

Consolidamento meccanico dei terreni argillosi

G. CALABRESI*

SOMMARIO: Contributo alla Relazione Generale sul tema: « Miglioramento delle caratteristiche dei terreni: risultati e prospettive sotto l'aspetto teorico, esecutivo ed economico ». X Convegno di Geotecnica, Bari, 26-27 ottobre 1970.

Nei problemi di fondazione in terreni argillosi, le condizioni che consentono di assumere una posizione attiva nei confronti del terreno non si presentano frequentemente. Nella generalità dei casi si progetta l'opera e si prevede il suo comportamento, in funzione delle caratteristiche meccaniche dei terreni, mentre solo raramente è possibile agire su queste, per modificare condizioni ambientali sfavorevoli.

Un intervento che modifichi le caratteristiche di un terreno argilloso in stretta relazione al progetto e alle modalità costruttive di un'opera, si può definire consolidamento. In questo senso il termine assume un significato più preciso di un generico miglioramento delle proprietà meccaniche del terreno.

Oggi sappiamo, soprattutto per merito della intensa attività di ricerca sperimentale degli ultimi dieci-quindici anni, che per ogni terreno argilloso esiste una definita relazione tra il contenuto in acqua (o l'indice di porosità), le tensioni efficaci applicate, quelle di consolidazione, la resistenza a rottura e la deformabilità. Questi due ultimi parametri delle caratteristiche meccaniche di un terreno sono, come è noto, strettamente legati: l'aumento di resistenza al taglio si accompagna a una diminuzione della deformabilità, drenata e non drenata e viceversa (fig. 1).

In un problema di consolidamento del terreno si può avere come fine l'aumento della sua resistenza per aumentare la stabilità dell'opera, ovvero la diminuzione della deformabilità, per migliorare il comportamento dell'opera nel tempo: in realtà i due effetti sono inscindibili e i mezzi per conseguirli gli stessi.

Il consolidamento viene tuttavia progettato in relazione all'uno o all'altro dei due effetti, in quanto determinante nel problema che si studia.

* Prof. ing. Giovanni CALABRESI, Assistente ordinario alla Cattedra di *Tecnica delle Costruzioni I* della Facoltà di Ingegneria, Università di Roma.

Per questi motivi il consolidamento di un terreno argilloso deve essere inteso come un ben definito intervento progettuale.

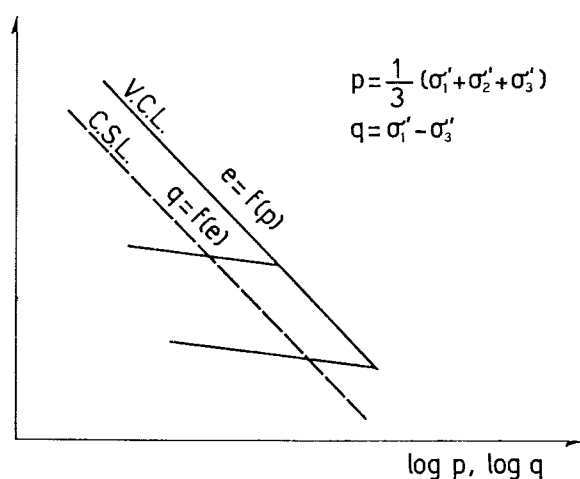


Fig. 1. - Relazioni tra indice di porosità, stato di consolidazione idrostatica (linea VCL) e stato critico (linea CSL), per una argilla normalmente consolidata.

Consolidamenti per aumentare la resistenza del terreno trovano applicazione nei casi in cui è necessario operare sul grado di sicurezza a breve termine, durante, o immediatamente dopo, la costruzione di un'opera che dia luogo a un incremento delle tensioni nel terreno.

A questo incremento corrisponde naturalmente un aumento della resistenza, che però, come è ben noto, si sviluppa nel tempo, man mano che le sovrappressioni interstiziali si vanno dissipando, con una velocità dipendente sia dalle caratteristiche meccaniche del terreno, che da quelle geometriche del problema. Questa velocità in relazione ai tempi economici di costruzione può non essere sufficiente ad assicurare in ogni momento della costruzione un determinato rapporto tra carichi applicati e resistenza del terreno; o, in altri termini, il richiesto coefficiente di sicurezza.

In questo caso l'intervento di consolidamento può tendere o ad aumentare la resistenza iniziale del terreno, con un'azione preventiva, o ad aumentare la velocità di incremento della resistenza, in relazione a quella di applicazione dei carichi. La terza soluzione, cioè la subordinazione dei tempi di costruzione alla velocità di incremento della resistenza, non rientra ovviamente nel nostro tema, ma costituisce un esempio di atteggiamento passivo nei confronti del terreno di fondazione, che spesso, comunque, è il solo possibile.

La resistenza iniziale del terreno si può aumentare con una precompressione, che anticipi, in parte o in tutto, gli effetti degli incrementi di tensione, ma in condizioni di sollecitazione che non diano luogo a fenomeni di instabilità.

La velocità di incremento della resistenza viene invece aumentata modificando le condizioni geometriche che determinano la dissipazione delle pressioni interstiziali, per esempio con un sistema di dreni in sabbia.

Una delle maggiori difficoltà di questo tipo di problemi sta forse nella valutazione della resistenza iniziale del terreno; e non soltanto nel caso di terreni disomogenei. Infatti le ricerche effettuate in questo campo negli ultimi anni hanno messo in luce come la resistenza delle argille naturali sia influenzata dalle condizioni di sollecitazione.

Si è constatato che la coesione non drenata c_u dipende dalla direzione delle tensioni principali e dalle modalità di determinazione sperimentale. Ciò è dovuto quasi esclusivamente al diverso valore della pressione interstiziale prodotta, nei diversi casi, dall'applicazione delle forze esterne.

Più sinteticamente si può dire che le argille mediamente o poco consistenti, sono in generale, isotrope rispetto ai parametri di resistenza in termini di tensioni efficaci c' e φ' , ma anisotrope rispetto alla resistenza in termini di tensioni totali c_u .

Pertanto anche nelle condizioni ideali rappresentate da un terreno di fondazione omogeneo, le verifiche di stabilità a breve termine divengono spesso aleatorie.

Interventi di consolidamento relativi alla deformabilità del terreno trovano applicazione quando si voglia migliorare il comportamento di una opera fondata su terreni argillosi molto compressibili, successivamente alla costruzione. Comunemente il consolidamento ha lo scopo di anticipare la massima parte dei cedimenti al periodo in cui l'opera è in grado di adattarsi o di subire interventi correttivi, ovvero di assogget-

tare il terreno di fondazione a un ciclo di carico e scarico, al termine del quale avrà conseguito le proprietà meccaniche di un'argilla sovraconsolidata, in particolare una minore compressibilità.

Il tempo necessario per produrre gli effetti valutati, che dipende dalla velocità di dissipazione delle pressioni interstiziali, gioca evidentemente un ruolo essenziale. Le caratteristiche del terreno, la situazione stratigrafica e le esigenze costruttive possono rendere necessaria la modifica delle condizioni di drenaggio naturale, la cui analisi costituisce la maggiore difficoltà di questo tipo di problemi.

Queste considerazioni suggeriscono l'opportunità di inquadrare in un unico contesto le numerose applicazioni dei metodi di consolidamento, facendo riferimento all'unicità delle leggi che esprimono il comportamento meccanico delle argille e degli effetti prodotti.

In definitiva, il consolidamento meccanico delle argille consiste nel presollecitare il terreno, per ottenere una diminuzione dell'indice di porosità, cui conseguono una maggiore resistenza e una minore compressibilità, o nell'accelerare questo fenomeno, prodotto di per sé dalla graduale applicazione del carico della costruzione, o nell'insieme di questi due provvedimenti. In quanto ai mezzi pratici di intervento, essi sono essenzialmente due: l'applicazione di un carico e i dreni in sabbia.

Le più frequenti applicazioni dei dreni in sabbia si hanno nelle fondazioni delle opere in terra. Dighe e rilevati stradali di notevole altezza posti su terreni argillosi, poco consistenti, pongono soprattutto il problema di assicurare, durante la costruzione, un adeguato coefficiente di sicurezza alla rottura del terreno di fondazione, senza rallentare le fasi esecutive. Nel caso, invece, di rilevati stradali e aeroportuali di modesta altezza, ma fondati su terreni eccezionalmente molli e compressibili, si ha soprattutto la necessità di accelerare i cedimenti, in modo che si producano nel periodo di costruzione, prima della posa delle sovrastrutture, quando è ancora possibile correggere le inevitabili disuniformità. In questi casi la precompressione si può affiancare ai dreni in sabbia. Quando le caratteristiche dei terreni, la situazione stratigrafica e il tempo a disposizione lo consentono, la precompressione può essere utilizzata, invece, senza dreni.

Tipico impiego della precompressione è anche il consolidamento di terreni di fondazione di edifici, di grandi serbatoi e di stabilimenti industriali, soprattutto nelle aree di colmata.

In Italia, l'impiego dei metodi di consolidamento meccanico delle argille sembra essersi dilatato rapidamente negli ultimi anni. Le aree in cui possono verificarsi le condizioni di ricorrere a questi mezzi sono facilmente individuabili e generalmente ristrette. Si tratta di antichi alvei di fiumi riempiti da depositi recenti, limo-argillosi, spesso ricchi di sostanze organiche e bacini lacustri e palustri, antichi ed attuali.

Si può comunque dire che in Italia i problemi di consolidamento delle argille sono generalmente caratterizzati da una limitata estensione delle aree, ma da notevoli difficoltà geotecniche. Al contrario la maggior parte dell'esperienza in questo campo ci viene da paesi come gli Stati Uniti, il Canada, la Scandinavia, la Gran Bretagna e la Russia, dove le condizioni che richiedono l'impiego dei metodi di consolidamento si presentano su aree estese, ma in genere caratterizzate da una maggiore uniformità dei terreni.

Sembra perciò utile, dopo questa premessa, discutere in maggior dettaglio, anzitutto, le caratteristiche delle argille che ne determinano il comportamento in relazione all'impiego dei metodi di consolidamento, in modo che sia possibile inquadrare e correlare le esperienze effettuate su materiali diversi e interpretarne i risultati, spesso contrastanti, e, successivamente, il modo di agire della precompressione e dei dreni in sabbia e gli effetti delle varie tecniche operative sul comportamento dei terreni.

Considerato il modo di agire dei metodi di consolidamento si dovrebbe concludere che le caratteristiche di un terreno argilloso rilevanti al fine di stabilire se, e in che misura, esso è suscettibile di un intervento sono soltanto due: la pendenza della curva che esprime la relazione tra indice di porosità e pressione (fig. 1), in corrispondenza della pressione esistente, in quanto indica l'entità dell'effetto prodotto da un incremento di tensioni; e la permeabilità, perché influenza direttamente la durata dei fenomeni di dissipazione.

Quanto meno la curva di compressibilità è inclinata (per la presenza nel terreno di sensibili componenti limo-sabbiose o per effetto di sovraconsolidazione) tanto minori sono le deformazioni e gli incrementi di resistenza prodotti da una variazione delle tensioni applicate e, quindi, tanto minore è il rendimento di una precompressione.

Analogamente, tanto maggiore è la permeabilità tanto più rapide sono di per sé la dissipazione delle pressioni interstiziali e la variazione dell'indice di porosità e, perciò, tanto meno utile l'impiego di mezzi artificiali per accelerarle, co-

me i dreni in sabbia. Tutto ciò è ovvio e non vale la pena di soffermarvisi. I problemi sorgono, invece, quando si esamina più approfonditamente il comportamento di quei terreni che, alla luce delle semplici considerazioni precedenti, suggerirebbero l'utilizzazione di un metodo di consolidamento. Sappiamo, infatti, che ogni materiale naturale, a seconda delle sue particolarità macro e microstrutturali si discosta in maggiore o minor misura dal modello meccanico cui, per semplicità, facciamo riferimento. In tutte le argille la microstruttura, formata durante la deposizione, è una costruzione delicata in cui sono spesso presenti elementi instabili. Le deformazioni prodotte da azioni meccaniche esterne, quando superano una certa soglia, che peraltro, ha un valore significativo solo nelle argille sovraconsolidate, danno luogo ad un riassetto strutturale, caratterizzato da locali collassi, con distruzione delle strutture originarie.

A livello microscopico questi fenomeni sono soltanto descrivibili qualitativamente: macroscopicamente possono invece essere osservati e misurati. Si manifestano come un aumento di pressione interstiziale, cui consegue immediatamente una caduta della resistenza non drenata e, successivamente, man mano che le sovrappressioni si dissipano, una diminuzione di volume. La caduta di resistenza prodotta da una distruzione della struttura originaria dell'argilla è detta sensibilità, e viene espressa come rapporto tra le resistenze del materiale indisturbato e rimaneggiato. Nelle argille italiane la sensibilità è scarsa: generalmente, inferiore a 2, e raramente dell'ordine di $4 \div 6$.

Le alterazioni della microstruttura hanno evidentemente influenza, ma in minor misura, anche sulla permeabilità. In generale, nelle prove edometriche si rileva una variazione più accentuata del coefficiente di consolidazione nell'intorno della pressione di preconsolidazione.

Da lente alterazioni strutturali, e in particolare da collassi che avvengono localmente, per effetto di carichi agenti per tempi molto lunghi, dipende un altro aspetto delle caratteristiche meccaniche delle argille determinante al fine dei problemi di consolidamento: il creep e la consolidazione secondaria.

Nonostante gli sforzi compiuti in questo campo di ricerca in tanti anni, dobbiamo riconoscere che questi fenomeni, chiariti sufficientemente nel meccanismo e nelle cause, sfuggono ancora ad una precisa definizione quantitativa. Allo stato attuale, infatti, pochi punti sembrano accertati sicuramente.

L'effetto di consolidazione secondaria è maggiore nelle argille normalmente consolidate, che in quelle, anche leggermente, sovraconsolidate.

È anche fortemente influenzato dalla presenza, nelle argille, di sostanze organiche: le torbe presentano effetti secondari così vistosi da rendere inapplicabili le classiche teorie della consolidazione.

Quanto maggiori sono le tensioni tangenziali, tanto maggiore è la consolidazione secondaria.

In prima approssimazione e in condizioni di sola deformazione assiale, i cedimenti sono proporzionali al logaritmo del tempo, così che la deformazione unitaria che si ha in un ciclo logaritmico C_α (da $t = t_1$ a $t = 10 t_1$) può essere assunta come misura dell'effetto secondario ed utilizzata per l'estrapolazione (fig. 2). Questa legge non ha comunque una validità generale, essendo il fenomeno fortemente influenzato, e in modo poco chiaro, da una quantità di fattori difficilmente controllabili e soprattutto dal rapporto tra il carico applicato e quello di preconsolidazione.

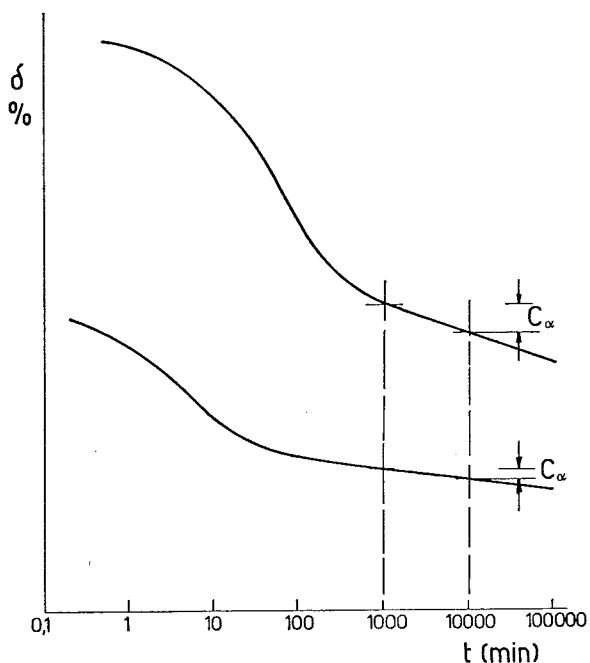


Fig. 2. - Consolidazione secondaria: definizione del coefficiente C_α .

Per quanto riguarda i caratteri macrostrutturali dei terreni, le superfici di discontinuità (giunti, fessure), hanno soprattutto importanza nelle argille consistenti, delle quali influenzano fortemente la resistenza. Nei terreni argillosi poco consistenti e fortemente compressibili, per i quali si può presentare l'opportunità di operare un

consolidamento, assumono particolare importanza le disomogeneità, di origine e natura diverse; come nelle argille a varve, in quelle palustri, ricche di fibre vegetali, in quelle di deposito alluvionale, nelle quali sono frequenti sottili strati sabbiosi.

In questi materiali la determinazione della resistenza è spesso problematica, o addirittura impossibile, mentre i valori della permeabilità e del coefficiente di consolidazione da attribuire al terreno nel suo complesso divengono del tutto incerti. È perciò difficile valutare, anche solo approssimativamente, i tempi di consolidazione e stabilire se l'impiego dei dreni in sabbia sia utile.

L'osservazione minuziosa, il campionamento continuo (per esempio col campionatore Kjellman), il prelievo e l'esame di grossi blocchi di materiale sono mezzi molto efficaci per stabilire la presenza e l'importanza di queste particolarità microscopiche, ma molto spesso non sono sufficienti.

Le prove in vera grandezza mediante rilevati sperimentali e una sistematica disposizione di strumenti di misura in sito divengono allora indispensabili.

La complessità delle caratteristiche delle argille e la difficoltà di valutare il loro comportamento non devono però condurre a generiche conclusioni negative sui metodi di consolidamento meccanico e sulla possibilità di una loro corretta progettazione. Se è vero che in alcuni casi la permeabilità *in grande* del terreno e la velocità di dissipazione delle pressioni interstiziali si sono rilevate molto maggiori di quelle previste in base alle indagini di progetto, così che l'impiego di dreni in sabbia si è dimostrato superfluo, è anche vero che generalmente queste differenze non risultano tanto grandi da spostare la convenienza di una scelta, e finiscono per rappresentare un utile margine di sicurezza.

Si deve anche osservare che quanto più le disomogeneità del terreno aumentandone la permeabilità riducono la convenienza dell'impiego dei dreni in sabbia, tanto più aumenta il rendimento e la convenienza della precompressione.

In conclusione lo studio di un problema di consolidamento, per ridurre al minimo le probabilità di insuccesso, richiede una approfondita indagine sulle caratteristiche delle argille, che chiarisca sufficientemente i seguenti punti:

— Resistenza non drenata: influenza sui risultati sperimentali dei diversi metodi di prova e, particolarmente, delle diverse condizioni di sollecitazione. Sensibilità al rimaneggiamento. (Poiché le resistenze dei terreni che intervengono in

questi problemi sono sempre modeste, la determinazione in sito con il vane test (scissometro) acquista un particolare interesse).

— Compressibilità, permeabilità e coefficiente di consolidazione: influenza delle direzioni di sollecitazione, valore del carico di preconsolidazione, forma della curva di compressibilità all'intorno di questo, variazione della permeabilità con la pressione applicata. I campioni dovrebbero essere i più grandi possibili e comunque effettivamente rappresentativi del terreno; gli incrementi di carico piccoli e applicati senza urti.

— Entità della consolidazione secondaria, in prove di lunga durata.

Diversi fattori ambientali devono poi essere presi in considerazione nello studio del consolidamento di terreni argillosi: l'indagine deve necessariamente allargarsi dalle caratteristiche fisicomeccaniche delle argille agli aspetti geologici del problema.

La geologia della zona, l'origine e la storia dei sedimenti, la tipologia dei terreni, la successione stratigrafica hanno in questo campo importanza maggiore che in altri problemi geotecnici, e la loro acquisizione è generalmente molto più utile che la moltiplicazione delle prove geotecniche.

È ben noto che i tempi di consolidazione di uno strato argilloso, compreso tra due superfici drenanti, sono proporzionali al quadrato dello spessore dello strato. Generalmente il primo problema che sorge nello studio di un consolidamento è la determinazione della esistenza e della posizione di superfici drenanti, e quindi l'individuazione di eventuali intercalazioni sabbiose all'interno di strati argillosi. Con un'accurata indagine geotecnica è possibile rilevare livelli sabbiosi anche sottili, lungo le verticali esplorate. La loro influenza sulla velocità di consolidazione è però strettamente condizionata dalla loro continuità orizzontale. Una lente sabbiosa chiusa all'interno di una massa argillosa produce evidentemente solo una compensazione delle pressioni interstiziali, e non ha influenza sulla loro velocità di dissipazione. Uno studio approfondito dell'origine del terreno e dell'ambiente di deposizione può fornire indicazioni essenziali sulla probabile estensione delle intercalazioni sabbiose.

Risulta comunque sempre utile, in questi casi, una impostazione probabilistica del problema, tenendo conto delle dimensioni delle aree caricate. È evidente che quanto più le superfici caricate sono estese, tanto più diviene improbabile o inefficace la presenza di intercalazioni sabbiose continue.

Nel caso di rilevati molto estesi, come quelli

per piste aeroportuali o per terrazzamenti per impianti industriali, le superfici naturali di drenaggio possono ugualmente assumere una notevole importanza. Esse consentono infatti di ridurre i tempi di consolidazione senza ricorrere a una rete di dreni in sabbia, con l'impiego di pozzi di scarico, che le pongano in comunicazione con l'esterno.

Constatati i vantaggi prodotti dalle intercalazioni sabbiose, occorre segnalare alcuni possibili inconvenienti. In particolari situazioni stratigrafiche, e quando il terreno venga fortemente sollecitato, per esempio dalla costruzione di un alto rilevato, le pressioni interstiziali all'interno di lenti e intercalazioni sabbiose possono raggiungere valori talmente elevati da rendere la resistenza di queste inferiore a quella della massa argillosa e produrre la rottura del terreno. Anche in questo caso può essere risolutivo l'impiego di pozzi di scarico.

Molte difficoltà e incertezze nella soluzione di questi problemi possono comunque essere superate con accurate indagini in sito. L'esperienza, anzi, le fa ritenere indispensabili in ogni progetto di una certa importanza, purché esse vengano condotte in modo da rilevare non solo gli effetti esterni e macroscopici del comportamento del terreno, come le deformazioni superficiali, ma anche le cause e la natura dei fenomeni attraverso misure delle deformazioni in profondità, delle pressioni interstiziali e del loro andamento nel tempo.

Passando ora a considerare le tecnologie e, in generale, i problemi progettuali ed esecutivi dei singoli interventi, diviene necessario restringere l'esame agli aspetti essenziali e di maggiore interesse.

La precompressione viene comunemente realizzata mediante un rilevato, benché siano stati proposti, e talvolta attuati, metodi diversi. Tra questi, il più semplice ed interessante è l'abbassamento della superficie piezometrica, che ha però l'inconveniente di dar luogo a un diagramma di pressioni crescenti linearmente con la profondità, di limitato rendimento nella generalità dei casi (fig. 3).

Il rilevato permette di realizzare la distribuzione superficiale dei carichi più efficace per ciascun problema, ovviamente nei limiti posti dalla stabilità del terreno.

Una distribuzione uniforme su aree estese rappresenta in generale la soluzione migliore, perché gli sforzi tangenziali indotti nel terreno non sono elevati e le tensioni principali mantengono la direzione preesistente. In queste condizioni si ridu-

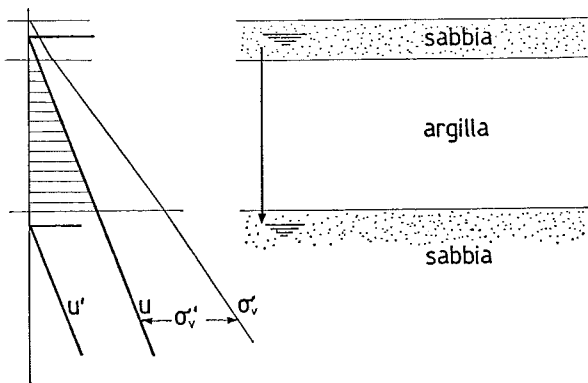


Fig. 3. - Precompressione prodotta dalla depressione della superficie piezometrica.

ce al minimo il disturbo strutturale del terreno e, di conseguenza, gli effetti negativi, prima ricordati, relativamente alla resistenza iniziale e alla consolidazione secondaria.

Rilevati su aree ristrette possono però divenire più convenienti quando si voglia sfruttare una maggiore permeabilità orizzontale del terreno e la presenza di superfici naturali di drenaggio, o accelerare il consolidamento di aree critiche, come quelle ai bordi della superficie di carico definitiva.

Per discutere il problema fondamentale della progettazione dell'intervento, cioè la definizione dell'intensità e della durata della precompressione, conviene far riferimento a un problema tipico; le conclusioni si possono facilmente estendere a situazioni diverse (fig. 4).

Si consideri il caso dell'impiego della precompressione per ridurre o eliminare i cedimenti futuri di un rilevato molto esteso, da costruire su un terreno in cui sia presente uno strato argilloso molto compressibile. Il consolidamento consisterà allora nell'applicare sulla stessa area e

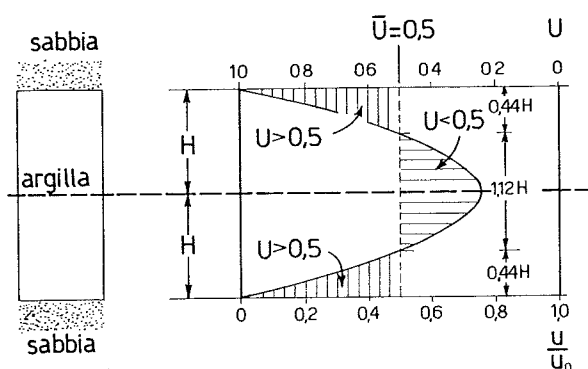


Fig. 4. - Precompressione di uno strato argilloso. Diagramma delle pressioni interstiziali u in corrispondenza di un grado di consolidazione medio $\bar{U} = 0,5$.

per un determinato tempo, un carico maggiore di quello definitivo.

Il carico in eccesso viene evidentemente rimosso prima che lo strato compressibile sia completamente consolidato rispetto alla somma del carico definitivo e del sovraccarico: in questo punto, anzi, sta la ragione dell'intervento.

Al momento di rimuovere il sovraccarico il grado di consolidazione all'interno dello strato compressibile non è però uniforme. Le zone vicine alle superfici drenanti avranno un grado di consolidazione superiore a quello medio, mentre nella parte centrale dello strato si verifica la situazione opposta. In altri termini, le pressioni interstiziali indotte dall'applicazione del carico definitivo più il sovraccarico si saranno totalmente dissipate nelle zone estreme dello strato e in minima parte al centro.

L'entità e la durata del sovraccarico vengono talvolta stabilite in base al grado di consolidazione medio. In altri termini, si asporta il sovraccarico al momento in cui lo strato compressibile ha raggiunto il cedimento che si avrebbe, a completa consolidazione, con il solo carico permanente.

In tal caso al momento dell'asportazione del sovraccarico le parti estreme dello strato risultano sovraconsolidate rispetto al carico definitivo, e quindi tendono a rigonfiare, mentre la parte centrale non è totalmente consolidata e continua a contrarsi.

I due effetti si compenserebbero soltanto se i moduli di rigonfiamento e di compressibilità fossero uguali. Poiché normalmente il primo è molto maggiore del secondo, i cedimenti residui dopo l'asportazione del sovraccarico non sono trascurabili.

Se al contrario, come criterio di progetto, si fa riferimento al grado di consolidazione minimo, alla rimozione del sovraccarico non resteranno sovrappressioni interstiziali, né cedimenti residui. Per ottenere ciò è necessario che la pressione interstiziale dissipata al centro dello strato compressibile, durante il periodo di precompressione, sia uguale al sovraccarico rimosso.

Questo criterio è in generale consigliabile e sono stati anche elaborati diagrammi e tabelle che ne facilitano l'applicazione. Esso può sembrare alquanto conservativo o eccessivamente prudente, ma il giudizio si modifica se si prendono in considerazione i cedimenti secondari.

Nell'impiego corrente della precompressione si tende ad eliminare completamente i soli cedimenti per consolidazione primaria e si ammette che nella vita successiva dell'opera (per esempio, nel caso di un rilevato stradale, dopo la rimozione

del sovraccarico e la costruzione della sovrastruttura) si verifichi ancora un certo cedimento per effetto secondario. Può accadere, tuttavia, che questo abbia una tale importanza da non poter essere tollerato.

Si è detto che l'attuale stato delle conoscenze in questo campo non consente di stabilire analiticamente l'entità dei cedimenti secondari, né, quindi, di progettare i provvedimenti necessari per evitarli. L'ipotesi che il cedimento secondario abbia nel tempo un andamento esponenziale non è sufficientemente provata e sembra ottimistico fondarvi un criterio di progetto della precompressione.

È stato però accertato, sia in esperienze di laboratorio, sia in sito, con l'osservazione del comportamento delle opere, che la precompressione riduce sensibilmente l'entità della consolidazione secondaria.

Una, almeno, delle cause di questo vantaggioso effetto può essere individuata esaminando la variazione dello stato tensionale del terreno prodotta dalla precompressione.

È noto, infatti, che il rapporto tra le tensioni efficaci orizzontale e verticale in sito, in assenza di deformazioni orizzontali (il cosiddetto coefficiente k_0), è sensibilmente inferiore all'unità, e circa pari a $1 - \sin \varphi'$ in un'argilla normalmente consolidata, ma aumenta notevolmente in un ciclo di rigonfiamento, quando l'argilla è sovraconsolidata (fig. 5).

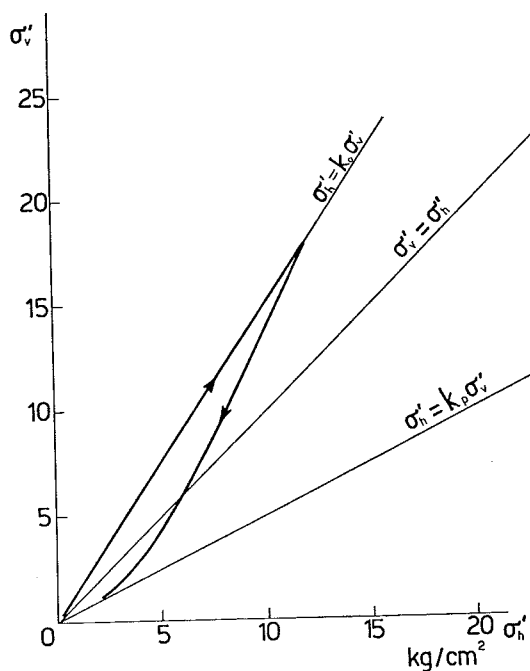


Fig. 5. - Relazione tra le tensioni efficaci orizzontale e verticale, in assenza di deformazioni orizzontali.

Perciò, mentre durante la precompressione il rapporto tra le tensioni orizzontale e verticale si mantiene uguale al valore preesistente, nella consolidazione naturale del terreno, dopo l'asportazione del sovraccarico questo rapporto aumenta, causando una diminuzione delle tensioni tangenziali massime e della consolidazione secondaria, che da queste, si è già detto, è sensibilmente influenzata.

In complesso, sugli effetti vantaggiosi della precompressione, come sulle limitazioni e i possibili inconvenienti, non sussistono attualmente grandi divergenze di vedute.

Molto controverse sono, invece, le opinioni, come a tutti è ben noto, sull'efficacia dei dreni in sabbia. Forse non c'è nessun argomento di geotecnica che abbia dato luogo a tante, e così accese, polemiche.

La proposta di realizzare un sistema di dreni verticali in sabbia per accelerare la consolidazione di un terreno argilloso fu avanzata per la prima volta da MORAN [1925]. La prima applicazione pratica venne dopo lunghi studi quasi dieci anni dopo, nel 1934, per consolidare il terreno di appoggio di uno dei rilevati di accesso al Bay Bridge, a S. Francisco. Dopo i primi risultati positivi l'impiego dei dreni in sabbia si diffuse rapidamente negli Stati Uniti e in Europa, e ora può dirsi che di questo mezzo sia stato fatto uso, ed abuso, dovunque.

La prima trattazione teorica sui dreni in sabbia è dovuta a BARRON, che la sviluppò tra il '40 e il '42, basandosi sulla teoria della consolidazione di TERZAGHI, ed è tuttora largamente impiegata.

Alle relazioni tra l'efficienza dei dreni e le caratteristiche dei terreni, fu posta attenzione, invece, solo molto più tardi, praticamente a cominciare dal 1958 ad opera prima dello stesso MORAN e successivamente di ROWE.

Il concetto al quale si ispira questo metodo di consolidamento è semplice e ben noto. I dreni verticali hanno lo scopo di abbreviare la distanza di drenaggio, cioè il percorso massimo che l'acqua deve compiere, sotto l'effetto delle pressioni interstiziali indotte dai carichi. A parità di pressioni si ottengono perciò gradienti maggiori, cui corrispondono maggiori velocità di deflusso dell'acqua, e quindi di dissipazione delle pressioni interstiziali.

I fondamenti teorici del metodo non pongono problemi: i criteri di progetto, tenuto conto delle differenze geometriche, sono gli stessi della precompressione e la loro applicazione è facilitata da abachi e tabelle. Le dimensioni della

maglia del dreno costituiscono una variabile in più a disposizione del progettista.

Le controversie sorgono invece nella valutazione degli effetti parassiti prodotti nel terreno dalla esecuzione dei dreni, a seconda delle modalità seguite, effetti che possono compromettere l'efficienza del metodo o produrre inconvenienti maggiori dei vantaggi. È quindi il problema tecnologico che alimenta le discussioni e le polemiche. Ciò considerato, per non allargare eccessivamente il discorso è preferibile esaminare solo questo aspetto della questione, con riferimento ai più diffusi metodi esecutivi. Del resto, il punto della situazione sui dreni in sabbia è stato presentato di recente in una ampia relazione da JOHNSON [1970].

I dreni in sabbia, come i pali di fondazione, possono essere eseguiti con o senza asportazione del terreno. Le tecniche esecutive che più si sono diffuse, soprattutto per motivi economici, sono l'infissione, la perforazione idraulica, e, in minor misura, la perforazione con benne o con trivelle. La perforazione idraulica si è imposta recentemente soprattutto in Olanda.

Queste tecniche hanno evidentemente caratteristiche opposte: l'infissione avviene senza asportazione di terreno, e può essere impiegata anche per dreni molto piccoli, di 8-10 cm. di diametro; la perforazione idraulica asporta il terreno e richiede diametri maggiori.

Il disturbo del terreno e gli effetti che ne derivano sono certamente influenzati dalla tecnica esecutiva. In realtà qualsiasi operazione nel sottosuolo produce necessariamente un disturbo del terreno. Il problema sta nell'esaminare i singoli effetti prodotti e nel valutarne l'intensità in relazione alle caratteristiche di ogni terreno.

Dal punto di vista della pratica esecutiva i dreni effettuati senza asportazione di terreno presentano molti vantaggi tra cui una maggiore garanzia delle continuità del dreno e una migliore pulizia nel lavoro.

I dreni perforati idraulicamente, col metodo detto « jetting », divengono più convenienti per la rapidità di esecuzione e la maggiore leggerezza delle macchine, quando sia disponibile una grande quantità di acqua per l'evacuazione dei fanghi.

I possibili disturbi causati al terreno e gli effetti sull'efficienza del metodo, sono i punti più difficili da chiarire. Essi possono, comunque, essere ordinati in una classifica di carattere indicativo.

— Effetto « smear » o di spalmatura dell'argilla sulla parete del foro: diminuisce la permeabilità orizzontale del terreno, chiudendo le fessure

e le eventuali sottili stratificazioni di sabbia. Può essere causato, in maggiore o minor misura, da qualsiasi metodo di posa in opera dei dreni. È naturalmente maggiore per i metodi in cui si ha scorrimento di un tubo forma o del dreno rispetto al terreno.

— Spostamento e rimaneggiamento del terreno: gli effetti sono quelli di un disturbo della struttura delle argille; essi sono tanto meno sensibili quanto maggiore è l'incremento del carico che successivamente verrà applicato.

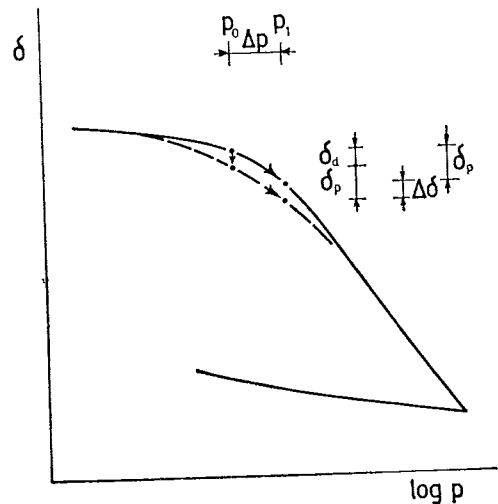


Fig. 6. - Effetto del disturbo sulla compressibilità di una argilla: l'incremento di cedimento $\Delta\delta$, causato dal disturbo diminuisce con l'aumentare dell'incremento Δp della pressione applicata.

Confrontando, infatti, le curve di compressibilità di due campioni di uno stesso terreno argilloso, preconsolidato naturalmente, un campione perfettamente indisturbato e l'altro leggermente rimaneggiato (fig. 6), si constata che le curve si discostano sensibilmente all'intorno della pressione di preconsolidazione, dove il campione rimaneggiato denota, com'è noto, una maggiore compressibilità. Con l'ulteriore aumento della pressione le due curve tendono a sovrapporsi nuovamente e l'effetto del disturbo viene pertanto riassorbito.

I dreni infissi danno luogo evidentemente al massimo disturbo con lo spostamento orizzontale prodotto. I dreni eseguiti idraulicamente possono dar luogo a un leggero spostamento verso l'interno, con rilassamento del terreno circostante.

— Distorsione di sottili strati di sabbia. Può dar luogo a notevoli inconvenienti, riducendo for-

temente la permeabilità orizzontale in alcuni tipi di argille, come quelle a varve. È prodotta dalla infissione dei dreni senza asportazione di terreno.

— Formazione di un film di fanghiglia sulla parete del foro e intasamento delle eventuali intercalazioni sabbiose: riduce la permeabilità delle vie di drenaggio naturale. Si può verificare nei dreni eseguiti idraulicamente per effetto della fanghiglia esistente nel foro.

— Inquinamento della sabbia del dreno. Riduce evidentemente la permeabilità e quindi la efficienza dei dreni. Si può avere nei dreni eseguiti idraulicamente, se la pulizia del foro non viene molto spinta. D'altra parte una troppo prolungata azione dell'acqua produce erosioni e distacchi dalle pareti.

Di tutte queste cause di inconvenienti le prime tre, cioè lo « smear », il rimaneggiamento e la distorsione degli strati sabbiosi, sono le più importanti e le più difficili da evitare. Ad esse soprattutto sono dovuti gli insuccessi denunciati da CASAGRANDE e POULOS [1969] in un recente articolo sulla efficacia dei dreni in sabbia eseguiti senza asportazione di terreno. D'altra parte lo scavo idraulico è una tecnica piuttosto recente, soprattutto in questo impiego, e non si hanno ancora molti dati al riguardo.

I dreni infissi di piccolo diametro, anche se non presentano vantaggi riguardo allo « smear » e alla distorsione delle intercalazioni sabbiose, dovrebbero dar luogo a un minore disturbo del terreno di quelli di grande diametro, senza sensibili diminuzioni di rendimento.

Ciò risulta anche da un confronto teorico tra gli effetti prodotti dall'infissione di dreni di diverso diametro e la loro efficacia per accelerare la consolidazione.

Assumendo infatti, in prima approssimazione, che l'infissione di un dreno dia luogo soltanto a una deformazione radiale piana del terreno circostante, supposto saturo, cioè incompressibile, formando una cavità cilindrica di diametro d , si ricava una semplice espressione della deformazione tangenziale massima $\gamma = \varepsilon_1 - \varepsilon_3$, in funzione della distanza ρ dell'asse della cavità:

$$\operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} = \frac{1}{8(\rho/d)^2 - 1}$$

Questa relazione può essere facilmente integrata per ottenere, nel terreno compreso tra pali

disposti in maglia triangolare alla mutua distanza D , la deformazione media $\bar{\gamma}$ che può essere assunta come una misura approssimativa del disturbo causato dall'infissione del dreno.

I valori di $\bar{\gamma}$ sono stati calcolati e diagrammati in funzione del rapporto $\frac{D}{d}$ nella fig. 7, insieme

ai valori del fattore tempo T_{50} , corrispondente a un grado di consolidazione medio $U = 0,5$ nella consolidazione radiale prodotta dai dreni.

Dal confronto delle curve si constata facilmente che, ad esempio, stabilito un certo interasse tra i dreni, la riduzione del diametro di questi da 1/10 a 1/15 dell'interasse, mentre dà luogo a un aumento dei tempi di consolidazione di circa il 20%, riduce alla metà la deformazione tangenziale media $\bar{\gamma}$ del terreno circostante.

Si deve tuttavia tener presente che, essendo la relazione tra la distorsione impressa al terreno e la pressione interstiziale prodotta, diversa da terreno a terreno, non è possibile basare su questo confronto un giudizio di carattere generale.

Appare evidente che la causa maggiore delle controversie è la scarsità di dati comparativi per ogni tipica situazione ambientale. L'efficienza e le controindicazioni di ciascun tipo di dreni divengono perciò una questione di opinioni soggettive, complicata dall'esistenza dei brevetti e degli interessi industriali.

È perciò necessario effettuare un maggior numero di ricerche sperimentali, soprattutto osservazioni del comportamento delle opere, e indagini in

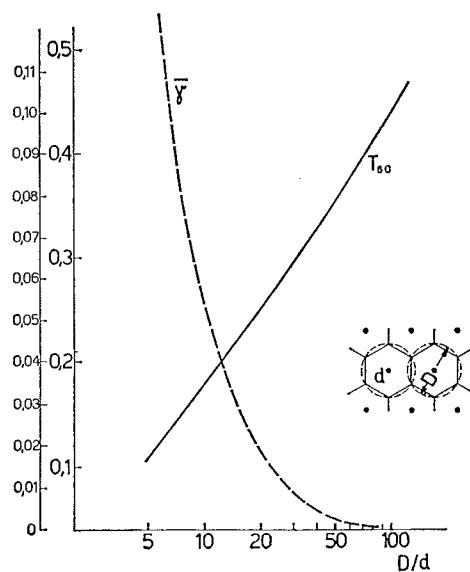


Fig. 7. - Variazione della distorsione $\bar{\gamma}$ del terreno e del fattore tempo, T_{50} , per un grado di consolidazione medio $\bar{U} = 0,5$, in funzione del rapporto tra interasse e diametro dei dreni.

sito accurate ed esaurienti.

In tutti i problemi di geotecnica le ricerche in grande scala si vanno dimostrando, oggi, indispensabili. Tanto più questo è vero in un campo, come questo del consolidamento meccanico dei terreni argillosi, in cui le limitazioni delle ricerche di laboratorio appaiono evidenti. I risultati che si possono ottenere dovrebbero compensare largamente il costo delle ricerche.

BIBLIOGRAFIA

- BARRON R. A. (1944) - *The influence of drain wells on the consolidation of fine-grained soils*. Providence R.I. Dist, U.S. Eng. Office.
- BARRON R. A. (1948) - *Consolidation of fine grained soils by drain wells*. Trans. A.S.C.E. Vol. 113, pag. 718-754.
- CASAGRANDE L., POULOS S. (1969) - *On the effectiveness of sand drains*. Canadian Geotechnical Journal, Aug.
- JOHNSON J. S. (1970) - *Foundation precompression with vertical sand drains*. Proc. A.S.C.E. SM Div. Jan.

SUMMARY

Consolidation of fine grained soils.

The paper represents a contribution to the Panel discussion on the theme: « Improvement of soil properties:

results and perspectives from the theoretical, constructional and economical viewpoint » at the X Italian Geotechnical Conference held in Bari, October 1970.