florida, USA
- Principe C. Malfatti A., Rosi M., Ambrosio M. Fagioli M.T. (1997) Metodologia innovativa di carotaggio microstratigrafico: esempio di applicazione alla tefrostratigrafia di prodotti vulcanici distali. *Geologia Tecnica Ambientale* Vol 39, 4/97
- Jamiolkowski M., Lo Presti D.C.F. & Garizio G.M. 2000 Correlation between Relative Density and Cone Resistance for Silica Sands. 75th Anniversary of Karl Terzaghi's ERDBAU
- Jamiolkowski M., Lo Presti D.C.F. & Manassero M. 2001 Evaluation of Relative Density and Shear Strength of Sands from CPT and DMT, Invited Lecture Ladd Symposium, GSP No. 119, ASCE, pp. 201-238.