

SPINTA DELLE TERRE SU STRUTTURE E GALLERIE (*)

G. MATTEOTTI (**)

SOMMARIO: Vengono passati in rassegna gli argomenti trattati nelle comunicazioni, nella relazione generale e nelle discussioni presentate al V Congresso Internazionale di Geotecnica, Parigi 1961, nella sezione 5.

1 - Premesse introduttive

Sul tema, in argomento alla quinta sezione del *Congresso* di Parigi e dedicato ai problemi connessi con le spinte di materiali sciolti contro manufatti in genere, sono state presentate ventuno comunicazioni scritte.

La relazione generale su tali contributi è stata curata dal Prof. HUECKEL, mentre il gruppo degli esperti per la discussione, preordinata circa le variazioni nelle spinte attiva e passiva dovute alle deformazioni in prossimità delle strutture, era composto dal presidente Prof. TSCHBOTARIOFF, dal vicepresidente FAUCONNIER oltre che da BIAREZ, BJERRUM, BRINCH HANSEN, ROISIN e ROWE.

Una elencazione delle comunicazioni secondo argomenti completamente affini — pur nell'ambito del tema generale trattato — non è agevole anche se nella relazione generale si può trovare una tabella di raggruppamento, che segue peraltro uno schema già adoperato nei precedenti congressi e diventato consuetudine. Pur tuttavia si può cercare di fare una suddivisione a seconda dei problemi e delle finalità affrontati e perseguiti dagli autori.

In tal modo si può dire che quattro comunicazioni trattano delle teorie generali e dei metodi pratici di calcolo; tre comunicazioni si occupano delle gallerie e dei silos, altre tre sono dedicate ai fenomeni osservati durante alcune ricerche effettuate, sia in laboratorio sia « *in situ* », nel comportamento dei sostegni flessibili; cinque memorie hanno invece per oggetto il problema degli sforzi agenti sui manufatti di fondazione — anche se i casi e le strutture considerate sono oltremodo vari —; una sola riporta il risultato di uno studio in laboratorio sull'effetto dello scorrimento dei terreni; due rapporti illustrano questioni relative a procedimenti costruttivi; infine le ultime

tre note descrivono dei nuovi tipi di misuratori delle pressioni delle terre.

Da questa elencazione si può forse notare quanto vasto sia il campo degli argomenti che sono stati esaminati e come sia difficile ricondurli ad una visione unitaria. Inoltre le comunicazioni presentate al *Congresso* — come giustamente ha osservato il Relatore — investono solo parzialmente il problema delle relazioni possibili fra sforzi e deformazioni delle strutture, che era il tema principale prescelto su suggerimento del Comitato organizzatore.

Prima di sintetizzare i vari lavori presentati al *Congresso* sarà quindi utile richiamare brevemente teorie, posizioni e sviluppi raggiunti in questi ultimi anni.

In una analisi di stabilità per il calcolo di opere di sostegno o di fondazioni viene studiato lo stato di tensione esistente nei punti di una massa di terreno agente contro l'opera in esame.

Può esistere la condizione in cui una piccolissima variazione degli sforzi agenti in qualsiasi direzione di un punto non genera una violazione di equilibrio, oppure la condizione in cui un analogo mutamento porta allo squilibrio del sistema e quindi alla rottura, generantesi in un fenomeno detto di scorrimento plastico. Quest'ultimo è preceduto da uno stato di equilibrio plastico. Gli stati attivo e passivo costituiscono le due condizioni limiti dello stato plastico, mentre ogni altro stato intermedio, cui corrispondono le condizioni del primo caso, si dice di equilibrio elastico.

La progettazione può allora essere condotta o fissando un sistema di forze scelte con un determinato valore ammissibile di esercizio — che rappresenta un procedimento analogo a quello usato nella Scienza delle Costruzioni dove si hanno a disposizione materiali più vicini al comportamento elastico —, oppure adottando un determinato franco o coefficiente di sicurezza rispetto alle caratteristiche del terreno al momento della rottura, come generalmente viene usato nei metodi plastici.

Le teorie elastiche non sono molto note nè molto usate in pratica, anche per la difficoltà di considerare il materiale terra alla stessa stregua di quelli che seguono la legge di Hooke. Le teorie inoltre conser-

(*) La presente nota è stata redatta per conto della *Associazione Geotecnica Italiana*, che l'Autore sentitamente ringrazia.

(**) Dott. Ing. Giuseppe MATTEOTTI, Assistente presso l'*Istituto di Costruzioni Marittime* ed il *Centro Geotecnico Veneto* dell'Università di Padova.

vano nello studio il rigore matematico e devono perciò limitarsi a casi di solito molto semplici e schematici, i soli per i quali si riesce a determinare la soluzione facendo generalmente ricorso alle ipotesi dello schema di BOUSSINESQ.

Ad esempio le osservazioni compiute da SPANGLER sulla distribuzione delle pressioni generate da carichi concentrati sulla superficie di un terrapieno dietro un muro di sponda, hanno messo in evidenza un andamento analogo a quello indicato dalla legge di BOUSSINESQ, considerando il terreno un mezzo elastico semi-infinito.

Le teorie più comuni e note sono quelle di plasticità, i cui postulati base furono posti da COULOMB che li applicò per la prima volta nel determinare la spinta di un terrapieno contro un muro, nelle condizioni particolari di superficie orizzontale del terrapieno e di faccia verticale del manufatto. In questo procedimento COULOMB partiva dal presupposto di una superficie di rottura piana la cui traccia sul piano di disegno passa per la base del muro.

Più tardi RANKINE, esaminando l'equilibrio di un prisma seminfinito limitato da una superficie comunque inclinata, introduceva il concetto di superficie di slittamento ponendo le condizioni di stato di equilibrio plastico critico di un mezzo incoerente.

Questi metodi di calcolo delle strutture concernenti le spinte delle terre si sono ulteriormente perfezionati specialmente ad opera di KREY, FELLENIUS ed altri, con l'ipotesi dell'esistenza di linee di slittamento di forma arbitraria piana e semplice — in particolare circolare — ricercando la più sfavorevole e pervenendo così alla risoluzione delle equazioni in giuoco.

Sempre continuando l'idea del RANKINE si è cercato di rendere più rigorosa la teoria di equilibrio critico per potere risolvere ciascun problema e individuare la corrispondente rete di linee di slittamento. KÖTTER ha impostato un sistema di equazioni con le equazioni differenziali di equilibrio e la condizione di rottura o stato critico in ogni punto di un mezzo pervenendo alla sua soluzione. PRANDTL, con un notevole contributo allo studio dei problemi di equilibrio plastico, è stato il primo a pervenire alla soluzione con l'assunzione di un punto singolare e di una famiglia di linee di slittamento passanti per esso.

Più recentemente CAQUOT ha studiato il sistema di equazioni di equilibrio critico per un mezzo ideale incoerente.

Indubbiamente l'elenco di questi studiosi e delle loro ricerche sarebbe lungo e interessante; solo si ricorderà qui, fra le teorie sviluppate recentemente e sempre rimanendo nei metodi plastici, quella dovuta a BRINCH HANSEN, nella quale si pone la deformazione più probabile al limite dello stato plastico di un sostegno, soggetto all'azione di spinta di un terreno, e la corrispondente figura di rottura che deve individuare una deformazione congruente con quella del sostegno laterale. La determinazione degli sforzi agenti sulle linee di rottura — il cui insieme compone la figura di rottura — viene fatta con l'aiuto delle equazioni di KÖTTER e di una speciale condizione ai limiti.

Sebbene critiche siano state mosse al metodo, in questo modo sembra possibile determinare, in molti problemi di spinta, l'entità e il punto di applicazione della pressione dei terreni per una posizione specifica del centro di rotazione del sostegno.

Molto apprezzata, nei centri di studio, sembra pure in questi ultimi tempi la teoria dell'equilibrio limite di SOKOLOWSKI che ha per scopo la generalizzazione del metodo plastico per l'esame dei problemi di spinta in un qualsiasi mezzo granulare o coerente, e che ha già avuto — anche se ancora di difficile applicazione pratica — qualche conferma nell'esperienza.

Nell'ambito di questi metodi più o meno noti e adoperati il problema dell'equilibrio di ogni tipo di struttura è comunque un caso particolare dell'insieme dei problemi di spinta. La sua soluzione è funzione delle condizioni ai limiti per le deformazioni della massa di terreno a diretto contatto della struttura, che dipendono a loro volta dagli spostamenti del sostegno o manufatto da una parte, e della sua flessibilità dall'altra, nonché dal metodo costruttivo.

Ciò che si rende pertanto necessario in sede di progettazione è l'esaminare con cura le ipotesi di calcolo, di valutare bene i limiti di validità della teoria seguita e controllare i risultati con quelle delle esperienze e osservazioni in posto; fatto questo ultimo che rappresenta il corollario logico della precedente proposizione.

La conoscenza, fatta attraverso le misure su modelli o su opere reali, dell'andamento delle pressioni laterali porta alla riprova delle incertezze che sono connesse con le teorie in fase di progettazione. Di conseguenza gli inevitabili errori devono essere compensati con una scelta appropriata del fattore di sicurezza, pur riconoscendo che la sua generalizzazione è difficile a causa delle molte variabili che giocano in maniera differente, per ciascun caso.

Nel caso di strutture rigide le esperienze fondamentali di TERZAGHI, condotte al *Massachusetts Institute of Technology*, offrono un quadro dell'andamento della spinta attiva e del suo centro di applicazione rispetto alla legge triangolare di distribuzione, secondo la teoria classica di RANKINE, a seconda degli spostamenti della parete e della densità del terreno sperimentato.

Nel 1953 TSCHEBOTARIOFF e JOHNSON hanno pubblicato un importante resoconto sulle questioni della spinta passiva eseguendo esperienze che hanno permesso di osservare la variazione del coefficiente K_p in funzione della obliquità δ della spinta e dell'angolo φ del terreno esaminato.

Un'altra serie di prove da ricordare — sempre riguardo la spinta passiva — è quella effettuata da HUECKEL sulla capacità di ancoraggio di piastre verticali e inclinate in sabbia a tergo di opere di sostegno, che dimostrano una dipendenza del coefficiente K_p con la profondità di interrimento.

Nel caso di strutture flessibili TSCHEBOTARIOFF e in seguito più a fondo ROWE — con risultati in buon accordo fra loro — hanno analizzato sperimentalmente la influenza della flessibilità della parete — caratte-

rizzata dal valore $\frac{H^4}{EJ}$ — e delle caratteristiche del

terreno sul valore e distribuzione delle spinte. A seconda della entità di questi valori si ha una diversa mobilitazione della resistenza al taglio totale del materiale e quindi del suo andamento rispetto a quello delle teorie classiche, ed una concentrazione degli sforzi sui punti di vincolo del sostegno.

L'applicazione di un sistema rigorosamente teorico al calcolo di strutture flessibili conduce pertanto, a causa delle troppe variabili, ad equazioni di difficile adattamento per la pratica costruttiva. Così oltre ai metodi puramente teorici sono state adottate delle regole empiriche sulla base dei dati di osservazione e di esperienze.

Sono noti e impiegati ormai diffusamente i nuovi metodi proposti da TSCHEBOTARIOFF, riportati nella sua classica opera sulla meccanica dei terreni, e da ROWE.

Quest'ultimo è stato successivamente anche inquadrato dallo stesso Autore dal punto di vista teorico. Un'analisi matematica del problema delle palancole basata sull'ipotesi che la spinta passiva nella zona di infissione varia con la profondità e la incurvatura della palancola, conduce a dei diagrammi teorici momento flettente — flessibilità in buon accordo con gli analoghi diagrammi sperimentali.

Un notevole contributo è portato ancora da TERZAGHI che in una sua memoria fa un'analisi delle più importanti indagini sperimentali effettuate sulle palancole, confrontandole poi con le ipotesi su cui si basano le varie teorie. Tale rapporto rappresenta nel contempo un sommario delle moderne vedute sulla resistenza al taglio del terreno nella sua applicazione ai calcoli delle spinte delle terre. E' pure da notare che in questi calcoli l'A. si avvale della teoria di COULOMB, anche se spesso quest'ultima si distacca dalla realtà dei fenomeni, compensandola, durante le varie fasi di progettazione, con una serie di coefficienti di sicurezza il cui valore viene desunto dalle indagini sperimentali eseguite in questo campo.

In questa rapida rassegna è anche da ricordare, fra le altre, una recente tendenza che cerca di supplire alle teorie precedenti in quei problemi dove le deformazioni non corrispondono alle ipotesi classiche di elasticità o plasticità. E' questo un metodo basato sulla legge di probabilità che ha avuto specialmente in Polonia, con LITWINISZYN, il suo centro di ricerca e di applicazione. In questi casi si prende come modello teorico il mezzo detto « *stocastico* » vale a dire un mezzo in cui i movimenti dei singoli elementi sono determinati dalla legge di probabilità.

Allo stato attuale delle cose si può dire in conclusione che fra i vari metodi e regole pratiche di calcolo manca una sintesi che possa dare una definizione esatta dei limiti di applicazione dei vari sistemi di calcolo.

Tali limiti è indubbio potranno essere definiti col progressivo aumento dei dati sulle esperienze e sui vari fattori che li condizionano.

2 - Comunicazioni scritte

Nello studio teorico di un problema relativo allo stato di equilibrio limite piano in un mezzo incoerente è possibile determinare le tre componenti di ten-

sione con le due equazioni della statica e l'equazione di COULOMB, quale condizione di rottura. Se il problema si riferisce allo spazio, le equazioni di equilibrio diventano tre ma le componenti di tensione sei.

Il rapporto di DAVIN [16] rappresenta un saggio sulla soluzione teorica di quest'ultimo problema che potrebbe trovare un interessante campo di applicazione. La risoluzione è possibile prendendo in considerazione le deformazioni del mezzo ideale e ponendo le sei equazioni — tre di equilibrio degli sforzi nei punti di contatto fra i grani e tre di continuità — che determinano le sei componenti del vettore degli sforzi.

Lo studio permette di definire però solo certi casi semplici per l'esistenza di una simmetria che permette l'eliminazione di alcune incognite, ma non consente di ottenere facilmente la soluzione per integrazione nel caso generale.

PRAMBORG [27] rimane nel campo dell'equilibrio piano plastico trattando del problema in un terreno che soddisfi la legge di COULOMB alla rottura, e che è già stato risolto da PRANDTL nell'ipotesi di peso di volume eguale a zero.

Nella sua comunicazione l'A. pone invece la densità γ diversa da zero e dimostra come sia possibile risolvere il problema nel caso generale coll'introduzione di una funzione — analoga a quella di PRANDTL — degli sforzi F' in coordinate polari di forma semplice. Da alcune soluzioni approssimate, pure riportate nella memoria, appare che la soluzione di PRANDTL — che è stata formulata trascurando il peso del terreno — è troppo conservativa come è del resto confermato da alcune prove su modello eseguite presso il *Centro Geotecnico Danese*.

Passando ora a considerare alcuni metodi che non rientrano nella categoria dei precedenti, strettamente teorici, ma che si possono definire empirici si trova una nota di KASSIFF e ZEITLEN [24] che sulla azione delle argille rigonfiabili contro condotti sotterranei, avanzano delle ipotesi per permettere un calcolo di determinazione della massima pressione di rigonfiamento esercitata dal terreno.

Il metodo utilizza allo scopo i risultati di prove di laboratorio dove vengono determinate la pressione di rigonfiamento massima delle argille senza sovraccarico e quella a volume costante. E' stato possibile, a conforto del metodo di calcolo proposto, accertare una buona correlazione fra metodo stesso, prove di laboratorio e « *in situ* », quest'ultime ottenute dal controllo delle deformazioni di due condotti reali.

Il sistema adoperato resta naturalmente confinato nell'ambito di analoghi problemi perché non sembra che, allo stato attuale, le ipotesi di base valide in questo caso per materiali argillosi rigonfiabili, possano applicarsi al caso di altre strutture importanti come, ad esempio, le fondazioni sottoposte all'azione di rigonfiamento dei terreni.

Anche la comunicazione di HUECKEL e KWASNIEWSKI [22] considera i risultati di alcune prove su modello, eseguite per determinare con una formula empirica la capacità di ancoraggio di elementi rigidi orizzontali. Il risultato più interessante comunque è quello — come riferisce lo stesso Prof. HUECKEL nella sua relazione generale — che permette interessanti osservazioni sull'attrito fra ancoraggio e terreno

e il valore della spinta passiva agente sull'ancoraggio stesso.

Sull'argomento che riguarda le gallerie e i notevoli problemi ad esse connessi sono state presentate due sole memorie riguardanti più che altro questioni marginali

LEECH e PENDER [25] danno una descrizione dei sostegni, costituiti da tiranti d'acciaio, che servono da supporto permanente in alcune gallerie, eseguite nelle Snowy Mountains in Australia, e di uno speciale cemento espansivo con cui tali supporti vengono fissati. Gli AA. danno i dettagli di quattro tipi di tiranti, della composizione del cemento, oltre ad alcune prove eseguite per verificare il loro comportamento.

Allo scopo invece di approfondire la conoscenza sulla validità delle ipotesi di calcolo nel dimensionamento dei rivestimenti, sono state condotte alcune serie di misure a lungo termine sulle deformazioni verificatesi nei rivestimenti interni di alcune gallerie di servizio nelle miniere carbonifere olandesi. Una nota di DE REEPEER [28] ne riporta i dati raccolti e descrive il sistema di misurazione adoperato.

La più recente teoria per determinare le pressioni sulle pareti dei silos è quella di CAQUOT (1957). In essa viene fatta una netta distinzione di due sistemi di equilibrio; il primo durante la fase di riempimento, il secondo in fase di vuotamento; nel secondo caso i valori determinati sono considerevolmente più alti.

BUISSON e COMERRE [15] hanno studiato in modello questo fenomeno curando il caso di svuotamento dei silos, che rimane il problema di maggior interesse a causa della pressione più elevata, e il cui meccanismo era già stato oggetto di una memoria del primo autore nel precedente Congresso di Londra. I risultati dello studio sono numerosi e utili agli effetti del calcolo dei silos, perché le esperienze sono state eseguite su modelli cilindrici quadrati e rettangolari con pareti lisce e ruvide, con vuotamento simmetrico e no, con e senza tramoggia.

Il dato di osservazione più importante è l'aver messo in evidenza che la pressione media all'interno dei silos è praticamente costante per un'altezza considerevole durante la fase di vuotamento ad eccezione della parte alta e parimenti della parte bassa, dove la pressione è minore a seconda della dimensione del silo e della posizione del foro di scarico.

ROWE e BRIGGS [29] portano un ulteriore contributo alla conoscenza del comportamento dei sostegni flessibili sulla via ormai tradizionale segnata da ROWE. Gli AA. hanno eseguito numerose prove su modello sul comportamento di una paratia flessibile, posta a sostegno di uno scavo in sabbia e vincolata da un numero di appoggi variabili da uno a quattro a seconda della differenza fra le superfici del terreno all'interno e all'esterno del sostegno, misurando con speciali apparecchiature gli sforzi sui vincoli, le deformazioni della parete e le tensioni nella sabbia.

I diagrammi delle pressioni, ricavati dalle misure, illustrano il principio generale che quando in una struttura, composta da elementi di diversa rigidità, una parte comincia a deformarsi, gli sforzi sono trasferiti dalle parti flessibili a quelle rigide. Vale a dire che diventa considerevole la concentrazione della pressione sui vincoli,

Il risultato più essenziale delle prove è quello di aver messo in luce come un aumento degli appoggi o puntelli diminuisce la deformazione del muro o paratia e di conseguenza diminuisce la mobilitazione dell'angolo d'attrito con aumento della spinta attiva totale. Vi si può notare inoltre la necessità di differenziazione fra problema di deformazione e problema di rottura. Nel caso del sostegno con un solo vincolo — che ha messo in evidenza una concentrazione della pressione al livello dell'ancoraggio in maniera analoga, ma più pronunciata, delle esperienze condotte nel 1952 dallo stesso ROWE nelle palancole ancorate — il calcolo di stabilità si può ricondurre ad un problema di rottura, mentre nel caso di più vincoli — il cui scopo è di prevenire o ridurre la deformazione del terreno adiacente al sostegno — la spinta attiva non può essere computata sulla base dei parametri del terreno alla rottura.

Sul medesimo problema, analizzato precedentemente dalle prove su modello di ROWE e BRIGGS, riferisce pure una nota di DI BIAGIO e KJAERNESLY [17].

In questa vi sono riportati molti dati interessanti relativi ad uno scavo per la ferrovia sotterranea di Oslo. Sono state calcolate, a seconda della profondità raggiunta dallo scavo, le pressioni attive del terreno agenti sulla palancole di sostegno e sono stati misurati gli sforzi sugli appoggi, le deformazioni della struttura e i momenti flettenti. Sulla base di tali misure è stato possibile un confronto con gli analoghi valori calcolati secondo la regola empirica di PECK e secondo la teoria di BRINCH HANSEN.

Nel primo caso si è trovato una buona corrispondenza solamente quando la profondità dello scavo

4 c
γ

aveva raggiunto valori vicino al valore critico — ,

con sforzi calcolati in leggero difetto nei puntelli superiori; nel secondo caso la corrispondenza è stata trovata soddisfacente per tutte le profondità, ma con sforzi calcolati leggermente in eccesso nei puntelli inferiori.

Sul caso assai interessante e discusso dell'applicazione di carichi concentrati alla superficie di un terrapieno dietro palancole di sostegno metallico vincolate in testa, VERDEYEN e ROISIN [33] hanno condotto uno studio sperimentale con un modello, ispirato a quello di SCHNEEBELI, e con carichi la cui distanza dalla parete di sostegno è stata fatta variare.

In particolare lo studio conferma il disaccordo esistente fra le ipotesi e i risultati ottenuti, secondo i metodi di TERZAGHI e KREY e la realtà fisica.

La ricerca della legge di distribuzione della pressione dovuta a carichi concentrati è intimamente legata alla deformabilità della struttura e alla natura dei vincoli, che condizionano in effetti gli spostamenti cinematici della parete connessi colle deformazioni all'interno del terrapieno. Il problema viene così materializzato dalle esperienze sul modello offrendo la possibilità di mettere in evidenza che, allorché il carico si allontana dalla palancole la sua azione su questa viene ad interessare zone sempre più limitate e spostate verso l'alto e che, quando la distanza supera il valore di 1,34 H il carico non influenza più la parete stessa,

Le figure caratteristiche di rottura, relative alle varie distanze dei carichi, non sono influenzate da un debole spostamento dell'appoggio delle palancole, mentre se tale spostamento è dell'ordine di $0,10 H$, a causa di una modifica sostanziale della linea di deformazione a tergo della palancola, questa viene ad essere influenzata anche da carichi che si trovano ad una distanza $> 1,34 H$.

In generale la valutazione delle spinte esercitate sui manufatti rigidi è più semplice di quella sulle pareti flessibili. Pur tuttavia certi problemi ad essi connessi si presentano ancora incerti, come è nel caso frequente di una struttura rigida che ruoti per effetto di un carico obliquo. La difficoltà consiste nel valutare la percentuale di resistenza al taglio che si sviluppa nel terreno, allorché esercita una spinta passiva sulla struttura stessa.

Un contributo alla chiarificazione di questo problema, presente in particolare nello studio di stabilità delle pile dei ponti, viene data da BIAREZ e CAPELLE [14]. Nella loro memoria riportano uno studio sull'equilibrio limite piano di un mezzo incoerente, omogeneo e isotropo, sottoposto all'effetto di una rotazione di fondazioni rigide.

Il fenomeno è stato realizzato con l'impiego del modello SCHNEEBELI con cilindretti di duralluminio, usando prima un corpo cilindrico a superficie rugosa sollecitato da una coppia nota e poi un corpo prismatico sollecitato da una forza orizzontale pure nota.

I risultati sono assai interessanti perché offrono una visione cinematica del comportamento del terreno vicino alla fondazione per effetto della rotazione, e mettono in evidenza l'esistenza di una zona piriforme solidale con la fondazione con centro posto circa a $3/4$ della sua profondità.

E' stato possibile anche il tracciamento di diagrammi che danno il valore del momento di rotazione in funzione della profondità e dell'eventuale dislivello fra le superfici del terreno posto sulle due facce opposte del manufatto.

Su analogo problema SCHOFIELD [30] riporta i risultati di una serie di prove su modello, in cui viene studiato la spinta passiva esercitata da una sabbia contro la parete verticale di un'opera di fondazione soggetta a rotazione attorno ad un asse orizzontale, posto al livello della superficie del terreno. L'A. ha così potuto osservare una certa relazione fra l'entità della pressione P' della sabbia contro la piastra del modello, l'inclinazione di questa ϑ e l'inclinazione δ' della spinta P' rispetto la normale alla parete mobile.

Tali osservazioni hanno messo in evidenza che l'entità della spinta aumenta con lo spostamento della piastra, mentre l'inclinazione del vettore P' diminuisce. Una spiegazione di questo fenomeno, che il calcolo è insufficiente a spiegare, deve essere ricercato, secondo l'A., nella pressione di dilatazione che si sviluppa nella zona distorta dalla rotazione della fondazione.

Sui dati di alcune ricerche speciali eseguite su un modello dell'elemento strutturale della banchina Florida del porto di Le Havre riferisce una memoria di CHAZY e HABIB [20]. Lo studio riguarda il comportamento di tale elemento, che consiste in uno spe-

ziale cassone autoaffondante. Le prove eseguite su modello in scala $1/14$ rispetto all'originale posto in opera, esaminando il caso di un elemento isolato infisso su una sabbia fine, hanno offerto dei dati interessanti sull'andamento delle pressioni interne agenti sulle pareti nello stato elastico e di rottura, oltre alla ripartizione delle pressioni alla base del cassone, che è confrontabile con quella di una fondazione rigida e rugosa.

Con lo stesso dispositivo sperimentale si sono esaminati tre elementi collegati, al fine di evitare spostamenti laterali, determinando gli sforzi solo sull'elemento centrale ottenendo risultati analoghi ai precedenti.

L'A. dà infine notizia che tali risultati, i quali permetterebbero fra l'altro una notevole diminuzione dell'armatura dei cassoni, sono in fase di verifica attraverso misure eseguite sull'opera reale per poterli poi extrapolare alla pratica.

HEYMAN e BOERSMA [21] riportano i risultati di ricerche eseguite allo scopo di determinare gli sforzi orizzontali trasmessi ad una palificata di fondazione da un rilevato costruito in adiacenza. Lo studio si riferisce a tre pali speciali in acciaio di grandezza naturale (13,5 m.), affondati in un terreno compressibile posto fra due strati di sabbia. Mediante una speciale attrezzatura si sono misurati gli sforzi trasmessi da un rilevato di 7 m. di altezza, posto a 30 m. di distanza dai pali, e si sono misurati su questi i momenti flettenti. Le prove hanno dimostrato che i pali per effetto di questi sforzi trasmessi possono essere sovraccaricati. Nel caso specifico, col rilevato prolungato fino a 10 m. dai pali, si è potuto constatare in questi la presenza di un momento flettente di 14 tm.

PECK e IRELAND [26] riferiscono sui risultati di una prova di carico, in scala naturale, su un muro di sostegno rigido fondato su pali allo scopo di verificare la resistenza offerta dal muro stesso — calcolato coi metodi classici — alla spinta attiva. Il dato di osservazione più interessante è la riprova della validità dei calcoli usuali che assicurano un coefficiente di sicurezza eguale a 2.

Gli effetti provocati dallo scorrimento del terreno contro la sua ritenuta sono stati studiati da SUKLJE e VIDMAR [31] con un consolidometro a fondo mobile e una scatola a parete trasversale pure mobile. Le prove sono state condotte per gradi, misurando gli sforzi tangenziali mobilizzati in prossimità delle parti scorrevoli durante le fasi di consolidamento, di traslazione e di arresto del fondo e della piastra. E' stato dimostrato che nell'ultimo caso si provoca una notevole diminuzione della resistenza al taglio sviluppato dal terreno. La spinta attiva aumenta in funzione del tempo avvicinandosi alla pressione di riposo del terreno. Nelle prove eseguite con argilla marina rimaneggiata i valori della suddetta resistenza sono diminuiti fra il 41 e 65% sul totale.

La nota presentata collettivamente a cura della SADE, EDISON e SIMA [18] è una elencazione di una serie di diaframmi in calcestruzzo eseguiti negli ultimi 10 anni in Italia con considerazioni sui tipi adoperati, sulle loro proprietà, sulle prove e verifiche eseguite.

Il rapporto di GOLDER, HARDING e JENKINS [19] riferisce di un tipo insolito di sottofondazione e di sostegno in uno scavo di 10 m., eseguito a Londra in occasione della costruzione di un garage sotterraneo in adiacenza a vecchi edifici di 200 anni. Il metodo usato è consistito in un trattamento chimico delle ghiaie e sabbie che le ha cementate e in un puntellamento del muro così costituito.

Il rapporto illustra i vari problemi incontrati, riportando le caratteristiche fisiche e meccaniche dei terreni; riporta in dettaglio i calcoli della progettazione, confrontando le soluzioni con quelle dei vari metodi convenzionali.

Le ultime tre comunicazioni che sono elencate fra quelle della 5ª divisione, ma che interessano pure la divisione riguardante le varie tecniche di misurazione, offrono delle descrizioni di nuovi dispositivi per valutare l'entità degli sforzi di un terreno corredandoli con i risultati ottenuti.

ICHIHARA e TAKAGI [23] descrivono un nuovo pressimetro a sette faccie per misurare lo stato di tensione nei terreni. L'efficacia di tale misuratore è stata confermata in laboratorio. Attualmente due esemplari registrano gli sforzi in una diga in terra a Hokkaido (Giappone).

La comunicazione di TROLLOPE e LEE [32] tratta di ricerche sulle misure di pressione effettuate in posto nel terreno sottoposto a condizioni di carico, scarico e di carichi ripetuti. Sembra che la precisione delle misure, ottenute con una cella speciale, basata sul principio delle corde vibranti, sia molto utile per la risoluzione di molti problemi geotecnici.

WIKRAMARATNA [34] dà notizia di un nuovo tipo di misuratore delle pressioni da usare in laboratorio.

3 - Osservazioni conclusive sui lavori del Congresso

Nel precedente paragrafo sono stati indicati i punti più interessanti toccati dalle varie comunicazioni presentate al Congresso di Parigi e si può notare che, nella maggior parte dei casi, lo sforzo dei vari autori è stato quello di ricercare, attraverso i dati delle osservazioni desunte dalle prove di laboratorio e « *in situ* », una sempre maggiore spiegazione dei complessi fenomeni di spinta e di valutare gli effettivi valori degli sforzi e delle deformazioni corrispondenti.

Il Prof. HUECKEL nella sua introduzione orale al congresso, dopo avere messo in evidenza questo stato di cose, ha orientato il dibattito su quelli che si possono definire i problemi di fondo delle spinte delle terre, come già si era messo in evidenza nelle premesse. Infatti l'analisi e il confronto delle ipotesi che stanno alla base dei vari metodi di calcolo, la scelta e il tipo del coefficiente di sicurezza che entrano in gioco durante la fase di progettazione e la verifica sperimentale del valore degli sforzi con quelli previsti, dovrebbero portare verso quella identità di vedute o meglio verso quella definizione dei limiti di applicabilità dei metodi stessi che è da tutti auspicabile.

BRINCH HANSEN intervenendo nella discussione, dopo avere premesso che le teorie classiche di COULOMB e RANKINE danno risultati soddisfacenti nel caso di sostegni rigidi, data la buona corrispondenza reale del fenomeno di rottura in esse previsto, ha confermato che nelle strutture flessibili, entrando in gioco una deformazione che non è più congruente con quella semplice di COULOMB, il problema può essere risolto solo con una teoria che tenga nella dovuta considerazione le equazioni di equilibrio e i movimenti della struttura in stato di rottura.

Questo Autore è notoriamente un fautore della tendenza che tende ad ammettere generalmente la validità del metodo plastico in quasi tutti i problemi di spinta, ma la questione specie nel caso delle palancole è piuttosto controversa. Le opere molto spesso sviluppano in maniera diversa quegli spostamenti che, sulla base delle numerose esperienze eseguite, permetterebbero la valutazione della reale distribuzione delle forze.

D'altra parte manca attualmente un sufficiente numero di dati sperimentali concernenti le spinte dei materiali coerenti, e questi intervengono con proprietà che sono funzione dei loro caratteri reologici intrinseci e che sono certamente di più difficile interpretazione rispetto a quelli dei materiali incoerenti e granulari. Fondamentale in questi casi è prevedere a seconda della natura dell'opera i reali sforzi in funzione della deformazione parziale e reale e valutarne la loro evoluzione nel tempo. E' in definitiva il punto di vista con cui si arriva a considerare la coesione e l'attrito non come due costanti indipendenti ma come due variabili nel tempo, e in particolare, nelle analisi di stabilità a lungo termine, ad ammettere la riduzione del fattore c' anche fino al suo annullamento.

A parte queste considerazioni è sintomatico l'intervento verbale di ROWE in cui ha affermato che nelle strutture flessibili le deformazioni possono essere talmente forti ancora prima della rottura da non potersi considerare ammissibili. La φ massima viene mobilizzata prima di questo stato limite così che il calcolo della distribuzione delle spinte non può essere calcolato seguendo le ipotesi di HANSEN.

A complicare i calcoli di questo tipo non bisogna dimenticare poi certi casi in cui esiste un fenomeno di scorrimento del terreno, il cui effetto ha una influenza notevole sul valore dell'angolo di resistenza al taglio e che certamente, almeno nelle analisi di stabilità a lungo termine, non può essere trascurato.

Sebbene esistono prove di laboratorio pregevoli — come ad es. quelle riferite nella nota di SUKLJE e VIDMAR [31] — si conosce poco circa tale problema anche perché i dati desunti da rilievi in posto sono relativamente pochi e le prove di laboratorio non sempre possono tenere conto di tutti i fattori che li influenzano, come, ad es., quello del contenuto d'acqua che in molti casi nella realtà è variabile.

La disparità di vedute nel metodo più appropriato di calcolo persiste anche nel campo delle gallerie, a

cui purtroppo in questo congresso è stato riservato poco spazio. L'esperienza finora acquisita nel calcolo delle gallerie pone in evidenza che il metodo più adatto per i rivestimenti flessibili è quello basato sulla teoria di plasticità mentre negli altri casi è quello basato sulla teoria elastica. Rimane però l'incertezza del limite fra il dominio dei due campi che è legato al modulo di compressibilità del terreno in rapporto alla possibile deformazione del rivestimento.

Lo scopo delle ricerche sulla interdipendenza fra sforzi e deformazioni e sui fenomeni connessi a seconda delle varie strutture dovrebbe poter pervenire a stabilire appunto, come il Prof. ROWE giustamente ha messo in evidenza nelle sue considerazioni sulla spinta attiva, quando il problema da risolvere sia essenzialmente un problema di deformazione elastica o uno di rottura e di conseguenza sia da usare un calcolo basato rispettivamente sulla teoria elastica o dell'equilibrio limite.

A parere del Prof. HUECKEL — che come è noto ha condotto numerose esperienze sull'effetto di piastre sottoposte a sforzi orizzontali e sulla entità della pressione passiva — i risultati che si ottengono dalle varie esperienze e il successivo esame delle relazioni fra spinte e deformazioni possono essere utilizzati in tal senso.

Se si traducono in diagramma i risultati delle espe-

guere i limiti di applicazione delle teorie elastiche, plastiche e di equilibrio limite per il calcolo della spinta passiva.

Un'altra questione dibattuta — che è anche legata a quella sulla scelta del metodo di calcolo — ed è essenziale nelle progettazioni è quella dei coefficienti di sicurezza. Si tratta di stabilire se la struttura deve essere calcolata in maniera che le forze non superino un valore ammissibile di esercizio o se deve essere calcolata in maniera che abbia un certo coefficiente di sicurezza rispetto alla rottura. Nel primo caso significa applicare il coefficiente di sicurezza alla resistenza del materiale costituente il manufatto, mentre nel secondo questo viene applicato alle costanti delle terre al momento della rottura, come viene fatto solitamente nelle analisi di stabilità.

A questo riguardo non è da sottovalutare l'osservazione fatta da ROWE, durante il dibattito al *Congresso*, con cui si chiedeva, mentre ad esempio nell'acciaio il fattore di sicurezza è basato sullo snervamento, che cosa si può dire per quanto riguarda la terra.

Un difetto della teoria plastica è quello di non permettere la valutazione dell'entità delle pressioni e delle deformazioni per vari valori della rotazione del muro e degli spostamenti della base, in maniera che il dimensionamento della struttura è fatta solo in funzione delle caratteristiche del terreno alla rottura,

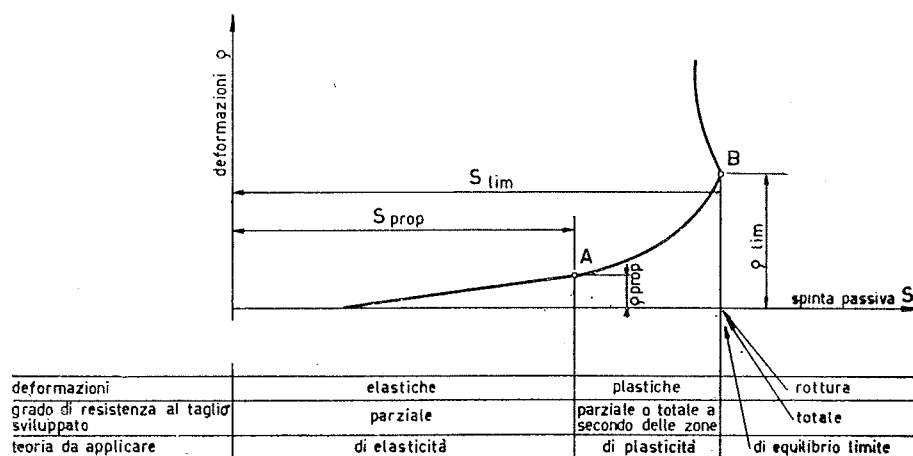


Fig. 1

rienze, condotte dal sucitato sperimentatore, vale a dire l'entità della spinta passiva esercitata contro una piastra in funzione degli spostamenti, si ricava una curva in cui si possono distinguere: il tratto in cui è evidente il comportamento elastico fino ad un punto A che rappresenta il limite di proporzionalità; il tratto in cui le deformazioni divengono plastiche fino ad un punto B del diagramma (*peack value*) che corrisponde all'equilibrio limite di rottura (Fig. 1). In corrispondenza di questi tratti la resistenza al taglio del terreno viene gradualmente sviluppata o mobilizzata fino al suo valore massimo ed è possibile distin-

trascurando così, almeno nel caso dei sostegni flessibili, l'entità della flessione negli stati intermedi a quello limite, che può essere considerevole se non addirittura pericoloso.

Un coefficiente di sicurezza poi non può essere adottato generalmente ma il suo valore deve essere scelto secondo lo spostamento o deformazione ammissibile nella costruzione in questione.

Ad esempio durante alcune prove condotte da HUECKEL su piastre di ancoraggio, questi ha constatato che ad un coefficiente 2 corrispondeva uno spostamento cinque volte minore di quello a rottura e

pertanto considerato soddisfacente. Tale coefficiente potrebbe essere certamente insufficiente per esempio nel calcolo di un corpo rigido infisso nel terreno, dove lo spostamento è inferiore che nel caso della piastra.

Nella progettazione di una fondazione o di un muro di sostegno rigido il problema del coefficiente di sicurezza si deve porre in diretto rapporto con l'angolo di rotazione ammissibile e con la ripartizione reale della spinta passiva che da esso dipende. Se si pone attenzione ai risultati ultimi in questo campo, riportati da BIAREZ e CAPELLE e da SCHOFIELD, dove si può supporre che la spinta passiva si produce solo nella parte superiore del manufatto, si potrebbe tentare di impostare uno schema di calcolo come in Fig. 2 in cui la stabilità dipenderà dal grado di mobilitazione della spinta passiva.

Le verifiche che sono a disposizione oggi degli studiosi non consentono certamente di poter giungere a conclusioni generali sulla concordanza dei valori calcolati con quelli osservati sia nei modelli sia « in

parte alta dovuta ad un assestamento del terreno dietro il sostegno.

Le varie teorie in uso non possono considerarsi di tutto soddisfacenti o per lo meno le ipotesi su cui sono basati i ragionamenti per la applicazione pratica di un calcolo non sempre sono completamente compatibili con la realtà. E le indagini e le ricerche, pur fornendo numerosi elementi che contribuiscono a rendere sempre più chiari i fenomeni, non consentono ancora di fornire delle norme generali di progettazione. D'altra parte i metodi empirici, pur garantendo risultati in ottimo accordo col comportamento reale, hanno la limitazione di essere applicabili solo alle strutture e alle condizioni corrispondenti a quelle esaminate nelle prove, sulla cui base si fondano.

Per poter avanzare quindi spiegazioni dei singoli problemi che possano portare a teorie di carattere generale è necessario che si continui sulla via già perseguita con la più larga raccolta di dati di notizie sulle prove fatte in laboratorio e su modelli oltre che sul comportamento delle opere eseguite, ponendoli in relazione fra loro.

Sotto questo punto di vista sorge pure il problema della misura sui dati dei fenomeni verificatisi nei terreni che assume, a causa della variabilità intrinseca delle loro caratteristiche fisiche, una duplice importanza. In primo luogo la necessità di ottenere molti dati per le verifiche e i confronti precedentemente menzionati; in secondo luogo le conseguenti difficoltà e complessità da superare nel meccanismo e nel sistema delle misure, per adeguare i risultati alle esigenze degli studi particolari.

Non si deve però anche dimenticare che se dal panorama di questi dati la variabilità di fatti e circostanze naturali è tale da escludere identità di condizioni, tuttavia sarà in grado almeno di condurre a definire il peso dei diversi fattori influenti.

Istituto di Costruzioni Marittime - Centro Geotecnico Veneto dell'Università di Padova, Settembre 1961.

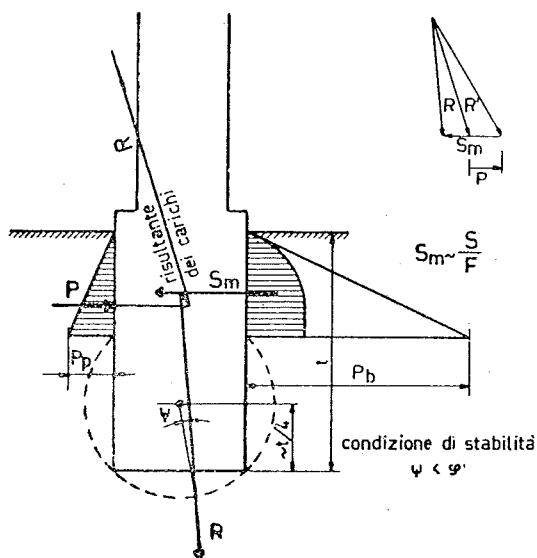


Fig. 2 - Schema dell'analisi di stabilità di una fondazione. P: spinta attiva (p_p : valore unitario massimo); S: spinta passiva (p_b : valore unitario massimo); F: coefficiente di sicurezza; S_m : spinta passiva mobilizzata; t: profondità della fondazione; ψ : angolo di deviazione fra la risultante e il raggio del cerchio di rotazione; R' : risultante dei carichi e del peso proprio; R: risultante di R' e di $S_m - P$.

situ». Ciò traspare sia dall'esame delle comunicazioni scritte che dalla discussione orale dove sono stati portati a conoscenza ulteriori dati di verifica fra cui si ricorda quelli riferiti da BJERRUM sulle misure eseguite nei lavori del « subway » di Oslo. Gli sforzi agenti sui vincoli dei sostegni degli scavi risultano circa il 50% maggiori di quelli previsti dalle formule di PECK; la distribuzione della spinta, se pure simile a quella trapezoidale di PECK, ha denotato una variazione con maggiore incidenza nella

Bibliografia

- [1] CAQUOT A., KÉRISEL J. - *Traité de mécanique des sols* - Gauthier-Villars Paris, 1956.
- [2] CAQUOT A. - *La pression dans les silos* - Proc. of fourth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. II, London 1957.
- [3] ESU F. - *Lavori del Congresso Europeo sui problemi della spinta dei terreni* - Geotecnica. vol. VI, n. 1, 1959.
- [4] FERRO G. - *Relazione generale sul tema "Fondazioni"* - Geotecnica, vol. VIII, n. 3, 1961.
- [5] KÉRISEL J. - *Rapport general. Poussés des terres sur les ouvrages et tunnels* - Compts rendus du quatrième Congrès International de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations. vol. II, London 1957.

- [6] ROWE P. W. - *Anchored sheet-pile walls* - Proc. of the Institution of Civil Engineers, vol. 1, n. 1. 1952.
- [7] ROWE P. W. - *A theoretical and experimental analysis of sheet-pile walls* - Proc. of the Institution of Civil Engineers, vol. 4. n. 1, 1955.
- [8] SKEMPTON A. W. - *General Report. Earth Pressure. Retaining Walls, tunnels and strutted excavation* - Proceedings of third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. II, Zurich 1953.
- [9] SOKOLOVSKI V. V. - *Statics of soil media* - Butterworths Scientific Publication, London 1960.
- [10] SPANGLER M. G. - *The distribution of normal pressure on a retaining wall due to concentrated surface load.* - Proceedings of first International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering vol. 1, Cambridge, Mass. 1936.
- [11] TERZAGHI K. - *Anchored bulkheads* - Transactions of the A.S.C.E., 1954.
- [12] TERZAGHI K. - *From theory to practice in soil mechanics (selections from the writings)* - John Wiley and Sons, New York-London 1960.
- [13] TSCHEBOTARIOFF G. P. - *Soil mechanics foundations and earth structures* - Mc Graw Hill, New York 1951.
- [14] BIAREZ J. et CAPELLE J. F. - *Contribution à l'étude de la rotation des fondations.*
- [15] BUISSON M. et COMEREE J. - *Essais sur Silos.*
- [16] DAVIN M. - *Déformation dans les milieux pulvérulents en état d'équilibre limite.*
- [17] DIBIAGIO E. et KJAERNSLI B. - *Strut Loads and Related Measurements on Contract 63a of the Oslo Subway.*
- [18] EDISON, S.A.D.E. et S.I.M.A. - *Construction of Concrete Diaphragms (Cut-off Walls) in Italy.*
- [19] GOLDER H. Q., HARDING H. J. et SEFTON JENKINS R. A. - *An Unusual Case of Underpinning and Strutting for a Deep Excavation Adjacent to Existing Buildings.*
- [20] HABIB P. et CHAZY C. - *Les piles du quai de Floride.*
- [21] KASSIFF G. et ZEITLEN J. G. - *Pressure Exerted by Piles Due to Lateral Earth Pressure.*
- [22] HUECKEL S. M. et KWASNIEWSKI J. - *Essais sur modèle réduit de la capacité d'ancrage d'éléments rigides, horizontaux enfouis dans le sable.*
- [23] ICHIHARA M. et TAKAGI S. - *Development of Seven-Face Earth Pressure Gauge.*
- [24] KASSIFF G. et ZEITLEN J. G. - *Pressure Exerted by Clay Soil on Buried Conduits.*
- [25] LEECH T. D. J. et PENDER E. B. - *Experience in Grouting Rock Bolts.*
- [26] PECK R. B. et IRELAND H. O. - *Full-Scale Lateral Load Test of a Retaining Wall Foundation*
- [27] PRAMBORG B. O. - *Plastic Equilibrium in Soil.*
- [28] DE REEPER F. J. - *Long-Term Measurement of Deformations in Concrete Tunnel Linings.*
- [29] ROWE P. W. et BRIGGS A. - *Measurements on Model Strutted Shear Pile Excavations.*
- [30] SCHOFIELD A. N. - *The Development of Lateral Force of Sand Against the Vertical Face of a Rotating Model Foundation.*
- [31] SUKLJE L. et VIDMAR S. - *Essais sur les effets provoqués par la retenue du fluage des sols.*
- [32] TROLLOPE D. H. et LEE I. K. - *The measurement of Soil Pressures.*
- [33] VERDEYEN J. et ROISIN V. - *Relations entre les effets des surcharges extérieures concentrées et les caractéristiques des écrans souples.*
- [34] WIKRAMARATNA P. H. D. S. - *A new earth pressure cell.*

Memorie presentate al Congresso di Parigi ⁽¹⁾

(1) L'elenco segue l'ordine secondo il quale le memorie compaiono negli atti del Congresso.

SOMMAIRE: On examine les communications, le rapport général et les discussions présentées au Cinquième Congrès International de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations, Paris 1961, dans la Section 5 (Efforts exercés par les sols sur les ouvrages).

SUMMARY: The Author reviews the papers, the general report and the discussions presented at the Fifth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris 1961, in the Division 5 (Earth Pressure on Structures and Tunnels).