

CONSOLIDAMENTO CON PALI DI SABBIA DI ARGILLE MOLLI DI FONDAZIONE D'ARGINI (*)

G. MEARDI (**)

SOMMARIO: Si dà notizia dei criteri adottati nella progettazione e nella attuazione di una importante opera di consolidamento di terreni mediante esecuzione di dreni. Si pone in rilievo l'importanza tecnica ed economica che hanno avuto sistematiche campionature del terreno ed un corretto impiego del penetrometro sia in fase di progettazione che di esecuzione dell'opera.

1 - Generalità

Le piene del fiume Arno recano notevole danno alla città di Pisa ed alla campagna circostante e pertanto già da tempo è stata studiata la costruzione di un canale scolmatore che partendo da Pontedera (km. 21 a monte di Pisa) scaricasse direttamente nel mare i colmi di piena. Il lavoro è stato deciso solo recentemente ed ormai è già appaltato quasi per intero.

Nell'esecuzione del lavoro si sono però trovate difficoltà molto serie per causa della natura poco favorevole del terreno. Infatti la parte media inferiore del canale scolmatore attraverso un deposito di spiaggia marina, asciutto in superficie, ma ancora molto molle in profondità e composto di argilla limosa con contenuti di acqua molto vicini al limite di liquidità, cui corrispondono resistenze di compressione (con espansione laterale libera) che scendono fino a 0,08 Kg. per cm² (v. Fig. 1).

Questo deposito ha uno spessore variabile da m 6 a m 18 ed appoggia su un banco di sabbia fine (v. Fig. 2).

Su detto deposito era stato costruito da poco l'argine destro — largo alla base m 23 e in sommità m 4; alto m 4 circa — ed era stato scavato il terreno superficiale per la formazione del canale, quando si sono verificati due scoscendimenti della lunghezza di 200 m ciascuno, l'uno nel settembre 1953 verso il canale scolmatore, l'altro nel giugno 1954 verso un vecchio canale più vicino detto Fossanova. La sezione del terreno dopo gli scoscendimenti è indicata nelle Figg. 2 e 3.

(*) La presente Nota è stata pubblicata negli Atti del IV Congresso Internazionale di Geotecnica, Londra - Agosto 1957, e viene qui presentata nella traduzione italiana con il consenso della *International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering* e della *Butterworths Publications Ltd.*, editrice degli Atti anzidetti.

(**) Dott. Ing. Guglielmo MEARDI del Politecnico di Milano - Laboratorio Geotecnico dell'Istituto di Scienza delle Costruzioni.

Il secondo scoscendimento si produsse, nonostante che ivi il rilevato arginale fosse stato eseguito solo parzialmente.

Dopo quest'ultimo fatto, in base a sondaggi e prove sommarie eseguite nel frattempo, si decise di pro-

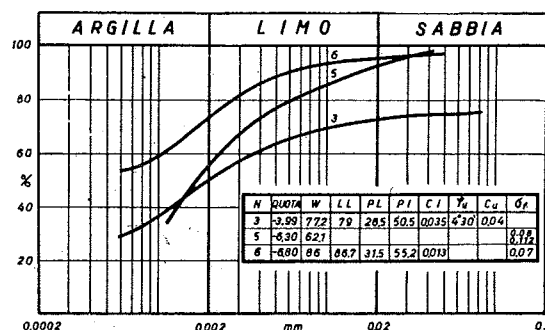


Fig. 1 - Curve granulometriche di alcuni campioni e proprietà caratteristiche.

cedere, in due tratti di prova, al consolidamento del terreno profondo mediante il ben noto sistema dei pali di sabbia. Si impiegarono in questa prova pali di sabbia di 40 cm a distanza di quattro metri eseguiti con attrezzature per pali trivellati. Durante questo lavoro vennero fatti nuovi studi più completi del terreno, prelevando diversi campioni nei vari sondaggi uno di seguito all'altro con campionatore molto sottile che, a campione estratto, veniva usato direttamente come scatola portacampione; sui campioni più caratteristici furono eseguite prove geotecniche complete nel Laboratorio Geotecnico dell'Istituto di Scienza delle Costruzioni del Politecnico di Milano (v. Fig. 4).

Il campionamento continuo si rivelò in questa occasione di importanza grandissima. Infatti senza di esso il progetto definitivo sarebbe stato sproporzionato al bisogno. Invece esaminando longitudinalmente tutti i campioni dopo averli liberati dello strato superficiale rimaneggiato, si scopersero molte stratifi-

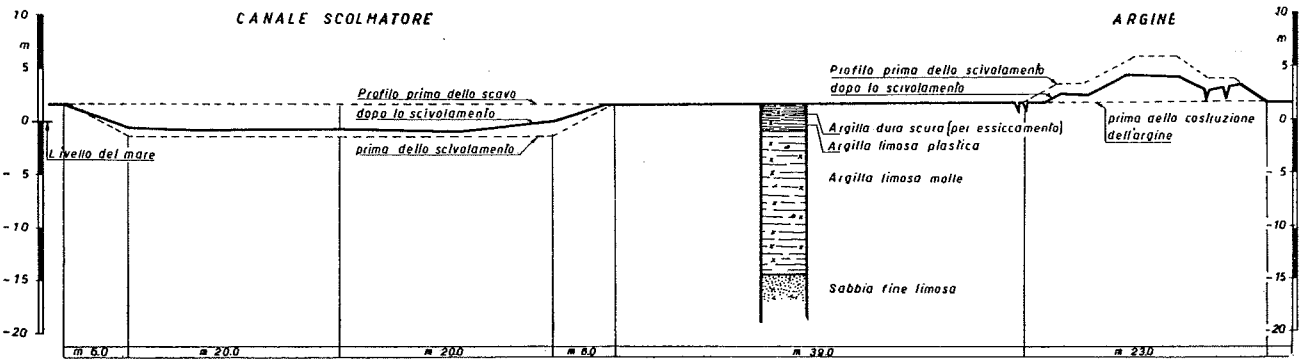


Fig. 2 - Sezione del 1° scivolamento e stratigrafia sommaria di un sondaggio

cazioni, alcune di diversi cm, altre di pochi mm di spessore, composti di sole conchiglie fini senza argilla e quindi molto permeabili. Queste stratificazioni stanno a distanza media di circa mezzo metro, almeno per la parte più importante dell'argilla molle che va da due metri circa fino a otto metri dal piano campagna, ossia da un metro a sette metri sotto il livello del mare.

Queste stratificazioni non possono evidentemente essere continue perché trovandosi così vicine avrebbero drenato rapidamente il terreno scaricando l'acqua nelle zone laterali non caricate e non sarebbero successi gli scivolamenti lamentati. Si deve trattare invece di formazioni lenticolari, ma per queste il tipo di consolidamento progettato composto con pali di sabbia è tale che o da un palo o dall'altro si può ritenere che le lenti siano captate tutte.

Il problema venne studiato in questa ipotesi sfruttando sia la permeabilità verticale tra le lenti di conchiglie supposte continue, sia la permeabilità orizzontale verso i pali di sabbia, dato che sono entrambe molto importanti.

Si seguirono per questo gli studi del BARRON (*Proceedings ASCE* vol. 113, pp. 718-754, 1948) alla luce dei quali venne interpretato il comportamento dei due campioni eseguiti.

Si trovò così che gli assestamenti misurati al centro degli argini corrispondevano molto bene a quelli calcolati con i concetti esposti supponendo la distanza tra gli strati permeabili continui uguale a m 1,60 contro m 0,50 medio nei primi otto metri ed una

distanza maggiore, ma non ben definita (per difficoltà dovute al terreno ed al sistema usato di campionamento) nel tratto più profondo da m 8 a m 16 (v. Fig. 5). È probabile che sull'aumento della distanza equivalente abbia influito, oltre ad una maggiore distanza tra le lenti più profonde anche la grande sottigliezza di alcune di esse, la cui permeabilità non era quindi più paragonabile all'infinitamente grande supposta nello schema teorico: ed altra ragione probabilmente si avrà nel fatto che non tutte le lenti piccole saranno state captate direttamente.

Sulla base di questi elementi è stato preparato il progetto definitivo, la cui esecuzione è in corso avanzato, portando i dreni (\varnothing 40 cm) a distanza di m 4,60.

La lunghezza di argine da consolidare in questo modo è di circa 10 km e l'estensione del consolidamento sia in sviluppo che in profondità venne progettata in base alle indicazioni di consistenza del terreno ricavate impiegando il penetrometro infisso dinamicamente.

Venne adottato per questo il penetrometro indicato da TERZAGHI e PECK in *Soil mechanics in engineering practice* e cioè avente \varnothing 51 mm, mazzabattente Kg 73, volata 75 cm, provvisto però di tubazione di protezione dell'asta.

Il consolidamento venne limitato al terreno nel quale il penetrometro affondava più di 30 cm per colpo (il massimo affondamento è arrivato a 105 cm per colpo, ma affondamenti di $70 \div 80$ cm erano

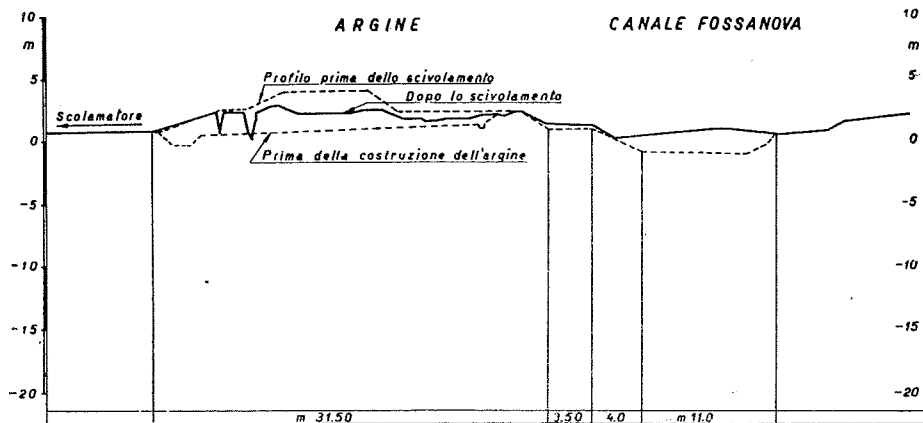


Fig. 3 - Sezione del secondo scivolamento.

molto frequenti). La massima profondità dei dreni è così risultata di 12 m da piano campagna. Le prove penetrometriche vennero fatte in genere alla distanza di 150 m l'una dall'altra, ridotta fino a 75 m in punti più delicati, e nonostante il tipo irregolare del deposito di spiaggia si dimostrarono sufficientemente indicative. Il controllo sistematico sulla natura del terreno venne invece fatto in un modo molto semplice ed economico con prelievi di terreno fatti a mano mediante sonda a vite da 8 cm. Questi prelievi, eseguiti con pochi uomini, fino alla profondità di 20 m diedero indicazioni sufficienti a chiarire e confermare i risultati delle prove penetrometriche.

Da parte sua il penetrometro dinamico è stato scelto e per la sua grande semplicità e perché era

di maglio dopo l'infissione della tubazione di protezione infiggeva la punta nel terreno ad una profondità circa doppia di quella che ottenevano i colpi successivi. I diagrammi di penetrazione sono stati disegnati in questi casi basandosi solamente sulla penetrazione del primo colpo di ogni asta.

2 - Controllo del consolidamento

Il consolidamento del terreno sotto l'argine fu seguito con piastre di livello, traguardi di linea, piezometri disposti a gruppi di tre e di cinque per ogni sezione trasversale controllata. I traguardi di linea assicurarono che in senso orizzontale non vi furono

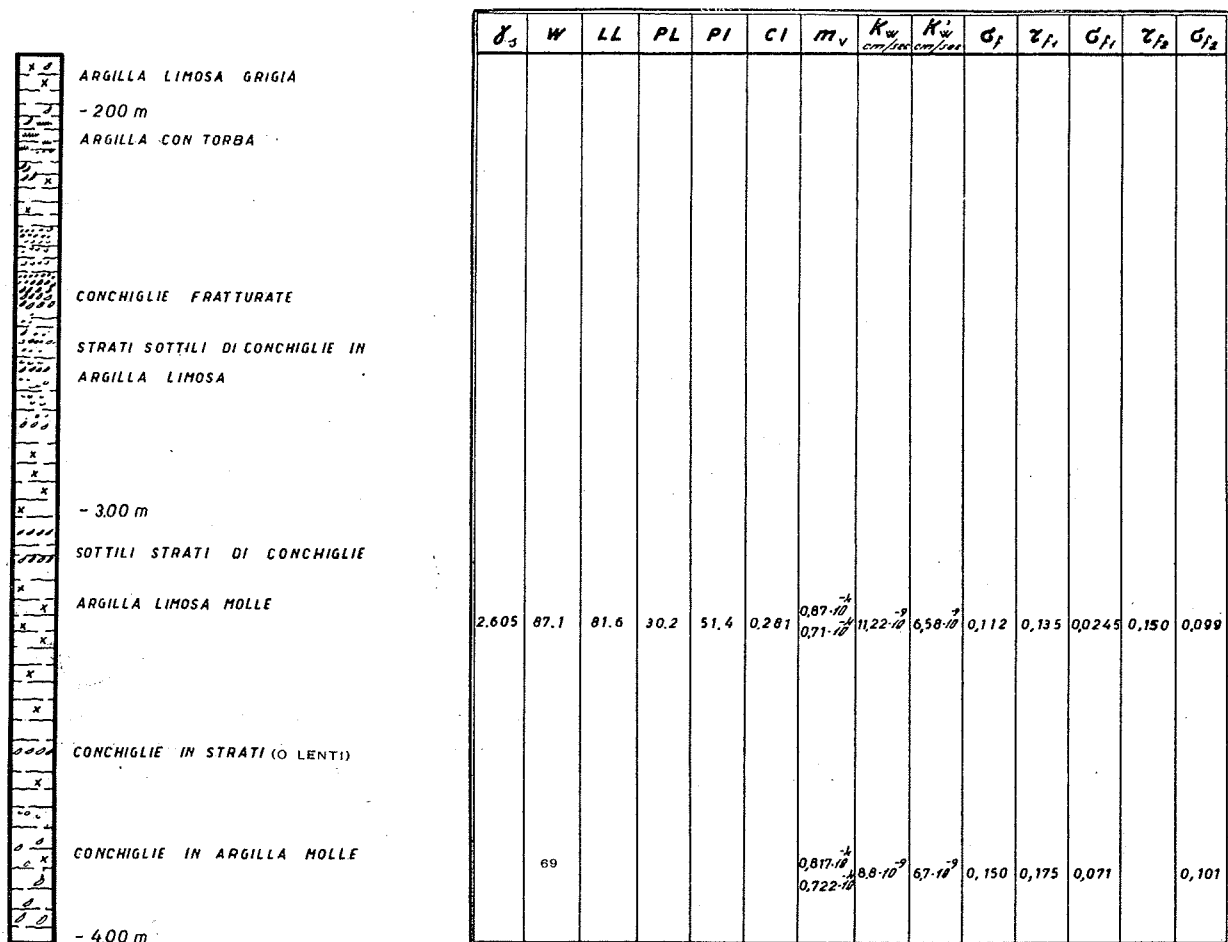


Fig. 4 - Sezione indicante la disposizione delle lenti di conchiglie nell'argilla limosa molle e le prove di laboratorio eseguite sui campioni più importanti

sufficiente un caposquadra con pochi manovali per eseguire il lavoro a mano. Si è dimostrato però di fondamentale importanza il rivestimento della tubazione perché molte volte il terreno aderiva immediatamente all'asta aumentando notevolmente la resistenza alla penetrazione. Sono qui riportati in Fig. 6 alcuni diagrammi di penetrazione dove sono indicati in ascissa i centimetri di affondamento per colpo; da essi risulta che sistematicamente il primo colpo

che movimenti di limitatissima entità. Non si ebbe alcun aiuto dall'indicazione dei piezometri perché quasi tutti furono disturbati dalla presenza di sacche di gas del sottosuolo per cui le pressioni salivano e scendevano senza alcun apparente riferimento con il proseguire del consolidamento. Il lavoro venne quindi seguito quasi esclusivamente con l'indicazione delle piastre e dei traguardi, e con l'aiuto di qualche controllo sulla variazione di consistenza del terreno,

eseguito ancora con prove penetrometriche (v. ancora Fig. 6).

Anche il metodo delle piastre presentò le sue sor-

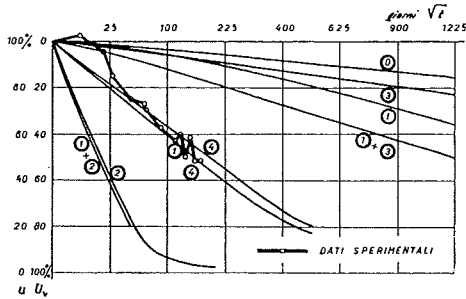


Fig. 5 - Curve di consolidamento nel tempo con diversi spessori di terreno impermeabile e confronto con gli assestamenti misurati.

- (0) Solo drenaggio verticale con spessore $2 H = 13$ m.
- (1) Solo drenaggio radiale con dreni ϕ 40 cm distanti 4 m.
- (2) Solo drenaggio verticale con $2 H = 0,5$ m.
- (3) Solo drenaggio verticale con $2 H = 9,0$ m.
- (4) Solo drenaggio verticale con $2 H = 1,6$ m.
- (1) + (2) Drenaggio radiale (1) insieme con verticale (2)
- (1) + (3) Drenaggio radiale (1) insieme con verticale (3)
- (1) + (4) Drenaggio radiale (1) insieme con verticale (4)

prese perché diverse volte si rilevarono dei sollevamenti locali inspiegabili (v. Fig. 5). Il fenomeno si presentava in quasi tutte le sezioni, ma non in tutte;

l'acqua di pioggia probabilmente scorreva più rapidamente penetrando meno in profondità e disturbando quindi meno lo scarico del gas.

Il lavoro dei dreni procede ormai da circa un paio di anni e analogamente procede anche il lavoro di formazione degli argini. Finora nessun fenomeno di scoscendimento è venuto a disturbare il lavoro, beninteso nelle zone consolidate con i pali di sabbia; al contrario in zone non drenate dove erano in corso altri lavori, gli scoscendimenti non sono mancati, ed anche di una certa importanza.

Il funzionamento dei dreni è apparso subito evidente dall'uscita di acqua dagli scarichi superiori, a proposito dei quali merita segnalazione il tipo di scarico adottato dove gli argini erano già in parte costruiti.

La distribuzione dei dreni in questi punti è stata uguale a quella attuata dove gli argini non erano ancora iniziati; è variato solamente il collegamento in superficie che mentre nel secondo caso era fatto con il normale letto di sabbia, nel primo le teste dei pali di sabbia vennero collegate a due a due, o a tre a tre, mediante un canaletto di sabbia di modeste dimensioni che scarica sui fianchi dell'argine e poté essere superiormente coperto con gli strati superiori dell'argine stesso lasciando indisturbata la sua efficacia. In ogni caso rimane un nucleo centrale non

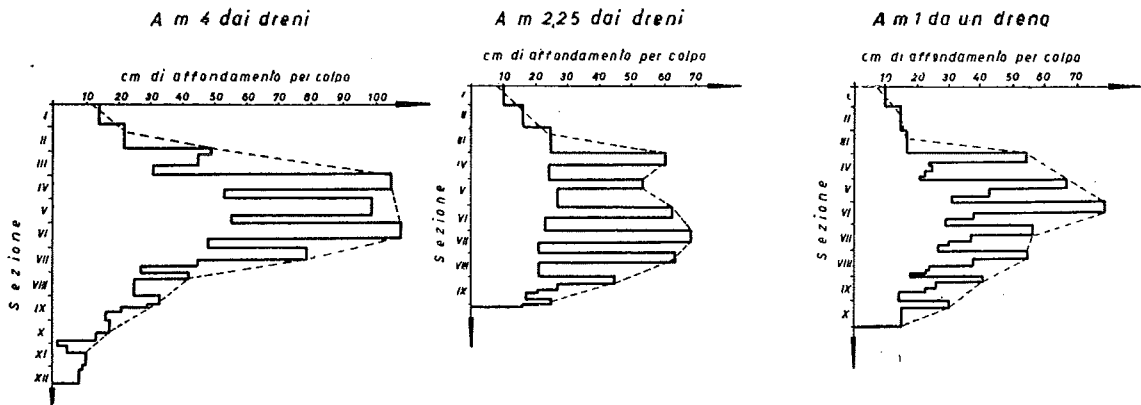


Fig. 6 - Diagrammi penetrometrici dopo 45 giorni di funzionamento dei dreni a diverse distanze degli stessi

e si è notato che avveniva sempre dopo le piogge e scompariva alla livellazione successiva fatta dopo una settimana.

Il sottoscritto attribuisce questi sollevamenti alla presenza di gas in pressione, gas già segnalato in abbondanza dai piezometri e dalle trivellazioni, che trovando chiusa dall'acqua di pioggia l'uscita all'atmosfera attraverso i minuti canaletti del terreno, aumentava la sua pressione fino a provocare il sollevamento registrato.

I punti di riferimento delle livellazioni probabilmente non risentivano di questo fenomeno o ne risentivano molto meno, perché collocati tutti lungo una scarpata di un vecchio argine ad almeno 100 m di distanza dai nuovi argini, con terreno intorno non disturbato dagli scavi e dai riporti di terra, così che

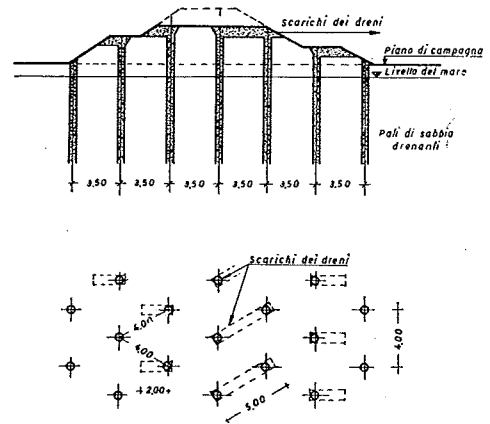


Fig. 7 - Scarico superiore dell'acqua di drenaggio quando i dreni sono stati eseguiti su argini già iniziati.

attraversato dagli strati di sabbia, nel caso di argini ancora da costruire, né dai canaletti di sabbia nel caso di argini già in parte costruiti (v. Fig. 7).

Il sottoscritto pensa che questo sistema opportunamente adattato nelle dimensioni, possa essere impiegato nel consolidamento del sottofondo di strade di grande importanza già costruite da tempo e non ancora consolidate.

3 - Conclusioni

Da quanto precede emerge ancora una volta l'importanza del campionamento continuo e dell'esame in Laboratorio dei campioni prelevati.

Nel lavoro ricordato si sono sempre prelevati campioni di dimensioni maggiori di quelle del provino da introdurre nelle macchine di prova, allo scopo di potere, dopo averlo espulso dalla scatola cilindrica che lo conserva, spogliarlo dalla patina di argilla che

lo ricopre superficialmente, mediante un semplice filo metallico sottile e teso, così da mettere bene in evidenza le stratificazioni.

Si ottiene in tal modo il risultato di scegliere con oculatezza il terreno da provare e di avere un quadro esatto della stratificazione del terreno.

Altra constatazione importante è quella dell'ottimo comportamento dei pali di sabbia in presenza di lenti di conchiglie di larghezza limitata, lenti inefficaci senza di quelli, perché una volta piene di acqua non possono scaricarla; e da ciò gli scivolamenti lamentati.

Con i pali di sabbia tutto il materiale drenante poté essere sfruttato praticamente in pieno.

Degno di nota è anche il modo di funzionare del penetrometro in terreni molto molli. Si arriva a concludere che con questi terreni ad ogni colpo di penetrazione deve seguire la tubazione di protezione dell'asta per evitare che il terreno, chiudendosi intorno ad essa, falsi i risultati della prova.

Milano 30 giugno 1956.

SOMMAIRE: On donne renseignement des critères adoptés dans la projection et dans la construction d'une importante ouvrage de consolidation de sols tendres avec drainage. On remarque l'importance technique et économique des diligents prélèvements d'échantillons et de l'employ correct de l'appareil pénétromètre soit dans la phase de la projection que dans quelle de l'exécution de l'ouvrage.

SUMMARY: The paper illustrates the principles adopted in the planning and construction of an important soil consolidation work by the execution of drains, stressing the technical-economical importance which the continuous soil samplings and an appropriate use of the penetrometer had during the designing and execution of the work.