

ASSOCIAZIONE GEOTECNICA ITALIANA
QUARTO CONVEGNO DI GEOTECNICA

Padova, Maggio 1959

CONSOLIDAMENTO DI ARGILLE MOLLI
PER L'ESECUZIONE DELLO SCAVO E PER LA FONDAZIONE
DI UN PROFONDO SIFONE TRIPLO

G. MEARDI (*)

SOMMARIO - Si dà notizia di un consolidamento di argille molli mediante pali di sabbia utilizzato per l'esecuzione dello scavo e della fondazione di un sifone triplo profondo. Si mette in evidenza l'influenza della soprappressione iniziale (terreno non consolidato) e quella dell'abbassamento della quota di scarico dei dreni.

Si confrontano i risultati ottenuti con quelli prevedibili col calcolo.

Nel 3° Convegno di Geotecnica ho riferito insieme con l'Ing. NOCCIOLI, Capo dell'Ufficio del *Genio Civile* di Pisa, su un lavoro di consolidamento, mediante «pali di sabbia», del terreno di fondazione degli argini dello Scolmatore d'Arno. E' un lavoro che è ancora in corso per le sue ultime appendici, eseguito sempre secondo i criteri allora tracciati, che hanno avuto sufficiente pratica rispondenza. (1).

Come avevo promesso allora, intendo qui riferire su uno dei lavori accessori della sistemazione dello

peraltro costretti a sottopassarlo con un profondo sifone.

L'opera (v. Fig. 1), realizzata con tre canne rettilinee in c.a., ha complessivamente la larghezza di m 10,80 e la lunghezza m 42,40, più altrettanto di scivoli alle testate; essa scende con la fondazione a $-5,30$ avendo il piano campagna a $+1,25 \div 1,90$ ed il fondo di sistemazione del Tora a $-1,70$.

Il terreno nel quale è stata eseguita l'opera è dello stesso tipo di quello dello Scolmatore, e cioè una argilla limosa molle; essa è anzi della peggiore qualità fra quelle trovate per l'esecuzione dello Scolmatore. La sua granulometria è indicata più avanti in Fig. 6: i suoi limiti sono $LL = 80 \div 87\%$ e $PL = 28 \div 31\%$: l'umidità è talvolta di soli pochi percento inferiore al limite liquido.

Nella Fig. 2 è indicata, di fianco alla sezione, la resistenza al taglio, ricavata in posto dalla resistenza a compressione con espansione laterale libera di nu-

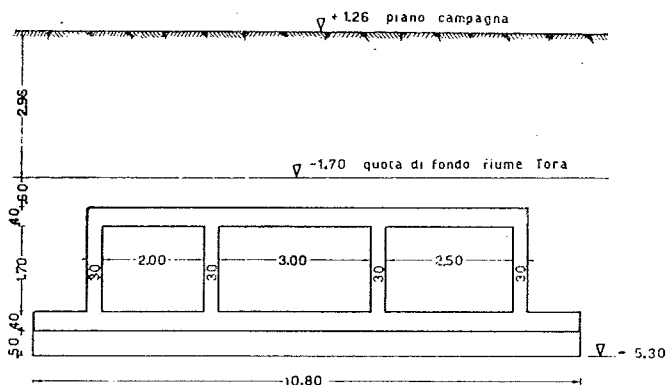


Fig. 1 - Sezione del manufatto.

Scolmatore, che riguarda la costruzione di un sifone triplo sotto uno dei suoi affluenti. Si tratta del fiume Tora, che a 10 Km dalla foce viene deviato nello Scolmatore mediante 2 Km di nuovo alveo; questo attraversa due grandi fossi e un acquedotto, che sono

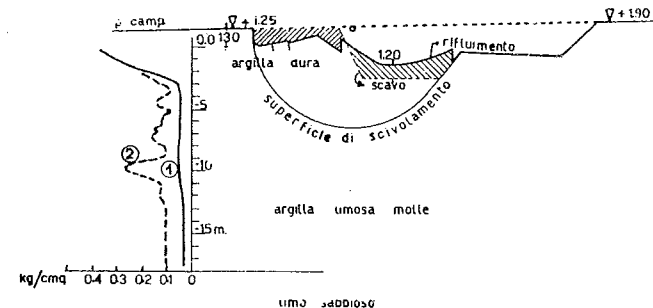


Fig. 2 - Sezione del terreno dopo lo scivolamento: 1) resistenza al taglio prima del consolidamento; 2) resistenza al taglio dopo il consolidamento.

(*) Dott. Ing. Guglielmo MEARDI, del Laboratorio Geotecnico dell'Istituto di Scienze delle costruzioni del Politecnico di Milano.

(1) NOCCIOLI e MEARDI: *Scolmatore di piena del fiume Arno - Consolidamento con dreni di sabbia sul terreno di fondazione degli argini e delle opere d'arte*. Geotecnica 1957, n. 6.

merosi provini di terreno estratti durante un sondaggio all'inizio del lavoro; si vede che, passata una crosta superficiale di 3 m circa si trovano le argille molli che arrivano fino a -18 m: le più profonde hanno resistenze dell'ordine di $0,025$ Kg/cm², però

già a -3 abbiamo resistenze di 0,05 Kg/cm² per cui non solo la fondazione, ma anche lo scavo, interessa terreni molto molli.

Di questo ci si rese conto subito, alla esecuzione dei primi scavi perché, arrivati appunto su metà sezione alla quota di -3, che corrisponde a profondità di m 4,30 ÷ 4,70 dal piano campagna, si ebbe un sollevamento del fondo di oltre 1 m con rottura e sprofondamento della crosta superficiale.

La Figura 2 indica il rilievo del terreno dopo lo scivolamento, con il profilo approssimativo dello scavo che era stato eseguito e la probabile superficie di scivolamento. Le fotografie N. 3 e N. 4 indicano, la prima in modo evidente l'alzamento del fondo, e la seconda la rottura della crosta superficiale con l'ab-

è partiti alla ricerca delle possibili soluzioni del problema di eseguire lo scavo fino alla profondità necessaria.

Nella Fig. 5 è indicato lo studio con palancole metalliche spinte fino a -14,70; si è trovato che, a parte il problema di dare un incastro a queste palancole

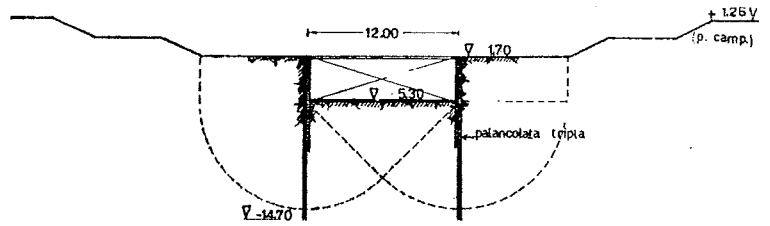


Fig. 5 - Sezione con lo studio della protezione dello scavo con palancole multiple.



Fig. 3 - Fotografia dello scavo dopo lo scivolamento.

nella parte superiore, esse avrebbero dovuto sopportare un momento flettente di ben 111 tm/m per il solo equilibrio, e di 217 tm/m per raggiungere la sicurezza di 1,5. Per questo sarebbero state necessarie palancole metalliche del massimo profilo costruito dalla LARSEN disposte in triplo ordine: quindi difficoltà serie di approvvigionamento e spesa enorme.

Abbandonata questa prima soluzione si è pensato naturalmente se non fosse stato possibile fare anche qui un consolidamento del terreno adattando opportunamente il metodo dei dreni con pali di sabbia che era impiegato contemporaneamente lungo le fondazioni degli argini.

Si è voluto però esaminare dapprima anche la possibilità di un consolidamento elettrosmotico; ma è sembrato in primo luogo che la granulometria del terreno, riportata in Fig. 6, non fosse la più indicata poichè decisamente fuori delle granulometrie per le quali sarebbe possibile il metodo elettrosmotico secondo le esperienze della *Montrench Corporation*, così come sono riportate nel testo del TSCHEBOTARIOFF « *Soil Mechanics, Foundations and Earth Structures* - New York 1952 - pag. 423 ». (V. la stessa Fig. 6).

bassamento sopra indicato. La verifica dell'equilibrio lungo la superficie di scivolamento tracciata, se si esclude la resistenza della crosta dura che come al solito si rompe ai primi movimenti del terreno molle



Fig. 4 - Particolare della rottura della crosta superficiale..

sottostante, dà anche essa una resistenza media a rottura di circa 1 t/m².

Dopo lo scivolamento si è fatto il sondaggio con il rilievo delle resistenze iniziali riportato in Fig. 2, e si

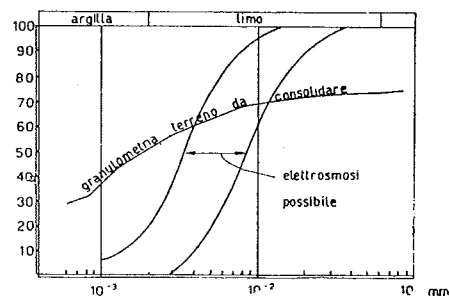


Fig. 6 - Granulometria del terreno in confronto con quella adatta per il consolidamento elettro-osmotico (dal TSCHEBOTARIOFF).

In secondo luogo sarebbe stato necessario, data la quantità di terreno da consolidare (9100 m³) e la quantità di acqua da togliere per dare al terreno un sufficiente consolidamento, un forte consumo sia di energia elettrica che di alluminio degli elettrodi, oltre una sensibile spesa accessoria per l'allacciamento alla rete dell'energia, raddrizzamento, ecc. Vista quin-

di l'incertezza del risultato perché il terreno non sembrava adatto, e la spesa notevole che si sarebbe dovuta incontrare, si è rinunciato a fare questa esperienza e si è ripiegato sul sistema ormai noto e che dimostrava di funzionare per il consolidamento degli argini, e cioè il metodo dei dreni di sabbia.

Sarebbe però stato necessario, per applicare il metodo di consolidamento con pali di sabbia come per gli argini, di portare molta terra sul posto e lasciarvela affinché il peso del terreno riuscisse a spremere dal terreno di sottofondo la quantità di acqua necessaria per ottenere il necessario consolidamento.

E' stato invece possibile evitare un forte carico di terra seguendo due considerazioni. Si era notato che già nelle condizioni di partenza il livello piezometrico dell'acqua contenuta nei pori del terreno profondo era di qualche metro (almeno due metri) superiore al piano campagna: questa pressione equivaleva ad un carico di 2 t/m². Si è pensato poi di abbassare la quota di scarico del drenaggio raccogliendo l'acqua entro due pozzetti al centro dell'area aventi il fondo alla quota stabilmente raggiunta e cioè quella superiore del terreno rifluito nello scavo. L'acqua si sarebbe sollevata a mano o con piccola pompa due volte al giorno (la cubatura di acqua drenata è sempre minima), in modo di poter contare su una superficie libera media dello scarico a m 1,50 sotto il piano campagna (V. Fig. 7). Si raggiungeva così

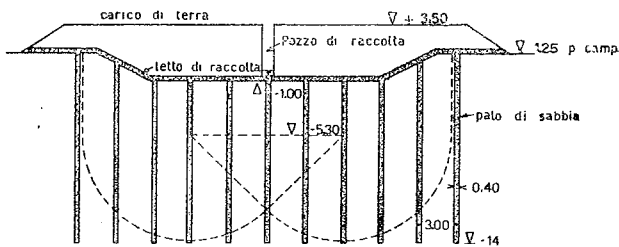


Fig. 7 - Sezione delle opere di consolidamento.

senza muovere terreno un sovraccarico sui pori di 3,50 t/mq. Aggiungendo m 2,25 di terra sul piano campagna, del peso di 1,6 t/mc si raggiungevano 7,1 t/mq. Si poteva quindi in conclusione disporre di un carico uguale al doppio di quello del terreno effettivamente portato.

In tal modo, con un angolo di attrito « reale » (in funzione dei carichi « effettivi ») di 28°, il con-

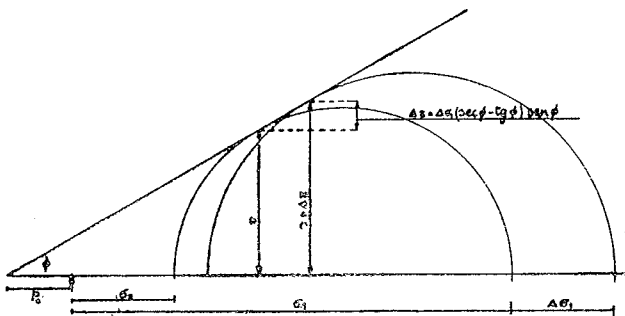


Fig. 8 - Cerchi di MOHR con il calcolo grafico dell'aumento $\Delta\tau$ di resistenza a rottura conseguente all'aumento $\Delta\sigma_1$ del 1° sforzo principale effettivo.

solidamento totale avrebbe dato un aumento $\Delta\tau$ dello sforzo di taglio nella condizione di rottura pari a (V. Fig. 8)

$$\Delta\tau = \Delta\sigma (\sec \varphi - \operatorname{tg} \varphi) \operatorname{sen} \varphi = 0,71 \cdot 0,282 = 0,2 \text{ Kg/cm}^2$$

Praticamente dopo 18 mesi, e con dreni del diametro di 40 cm disposti a quinconce con interasse di m 3,00, avendo il terreno più caratteristico un coefficiente di consolidamento $c_v = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$, si poteva contare su un consolidamento del 40%, che corrisponde a $\Delta\tau = 0,2 \cdot 0,4 = 0,08 \text{ Kg/cm}^2$.

Infatti, trascurando il piccolo contributo del drenaggio verticale verso lo strato superiore di sabbia, compensato da un poco di ritardo nel completamento del carico di terra dovuto alla stagione poco propizia, si ha, come è noto

$$t = T_v d^2/c_v = T_v 300^2/1,6 \cdot 10^{-4} = 5,6 \cdot 10^8 T_v$$

essendo t il tempo impiegato a raggiungere il consolidamento corrispondente al fattore di tempo T_v .

Con $t = 18 \text{ mesi} = 4,8 \cdot 10^7 \text{ sec}$ si ha

$$T_v = 4,8 \cdot 10^7/5,6 \cdot 10^8 = 0,085$$

cui corrisponde appunto (V. ad es. TSCHBOTARIOFF - *Soil Mechanics*, ecc. New York 1952) un consolidamento del 40%.

Il cedimento rilevato dalle piastre di livello poste al centro del rilevato, combinato col calcolo del cedimento corrispondente all'assestamento totale, hanno confermato tali previsioni. Infatti il terreno profondo molle drenato aveva lo spessore di m 12, e dalla curva « vergine » dedotta dalle prove edometriche col metodo di TERZAGHI e PECK si era ricavato un coefficiente $C = 0,207$ per la formula dell'assestamento

$$\Delta h = h C \lg_{10} (p_2 : p_1)$$

Essendo stata valutata con le stesse prove in 0,4 Kg/cm² la pressione p_0 di consolidamento all'inizio del lavoro si può ritenere $p_1 = 0,4 \text{ kg/cm}^2$ da -2 m a -7 m e di qui crescente linearmente fino a 0,94 Kg/cm² alla quota di -14, limite inferiore del terreno drenato. Invece p_2 si potrà ritenere variabile da 0,80 a 1,04 da -2 m a -7 m e da 1,04 a 1,42 da -7 m a -14 m.

Con questi dati, servendosi della formula sopra scritta, trascurando il cedimento della crosta dura superficiale e quello del terreno molle dove non arrivano i dreni, si ricava un assestamento totale di cm 80.

L'assestamento delle piastre di livello dopo il collocamento dell'ultimo carico (40 cm) corrisponde bene al 40% dell'assestamento totale (32 cm) più 8 cm che si possono attribuire all'assestamento del rinterro che si trovava sotto la piastra.

Il volume dell'acqua di drenaggio estratta dai pozzetti avrebbe potuto dare un altro controllo, ma esso è più incerto, dato il metodo sommario della sua valutazione, l'incidenza della pioggia e quella di qualche via d'acqua nella massa del terreno. Invece si ebbe un altro controllo dall'aumento di resistenza misurato alla fine del trattamento e riportato in Fig. 2. La

resistenza da $0,025 \div 0,5 \text{ Kg/cm}^2$ è passata a $0,10 \div 0,12$, con un aumento quindi dell'ordine di quello calcolato.

Vennero dunque eseguiti pali di sabbia $\varnothing 40 \text{ cm}$ disposti a quinconce con l'interasse di 3 m , per una larghezza complessiva di 30 m e per una lunghezza di 50 m spinti fino alla quota di -14 m .

Il lavoro per il consolidamento venne eseguito sfruttando lo scavo già fatto a quota $-1,00$, allargandolo a 18 m e raccordandolo al piano campagna con scarpata a $2/1$. Lo si è coperto con uno strato di sabbia dello spessore di 40 cm , indi si è riempito lo scavo di terra ed eseguito un primo carico di circa 1 m sopra il piano campagna, lasciando aperti due pozzi di $1,00 \times 1,50$ al centro dell'area (V. Fig. 8). Si sono successivamente eseguiti i dreni con le macchine poste sul piano così ottenuto. Questo allo scopo di poter lavorare pur essendo imminente la stagione piovosa, poichè era sufficiente profilare il terreno superiore a spiovente perché le piogge scolassero e lasciassero la possibilità di lavorare.

I dreni sono stati eseguiti con l'attrezzatura da trivellazione affondando i tubi per battitura fino ad oltrepassare lo strato di sabbia senza estrarre terreno, in modo da non impoverire tale strato che doveva raccogliere l'acqua drenata. Essi sono stati spinti fino a -14 in modo da consolidare tutto il banco dove possono prodursi le più pericolose superfici di scivolamento. Il riempimento di sabbia del tubo è stato fatto fino al piano di lavoro per compensare il calo che si produceva non appena il dreno veniva saturato dall'acqua.

Ultimati i dreni è stato eseguito il completamento del rilevato portandolo a $2,25$ sul piano campagna.

Il drenaggio è stato lasciato funzionare per un anno e mezzo, dopo di che, controllato l'aumento di resistenza del terreno a mezzo del Vane Test (V. Fig. 2) venne iniziato lo scavo. Questo venne eseguito con un profilo analogo a quello della Fig. 5, aumentando

di qualche metro lo scavo generale a quota $-1,70$, addolcendo la scarpata e limitandosi a difendere le pareti dello scavo verticale profondo con una comune palancolata sbatacchiata in sommità ed affondata nel terreno da 4 a 6 m .

E' stato possibile così raggiungere, a campioni di 5 m , la quota di $-5,30$ prevista dal progetto. Si è tuttavia constatato che il consolidamento era appena sufficiente perché durante l'esecuzione del lavoro si sono prodotte alcune crepe nel terreno circostante, ed il fondo, pur senza sensibili ed evidenti movimenti, nell'intervallo tra ultimazione dello scavo e getto del fondo del sifone, benché immediatamente caricato, si è alzato fino a 40 cm . Le crepe sono state notate a 80 m di distanza dal centro del sifone nella direzione dell'asse del medesimo, che corrisponde a circa 40 m dal bordo dello scavo.

Il consolidamento raggiunto col drenaggio aveva quindi eliminato il pericolo delle superfici di scivolamento più pericolose, e cioè più vicine, come quelle indicate nella Fig. 5. Erano rimaste quelle a raggio più largo, esse pure parzialmente consolidate, che sarebbe stato costosissimo consolidare completamente e che erano evidentemente meno pericolose; infatti, sia pure senza margine, esse hanno permesso la esecuzione del lavoro.

* * *

Con la presente nota si è inteso illustrare ancora una volta l'utilità del consolidamento accelerato mediante pali di sabbia per risolvere problemi di scavo e di fondazione in terreni molli. Si è anche mostrata l'influenza della quota di scarico dei dreni, che conviene tenere il più basso che è possibile.

Si è visto anche come il calcolo teorico, con coefficienti dedotti dalle prove edometriche può dare indicazioni sufficientemente approssimate sull'andamento di fenomeni di questo genere.

Milano, 15 febbraio 1959

SUMMARY: The Author explains how a consolidation of soft clays, made by means of sand piles, was employed for the excavation and for the foundation of a deep triple siphon. He points out the influence of the initial pore pressure (partially consolidated soil) and that of the lowering of the drains discharge elevation.

The results obtained are compared with those calculated.

SOMMAIRE: L'Auteur informe comment une consolidation d'argiles tendres avec pieux de sable a été utilisée pour rendre possible l'excavation et l'exécution de la fondation d'un siphon triple profond.

Il met en évidence l'influence de la pression initiale de l'eau interstitielle (le sol était partiellement consolidé) et celle de l'abaissement de l'hauteur de décharge du drainage.

Les résultats obtenus sont comparés avec ceux prévus par le calcul.