La prima Conferenza Europea di giovani ingegneri e ricercatori geotecnici a Copenhagen

PAOLO SIMONINI*

SOMMARIO: L'articolo contiene un resoconto generale della prima Conferenza di Giovani Ingegneri e Ricercatori Geotecnici, tenutasi a Copenhagen dal 22 al 26 giugno 1987, e riassume brevemente alcuni fra i più interessanti contributi presentati, che purtroppo non sono stati raccolti in Atti Ufficiali.

1. Premessa

Dal 22 al 26 giugno 1987 si è svolta a Copenhagen, in Danimarca, la Prima Conferenza Europea per Giovani Ingegneri e Ricercatori Geotecnici, chiamata YGEC '87.

L'idea ispiratrice della conferenza, che era stata espressa nel Novembre 1986 dal Vice Presidente Europeo Prof. Krebs Ovesen, era quella di riunire 40-50 giovani ingegneri e ricercatori geotecnici per 3-4 giorni, per dare loro l'opportunità di presentare gli uni agli altri le proprie ricerche sotto la guida di un ristretto numero di membri anziani della Associazione Geotecnica Internazionale.

L'organizzazione della prima conferenza è stata assunta dalla Associazione Geotecnica Danese, che ha scelto quale luogo per lo svolgimento della stessa un «college» nella cittadina di Holte, sita nella immediata periferia della capitale. Nel college era stato previsto un perfetto trattamento di «pensione completa», in modo da consentire, non soltanto nelle ore riservate alla presentazione delle memorie, ma durante tutto l'arco della giornata, il continuo contatto e scambio di idee e conoscenze tra i partecipanti alla conferenza. La soluzione si è rivelata particolarmente indovinata, perché ha effettivamente consentito di stabilire tra i giovani ricercatori presenti alla conferenza rapporti che trascendevano i formalismi, caratteristici spesso dei congressi con elevato numero di partecipanti. Lo stesso clima disteso ed informale ha particolarmente favorito le discussioni.

All'invito dell'Associazione Geotecnica Danese, esteso alle 26 società nazionali europee, hanno risposto 13 società inviando alla conferenza 26 giovani ingegneri e ricercatori geotecnici; anche l'associazione Geotecnica Italiana ha inviato un rappresentante.

L'apertura dei lavori della conferenza è stata tenuta dal Prof. Ovesen, che ha ringraziato a nome della Associazione Geotecnica Danese tutti i partecipanti al convegno, esprimendo l'augurio che la conferenza dei giovani ricercatori geotecnici avesse un successo immediato e soprattutto futuro. Successivamente è stato commentato dal Prof. Ovesen un filmato storico, girato negli anni tra le due guerre mondiali, relativo alla costruzione di un ponte in Danimarca che collega la penisola dello Jylland all'isola di Fyn. In particolare il Prof. Ovesen ha messo in evidenza la tecnologia costruttiva delle fondazioni, costituite queste ultime, da cassoni galleggianti, realizzati a terra, e successivamente affondati nella posizione prevista per le pile. Dopo l'intervento del Prof. Ovesen, il Prof. Steenfeldt, dell'Università di Copenhagen, ha introdotto il tema generale dell'incontro ed i sottotemi della conferenza. Il tema generale riguardava la valutazione del «background» teorico nell'ingegneria geotecnica relativo al calcolo ed alla previsione delle condizioni di stato limite di rottura nei terreni. Sono stati individuati inoltre, all'interno del tema generale, i seguenti sottotemi:

1) scelta dei parametri geotecnici, desunti da prove in sito ed in laboratorio, necessari per il calcolo di progetto;

2) metodi di calcolo, con particolare riguardo alla teoria della plasticità, alle analisi elastoplastiche ed alla modellazione con il metodo degli elementi finiti e loro affidabiltà di impiego nella progettazione geotecnica;

3) modellazione di tipo fisico, relativamente a modelli in piccola e grande scala ed a modelli in centrifuga;

4) criteri per la valutazione del coefficiente di sicurezza nei confronti dello stato limite ultimo di rottura, con riferimento anche a metodi di tipo probabilistico;

5) «case hystories» con riferimento agli argomenti esposti nei primi quattro punti.

Nessun volume di atti della Conferenza era stato previsto dagli organizzatori; ogni partecipante era

* Dott. Ing. Paolo SIMONINI.
Istituto di Costruzioni Marittime e di Geotecnica, Facoltà di Ingegneria, Università di Padova.

quindi stato invitato a portare il proprio contributo, nella forma di un sommario esteso, direttamente a Copenhagen perché fosse distribuito a tutti i partecipanti.

Dopo un breve commento agli argomenti citati, il Prof. Steenfeldt ha messo in evidenza la struttura della conferenza, divisa per comodità di esposizione in 11 sessioni.

2. La presentazione dei contributi

Gli argomenti di ricerca proposti hanno interessato un ampio spettro di problematiche nell'ambito del tema proposto; alcuni contributi sono tuttavia risultati poco pertinenti, come ha rilevato lo stesso Prof. Steenfeldt, con le tematiche suggerite dagli organizzatori.

Nonostante le difficoltà di rendere omogenei i contributi proposti, sia a causa della diversità di indirizzo che di dettaglio, si è cercato di raccogliere in gruppi, per comodità espositiva, le ricerche che sembravano avere un comune denominatore. I gruppi, comprendenti ovviamente quelli dei sottotemi proposti come traccia per il convegno, sono sei:

- Modelli costitutivi;
- Modelli fisici;
- Modelli numerici;
- Soluzioni analitiche;
- Metodi probabilistici;
- Altri.

2.1 *Modelli costitutivi*

L'introduzione nella pratica professionale dell'elaboratore elettronico e la sua capacità di trattare con relativa facilità problemi di notevole complessità analitica ha dato negli ultimi decenni un notevole impulso allo sviluppo ed all'applicazione di leggi costitutive, capaci di descrivere con accuratezza il comportamento meccanico delle terre.

In questo filone si collocano i contributi presentati da M. Lojander dell'Università di Helsinki e da H. Dendani e B. Chau dell'Università di Grenoble che trattano di applicazioni di leggi costitutive esistenti a terreni reali.

Il contributo presentato da Lojander riguarda il comportamento meccanico di argille e limi caratteristici di alcuni siti della Finlandia. In particolare l'autore ha presentato i risultati di prove triassiali, drenate e non drenate, e di prove edometriche. La ricerca analizza sia il comportamento non drenato che quello drenato; per la rappresentazione analitica del primo l'autore propone l'impiego di funzioni di tipo iperbolico. La ricerca prende in considerazione inoltre il ben noto modello di Cam-Clay Modificato per la rappresentazione del comportamento meccanico dei terreni studiati; in relazione a ciò l'autore interpreta i risultati delle prove di laboratorio eseguite in termini dei cinque parametri caratteristici del modello stesso. L'applicabilità del modello sembra essere confermata, salvo qualche difficoltà nella completa caratterizzazione dell'incrudimento per i terreni studiati.

Dendani e Chau hanno presentato un modello costitutivo e la sua applicazione ai terreni con i quali viene costruita la diga in terra di Gran Maison in Francia, diga alta oltre 160 m. La ricerca è divisa in due parti: nella prima vengono presentati i risultati di prove triassiali eseguite sui terreni costituenti la diga; la seconda parte tratta l'applicazione dei risultati delle prove, relativamente ai soli materiali da filtro della diga, ad un modello costitutivo implementato in un codice ad elementi finiti. Il modello, di tipo incrementale e multilineare, è quello sviluppato da DARVE [1982] all'Università di Grenoble; in particolare la multilinearità incrementale è rappresentata da una relazione ottilineare tra gli incrementi della deformazione e della tensione (ad esempio il ben noto modello di DUNCAN e CHANG [1970] è di tipo bilineare). Il modello si presta alla rappresentazione del comportamento sia dei terreni coesivi che granulari, in condizioni di carico monotonico e ciclico; in particolare la sua applicazione ai terreni costituenti il filtro della diga fornisce, secondo gli autori, un buona previsione del comportamento reale, controllato, in questo caso, solamente con percorsi tensionali sugli assi principali delle tensioni.

2.2 *Modelli fisici*

Spesso, in passato, considerazioni basate sulla sola evidenza sperimentale hanno fornito un valido spunto per la formulazione di approcci analitici razionali.

I modelli fisici in generale rappresentano generalmente un modo di riprodurre la realtà fisica che presenta molteplici vantaggi:

- i modelli sono generalmente abbastanza economici e di preparazione abbastanza rapida, rispetto a situazioni in grande scala;
- essi possono essere agevolmente spinti fino alla rottura;
- con essi è possibile predeterminare e controllare le caratteristiche del terreno e tutti i parametri coinvolti nel problema in esame ed eventualmente cambiare le condizioni di prova in modo sufficientemente rapido;

– le esperienze possono essere facilmente ripetute, in modo da avere a disposizione un numero di dati sufficiente per considerazioni anche di tipo statistico.

Riguardo l'argomento modelli fisici, sono stati presentati sei contributi, quattro dei quali trattano problematiche relative ai pali, uno relativo alle fondazioni superficali ed un'altro relativo alla compattazione di sabbie con tecniche esplosive. I contributi che trattano i pali sono stati presentati da Van den Broeck, Haar, Dannemand e Evans, quello relativo alle fondazioni superficiali dallo scrivente e quello che tratta le tecniche esplosive da Woldringh.

Van den Broeck ha presentato un progetto di ricerca sperimentale, il cui svolgimento è attualmente in fase iniziale all'Università di Ghent, in Belgio. Lo scopo della ricerca è quello di analizzare il comportamento di pali in gruppo in terreno sabbioso caricati verticalmente. Il programma di ricerca si sviluppa principalmente attraverso la sperimentazione fisica su modello al fine di individuare l'effetto del numero di pali presenti nella palificata, della forma del gruppo (circolare, quadrata, ecc.), dell'interasse tra i pali, del posto occupato dal singolo palo all'interno del gruppo, del tipo di palo, della lunghezza dei pali, delle proprietà geotecniche dei terreni ecc., sul comportamento dell'intera palificata. Le prove verranno eseguite con pali modello, di diametro = 3,5 cm e di lunghezza = 1,8 m in un pozzo riempito con deposizione pluviale di sabbia secca in aria.

Il comportamento di pali in gruppo viene analizzato, con riferimento all'applicazione di carichi orizzontali, sia da Haar che da Dannemand, entrambi dell'Università di Copenhagen, per mezzo di studi su modello in centrifuga. Haar analizza l'effetto di gruppo nel caso di pali in sabbia secca sia nel caso di pali liberi che vincolati alla sommità. Nell'apparecchiatura centrifuga, che consente di rispettare alcune tra le più importanti condizioni di similitudine [Ovesen, 1979], vengono sottoposti a carico orizzontale monotonico e ciclico gruppi costituiti da un massimo di nove pali di alluminio (diametro = 1,6 cm, lunghezza = 37,5 cm) infissi in sabbia. Il campo di gravità artificiale generato è pari a 75 volte la gravità. A titolo di confronto vengono eseguite anche prove su pali singoli. I risultati ottenuti sperimentalmente vengono confrontati con le più recenti soluzioni teoriche sull'argomento esistenti in letteratura. In particolare vengono considerate le teorie di Poulos [1980], di Randolph [1980] e di Barton [1982]. Ad esempio in fig. 1 sono rappresentati i risultati sperimentali ottenuti con prove su gruppi di tre pali; in ascissa è

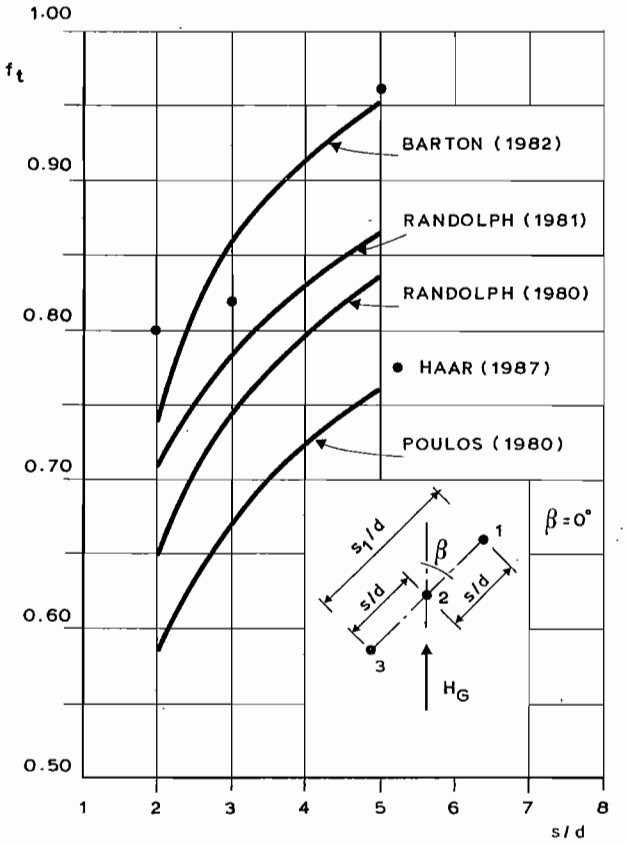

Fig. 1. - Fattore che individua l'effetto di gruppo in funzione dell'interasse tra i pali (Haar).

indicato in forma adimensionale l'interasse tra i pali ed in ordinata un fattore adimensionale f_t che individua l'effetto di gruppo. Osservando il diagramma è possibile osservare come la soluzione analitica del Barton sia quella che più si avvicina ai risultati delle prove eseguite. In generale sembra possibile concludere che l'interazione tra i pali del gruppo sia meno pronunciata di quanto è lecito attendersi dalle soluzioni teoriche; ciò sarebbe probabilmente imputabile, secondo l'autore della ricerca, alla non linearità intrinseca al comportamento meccanico del terreno sabbioso.

Le medesime esperienze in centrifuga eseguite da Haar vengono attualmente ripetute da Dannemand, però relativamente a pali infissi in terreno coesivo di media plasticità. In questo caso il terreno di fondazione viene preconsolidato con una pressa idraulica per circa 2-3 mesi; successivamente viene posizionato nella centrifuga e quindi vengono infissi nello stesso i pali modello. Le prove previste considerano l'applicazione di carichi ciclici sui pali singoli e sui gruppi di pali con un massimo di sei per gruppo.

Di indirizzo originale è la ricerca, ancora in fase iniziale, presentata da K. Evans dell'Università di Oxford. Essa tratta infatti della capacità portante di pali in roccia tenera, soggetti a carichi assiali. Lo studio viene eseguito impiegando una camera cilin-

drica di 45 cm di diametro, nella quale è possibile generare attorno ad un campione di roccia tenera uno stato tensionale, con tensione verticale e radiale indipendenti. All'interno della camera vengono eseguite prove di punzonamento della roccia, attraverso l'infissione di un palo modello di piccole dimensioni. Dalle prime esperienze sino ad ora eseguite è apparso come possano verificarsi rotture nella roccia sotto la punta sia di tipo fragile, caratterizzate dalla propagazione di fessurazioni di taglio, sia di tipo duttile, caratterizzate da scorrimento plastico illimitato, in funzione del livello di pressione di contenimento applicato nella camera di prova.

La ricerca presentata al convegno dall'autore di questo reportage riguarda l'esecuzione di prove su modello per fondazioni superficiali su sabbia in piccola scala. All'Università di Padova è stata recentemente progettata e realizzata un'apparecchiatura sperimentale che consente di eseguire prove di capacità portante con fondazioni modello di piccole dimensioni, in modo rapido ed agevole, con le più svariate condizioni di carico applicate alle fondazioni stesse. Una delle caratteristiche più importanti del modello è che esso dispone di un sistema totalmente automatizzato e controllato di preparazione di substrati di fondazione, che possono essere in questo modo predisposti con particolari caratteristiche di uniformità e omogeneità. Le prove fino ad ora eseguite hanno preso in considerazione il comportamento di fondazioni continue soggette a carichi inclinati. Sulla base dei risultati sperimentali ottenuti e dall'esame della letteratura sull'argomento viene proposto un approccio per il calcolo della capacità portante limite nel caso di carichi inclinati, approccio che si basa sulla determinazione sperimentale di diagrammi di interazione tra le sollecitazioni verticali ed orizzontali. Questi diagrammi rappresentano superfici di inviluppo limite delle condizioni di rottura del complesso terreno-fondazione e definiscono quindi al loro interno le condizioni di ammissibilità di carico per fondazioni soggette alla combinazione di sollecitazioni orizzontali e verticali.

Da considerarsi appartenente al gruppo delle esperienze di natura prevalemente sperimentale, è la ricerca presentata da R. Woldringh, dell'Università di Delft. Lo studio tratta del miglioramento dei terreni sabbiosi sciolti con l'impiego di esplosivi. La tecnica consiste nella detonazione a brevi intervalli di tempo di cariche esplosive, in modo da creare una eccitazione di tipo periodico (una carica singola crea un mezzo ciclo d'onda), capace di generare un addensamento nel terreno sabbioso sciolto. Le esperienze vengono condotte in una camera contenente 4,5 m^3 di sabbia satura. Nelle sei esperienze portate e termine fino ad ora si sono usate quattro piccole cariche esplosive, come frazione di una carica unica, fatte esplodere ad intervalli di tempo costanti. In fig. 2 sono riassunti i risultati più significativi delle prove eseguite a Delft. Sono riportati, a sinistra, il cedimento superficiale del terreno sabbioso, generato dalle esplosioni, e, a destra, il grado di liquefazione raggiunto (grado di liquefazione = u_r/σ dove u = pressione neutrale generata dell'esplosione e σ = tensione efficace). Nella prima colonna a sinistra sono rappresentati gli effetti ottenuti da una singola carica mentre nelle altre sono indicati gli effetti prodotti dalla medesima carica suddivisa in quattro frazioni uguali, fatte detonare ad intervalli di tempo costanti. È possibile osservare come suddividendo la carica si ottengono migliori risultati in termini di densificazione raggiunta dal terreno; se inoltre l'intervallo di tempo tra mezzo ciclo d'onda ed il successivo è minore del tempo richiesto per la dissipazione delle pressioni neutrali in eccesso, generate dalle esplosioni, si può raggiungere anche un grado di liquefazione elevato, con beneficio per la densificazione, come è stato messo in evidenza anche da Lee e Albaisa [1974].

2.3 *Modelli numerici*

I metodi numerici ed in particolare il metodo

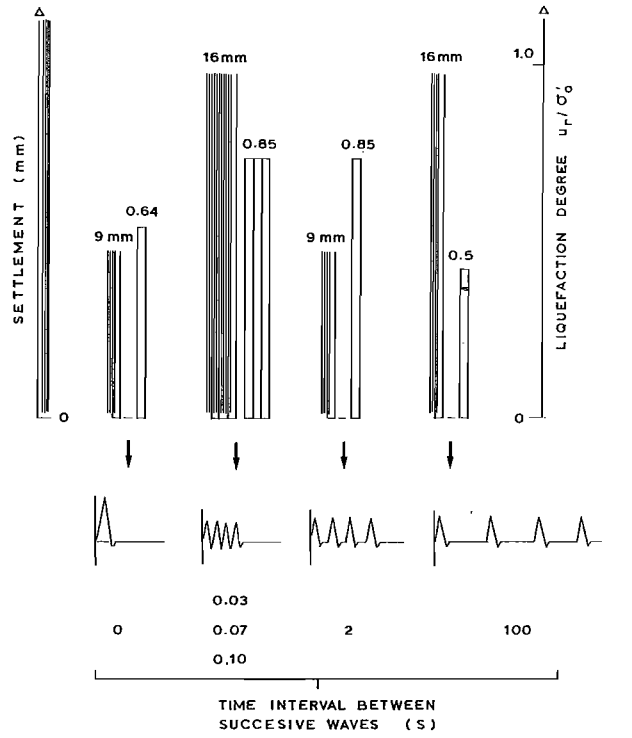

Fig. 2. - Risultati di prove di compattazione su modello con cariche esplosive (Woldringh).

degli elementi finiti rappresentano, al giorno d'oggi, un metodo classico, collaudato ed adottato con successo in numerosi campi della scienza e della tecnica. Tuttavia la sua applicazione ai problemi di meccanica delle terre è ancora un fatto abbastanza recente ed è in continua evoluzione. Lo spazio per la ricerca in questo settore è quindi ancora ampio e ricco di promesse per il futuro.

Generalmente due sono le caratteristiche principali che individuano un modello di tipo numerico:

- il modello costitutivo scelto per rappresentare il comportamento meccanico del terreno;
- l'algoritmo risolutivo sulla base del quale è stato sviluppato il codice di calcolo.

Tutte le ricerche presentate, con l'eccezione di una, trattano per lo più di applicazioni di modelli ad elementi finiti sviluppati presso le varie Università e Centri di ricerca; le leggi costitutive impiegate per la rappresentazione del comportamento del terreno sono di tipo elastico lineare e non lineare, elastoplastico secondo Mohr-Coulomb o Cam Clay.

Fra i più interessanti contributi si segnala quello presentato da O. Ozanam, dell'École Centrale de Paris, relativo alla modellazione della discontinuità nelle opere in terra che si generano quando queste ultime sono prossime alle condizioni limite. Il fenomeno viene riprodotto con l'impiego di un codice elastoplastico ad elementi finiti, che utilizza sia elementi «normali», caratterizzati da superfici di plasticizzazione che possono variare dal tipo Mohr-Coulomb al tipo Cam Clay (il concetto di uno stato critico generalizzato è stato incorporato nel modello) con legge associata del flusso plastico solamente nel piano deviatorico, e da elementi d'interfaccia, che consentono lo scorrimento relativo in corrispondenza ai nodi secondo una legge di attrito del tipo Mohr-Coulomb. Sono state impiegate mesh con elementi normali e mesh con la combinazione dei due tipi (gli elementi normali sono interconnessi tra loro in corrispondenza ai nodi tramite gli elementi d'interfaccia) per riprodurre il comportamento di prove triassiali su sabbia densa. In particolare la modellazione della discontinuità, con l'impiego degli elementi d'interfaccia, risulta allo stato attuale condizionata dall'impiego di mesh opportune, nelle quali le linee di interconnessione tra gli elementi contigui seguano l'andamento prevedibile delle linee di scorrimento reali. Nel caso della prova triassiale la condizione viene raggiunta, come era logico aspettarsi, solamente impiegando gli elementi d'interfaccia su una linea che presenta un'inclinazione di $(45° + \varphi/2)$ con l'orizzontale.

La ricerca di Van den Berg, dell'Università di Delft, presenta lo studio sperimentale e numerico dello stato di sollecitazione e di deformazione nelle tubazioni flessibili interrate, usate in Olanda per la distribuzione del gas naturale, per effetto del peso proprio del terreno e delle deformazioni indotte nel terreno stesso dalla compattazione, dal traffico e dalla escursione del livello di falda. Per quanto riguarda la parte sperimentale della ricerca viene illustrato uno strumento per la misura delle deformazioni trasversali dei tubi flessibili in direzione orizzontale e verticale. La parte numerica tratta dello sviluppo di un codice di calcolo ad elementi finiti, in condizioni di deformazione piana, nel quale sono incorporate differenti leggi costitutive per le tubazioni e per il terreno circostante. Nel caso delle tubazioni il legame costitutivo è del tipo viscoelastico lineare mentre nel caso del terreno può essere sia elastico che elastoplastico del tipo Mohr-Coulomb, con variazione del modulo di Young nel tempo. Dalle analisi numeriche eseguite e dal confronto con i dati sperimentali ottenuti appare come il comportamento del complesso tubazione-terreno sia dipendente dalla variabile tempo, variabile che controlla l'evoluzione delle rigidezze della tubazione e del terreno e che condiziona, di conseguenza, lo stato di sollecitazione nella tubazione stessa fino al collasso. A titolo di esempio si riportano i risultati delle analisi numeriche eseguite in terreno sabbioso. In questo caso il parametro controllato dalla variabile tempo è la densità relativa della sabbia, densità che varia secondo quanto indicato in fig. 3a. In figura 3b è riportato l'andamento nel tempo dell'abbassamento verticale della tubazione; è possibile osservare come esso sia suddiviso in una parte irreversibile, causata dalla compattazione del terreno sabbioso, ed in una reversibile, dovuta, ad esempio, al traffico veicolare pesante.

Di tipo numerico-progettuale sono i contributi proposti da F. Breinlinger, dell'Università di Stoccarda, da K. Kunz, del Corpo di Ingegneri Idraulici della Repubblica Federale Tedesca e da A. Bond, dell'Imperial College di Londra.

Il primo ha messo in evidenza la validità di impiego del FEM per la progettazione ed il calcolo delle gallerie costruite in trincee aperte. La sua applicazione tratta dell'impiego del FEM in condizioni di deformazione piana per determinare i diagrammi di carico per gallerie interrate, diagrammi che possono essere usati come input di progetto per programmi di calcolo automatico del tipo a telaio. Nella ricerca viene analizzata l'influenza sui diagrammi di carico di una varietà di parametri diversi, comprendenti lo spessore e la forma dello strato di riporto sopra la galleria, le condizioni di contatto tra terreno e galleria, il comportamento

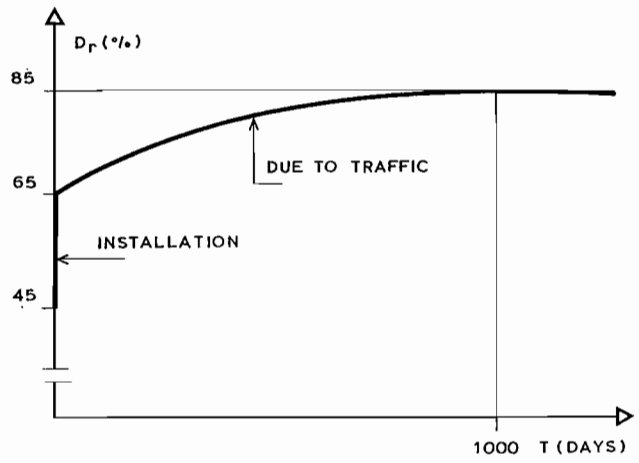

Fig. 3(a). - Relazione densità relativa-tempo per un terreno sabbioso (Van Den Berg).

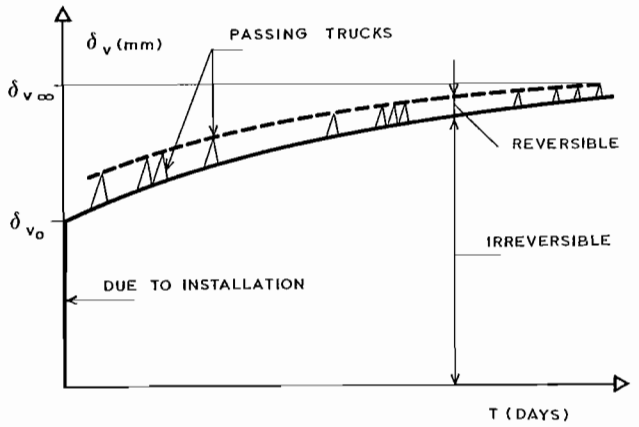

Fig. 3(b). - Abbassamento verticale della tubazione in funzione del tempo (Van Den Berg).

lineare o non lineare del terreno. Come conclusione dello studio Breinlinger propone di impiegare, per ragioni di sicurezza, i diagrammi di carico determinati con l'analisi di tipo lineare piuttosto che con quella di tipo non lineare. Secondo l'autore, la scelta è dovuta principalmente al fatto che, in questo caso particolare, un'analisi non lineare fornisce una sovrastima del contributo di sostegno fornito dal terreno ai lati della galleria, contributo che nasce come conseguenza della ridistribuzione delle tensioni, operata in regime non lineare, dall'algoritmo di calcolo.

La progettazione dei dreni orizzontali nelle dighe in terra omogenee è il tema della ricerca presentata da K. Kunz. Il contributo considera la predisposizione di diagrammi di progetto per la scelta delle dimensioni dei drenaggi orizzontali, basandosi su un'analisi del moto di filtrazione nella diga e nel dreno stesso eseguita con il FEM. In particolare ciò che interessa maggiormente è la determinazione dello spessore del dreno; dalle analisi numeriche eseguite è apparso come lo spessore risulti funzione di molteplici parametri che governano il moto di filtrazione, fra i quali quello determinante è il rapporto fra le permeabilità del dreno stesso e della diga. Fra tutte le variabili è infatti la permeabilità la variabile principale in ogni problema di filtrazione.

Il comportamento di un rilevato costruito su argille molli è il tema della memoria presentata da A. Bond. Egli pone in evidenza i limiti della progettazione di rilevati con l'impiego del solo metodo dell'equilibrio limite. Infatti questo metodo non fornisce informazioni riguardanti l'entità dei movimenti nel terreno di fondazione e se essi risultino eccessivi, anche senza che siano raggiunte le condizioni di stabilità limite. Le analisi numeriche consentono invece di riprodurre nel dettaglio il comportamento del terreno di fondazione anche in uno stato prossimo alla rottura, tenendo conto di tutte le condizioni al contorno. Nel caso presentato, il comportamento del terreno di fondazione, costituito da un banco di argilla molle la cui crosta superficiale è fortemente sovraconsolidata, è rappresentato tramite il modello costitutivo Cam-Clay Modificato, che, come è noto, riproduce gli aspetti principali del comportamento meccanico dei terreni coerenti con l'impiego di cinque soli parametri significativi. Come conclusione dello studio ad elementi finiti Bond mette in evidenza che - in primo luogo - il cedimento massimo non si verifica al centro del rilevato ma in corrispondenza al bordo superiore - in secondo luogo - il profilo degli spostamenti in condizioni non drenate lascia intravvedere la formazione di un meccanismo di scorrimento circolare in prossimità della rottura - in terzo luogo - la crosta superficiale sovraconsolidata agisce in modo da contrastare gli spostamenti orizzontali del terreno di fondazione e - da ultimo - le diverse condizioni di drenaggio nelle varie fasi costruttive possono alterare in modo sostanziale i movimenti del terreno di fondazione. Queste ultime devono essere quindi riprodotte in modo corretto (dal momento che tutte le argille naturali mostrano in realtà un certo grado di preconsolidazione è evidente che nella prima fase di carico la pressione neutrale in eccesso si dissipa molto più rapidamente che nelle fasi successive) se si vuole modellare in modo accurato il comportamento reale del rilevato.

La consolidazione di tipo primario e secondario è l'argomento di ricerca presentato da L. Johansson dell'Università svedese di Lulea. L'autore presenta gli sviluppi e le possibili applicazioni di un codice di calcolo automatico basato sul metodo degli strati finiti (FLM = Finite Layer Method). Il metodo (si veda, ad esempio, BOOKER e SMALL [1982]) risolve le equazioni differenziali parziali caratteristiche del fenomeno riducendole, attraverso una trasformata

di Fourier, a equazioni differenziali ordinarie. Uno dei limiti del metodo è che esso è applicabile soltanto nel caso di situazioni stratigrafiche molto semplici, formate da strati orizzontali uniformi di spessore finito.

2.4 *Soluzioni analitiche*

Prima dello sviluppo dei metodi numerici, le soluzioni di tipo analitico hanno sempre rappresentato sinteticamente l'essenza di ogni problema della realtà fisica e quindi anche di quella geotecnica. I metodi numerici stessi si basano su concetti analitici sviluppati in passato.

Un valido contributo riguardante lo sviluppo di nuove soluzioni analitiche per la meccanica delle terre è quello presentato da P. De Buhan, dell'École Politechnique de Paris. Esso tratta della teoria degli stati limite ultimi applicata all'analisi di stabilità delle terre armate. L'autore presenta un approccio di tipo cinematico al problema, approccio che utilizza meccanismi di rottura del terreno caratterizzati da blocchi rigidi, per ottenere soluzioni di equilibrio limite che rappresentano dei limiti superiori rispetto alla soluzione reale [CHEN, 1975]. L'approccio cinematico rappresenta un metodo che, a differenza dei metodi classici dell'equilibrio limite globale, è analiticamente esatto perchè basato sul Teorema dei Lavori Virtuali ed ha quindi un suo preciso significato fisico nella statica dei solidi. Il metodo può essere applicato con successo anche alle scarpate in terra armata nel caso in cui la distribuzione dei rinforzi sia uniforme (usualmente i rinforzi sono formati da sottili striscie metalliche ed il terreno costituente la scarpata è di natura granulare). In questo caso il terreno viene rappresentato come un materiale omogeneo ed anisotropo, il cui comportamento limite può essere interpretato da un criterio di rottura come quello di fig. 4a. Il criterio altro non è che il Mohr-Coulomb, modificato per tenere conto della resistenza a trazione σ_o dei rinforzi. La stabilità di una scarpata costituita da un materiale omogeneo ed anisotropo come quello descritto in precedenza, è governata dal fattore di stabilità $K = \gamma h/\sigma_o$ (N_s nella letteratura tradizionale) che viene calcolato dall'applicazione del teorema dei lavori virtuali al meccanismo cinematico di fig. 4b. I valori trovati sono corrispondenti ad un meccanismo di rottura caratterizzato da una spirale logaritmica, e rappresentano un limite superiore alla soluzione reale. Il metodo potrebbe essere forse perfezionato, includendo la possibilità di rottura per sfilamento dei rinforzi dal terreno.

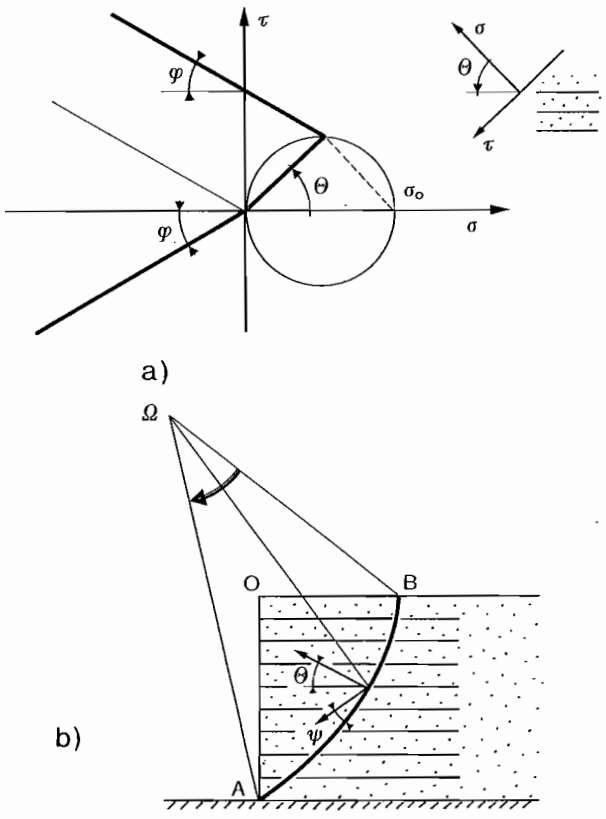

Fig. 4(a, b). - Criterio di rottura modificato e calcolo a rottura per una scarpata in terra armata con il metodo di omogeneizzazione (De Buhan).

2.5 *Metodi probabilistici*

I metodi probabilistici sono, al giorno d'oggi, tra quelli più efficienti per tenere conto delle inesattezze presenti in ogni tipo di progettazione ed in particolare in quella geotecnica. Il parametro che, nell'analisi probabilistica, sostituisce il coefficiente di sicurezza FS tradizionale è l'indice di affidabilità. Questo indice esprime un concetto di sicurezza più completo rispetto a quello usuale in quanto tiene conto delle inesattezze nella definizione di un determinato parametro geotecnico significativo per il problema in esame. Ciò avviene tenendo conto sia del valore medio del parametro, che rappresenta, in una distribuzione normale, la migliore stima dello stesso (ed è la pratica tradizionale), sia della sua varianza, che esprime la grandezza dello scarto possibile per il medesimo parametro rispetto al valore medio. Il problema della determinazione dell'indice di affidabilità per situazioni complesse diventa risolvibile generalmente per via numerica.

Un metodo per la sua valutazione nel caso della stabilità di paratie con ancoraggio, realizzate sia in terreno granulare che coerente, è quello presentato da S. Lotvonen dell'Università finlandese di Oulu. Nella ricerca il metodo di calcolo impiegato è il «free earth support» e ad esso vengono applicati i concetti della teoria delle probabilità assumendo

per le variabili in gioco una distribuzione di tipo normale. I risultati ottenuti dalle analisi eseguite utilizzando un algoritmo iterativo per la ricerca dell'indice di affidabilità, mostrano una particolare sensibilità del metodo di calcolo nei confronti della resistenza al taglio del terreno.

T. Guttormsen, dell'Istituto Geotecnico Norvegese, ha presentato un consistente contributo che tratta di un approccio probabilistico al calcolo della capacità portante con carichi assiali per pali impiegati come fondazioni per le strutture offshore. L'approccio tiene conto non solo della media e della varianza, ma anche della covarianza, parametro quest'ultimo, che esprime il grado di associazione fra le variabili e cioè di quanto si riduce il grado di incertezza delle variabili stesse conoscendo l'esatto valore di una di esse. Il calcolo del palo, eseguito attraverso un programma di calcolo, prende in considerazione il contributo alla capacità portante fornito dalla punta e dall'attrito laterale. I due contributi vengono schematizzati come funzioni che tengono conto dei parametri geotecnici significativi ai fini del calcolo e della incertezza nella loro esatta determinazione. Ad essi vengono applicati i concetti della teoria delle probabilità; si ottiene così una funzione generale che individua la distribuzione probabilistica della capacità portante per il palo tipo. In fig. 5 viene riportato, a titolo di esempio, il risultato di un calcolo applicato ad un palo in terreno multistrato, con punta in terreno coesivo, di lunghezza pari a 85 m, palo per il quale era richiesta una capacità portante di progetto di 35 MN. Dal calcolo è risultato che con un coefficiente di sicurezza pari a 1,4 l'indice di affidabilità è 3,4, al quale corrisponde una probabilità di rottura di 10^{-4}. In particolare è apparso come il grado maggiore di incertezza nel problema in esame (posto uguale a 100 il totale) sia concentrato nella determinazione dell'attrito nei terreni coesivi sotto i 45 m (78%).

2.6 *Altri*

Vengono raccolti sotto la dizione «altri» quegli studi che non si inquadrano nelle tematiche precedenti e che riguardano ad esempio «case hystories», misure sperimentali in sito, uso di nuove tecnologie esecutive ecc.

Tra essi i più interessanti sono sembrati quelli presentati da H. Stundner, del Politecnico di Vienna e di T.R. Postma, dell'Università di Delft.

Lo studio di Stundner tratta del consolidamento di uno scavo di 7,5 m di profondità eseguito nel flysch, in una zona alla periferia di Vienna. Il comportamento del flysch è piuttosto complesso; in condizioni indisturbate esso è assai simile a quello di un ammasso roccioso ma per effetto degli agenti atmosferici può degradarsi completamente. La formazione dove viene eseguito lo scavo è soggetta ad elevati fenomeni di filtrazione. La difficoltà delle condizioni geotecniche del sito e la necessità di contenere al massimo lo spazio occupato dalle scarpate dello scavo hanno quindi suggerito l'impiego di opere di consolidamento adattabili e flessibili. In relazione a ciò la scelta è caduta su un sistema misto, composto da rinforzi metallici flessibili («soil nailing») e da piastre di calcestruzzo di piccolo spessore ancorate nella formazione flyschoide. Il calcolo di progetto della stabilità complessiva dell'opera viene eseguito con il metodo cinematico [STOCKER *et al.*, 1980], con meccanismi di rottura che interessano sia la zona di terreno rinforzata che la zona esterna ai rinforzi stessi (fig. 6a, b e c), mentre il calcolo delle tensioni sulle

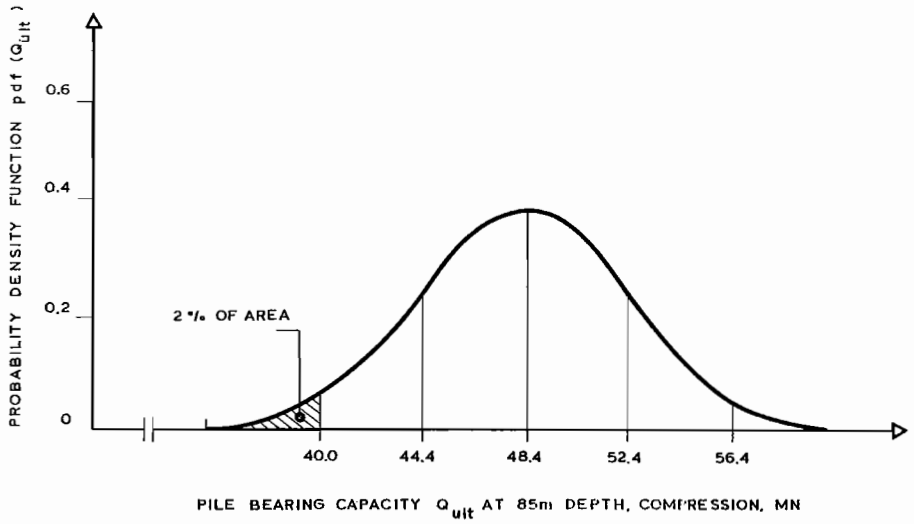

Fig. 5. - Funzione che rappresenta la densità di probabiltà per la capacità portante di un palo caricato assialmente di lunghezza pari a 85 m (Guttormsen).

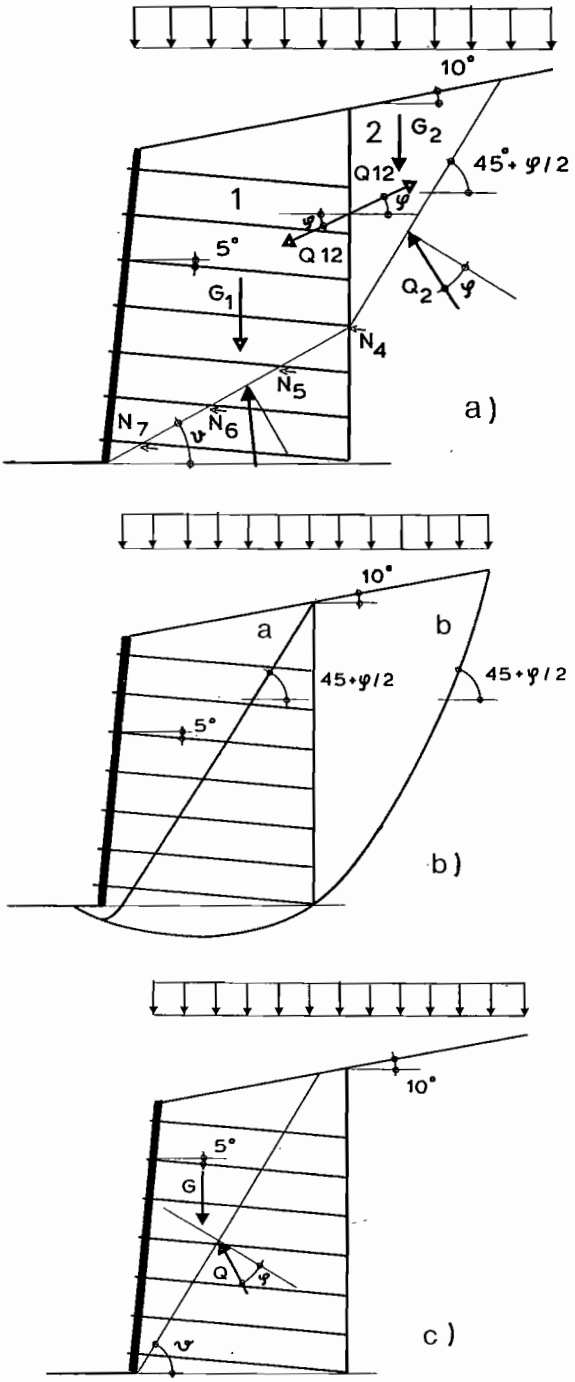

Fig. 6(a, b, c). - Analisi di stabilità (Stundner).

piastre e delle deformazioni nel complesso, in condizioni di esercizio, viene eseguito con l'applicazione del FEM. L'opera è strumentata con celle di pressioni, inclinometri ed estensimetri per il controllo del comportamento immediatamente al termine della costruzione e nel tempo; i risultati delle misure eseguite fino ad ora hanno indicato un ottimo comportamento dell'opera di stabilizzazione del versante artificiale, con spostamenti della parete in condizioni di esercizio variabili da 1 a 3 mm (0,4% dell'altezza totale della parete).

Un'altra ricerca che presenta aspetti di notevole interesse è quella presentata da T.R. Postma. Lo studio tratta del controllo della stabilità di rilevati arginali, costruiti in più fasi, attraverso la misura delle pressioni neutrali nel terreno argilloso di fondazione. Il problema degli argini e delle dighe a difesa delle maree è un problema tipicamente olandese, dal momento che la maggior parte del territorio dei Paesi Bassi è posto sotto il livello del mare. Il progetto di difesa del suolo prevede quindi la costruzione di nuove opere di protezione ed il sopralzo di quelle esistenti. In relazione a ciò si è sentita la particolare esigenza (come è noto il grado di pericolosità di un'eventuale rottura di un'opera di difesa è molto elevato in Olanda) di disporre di un metodo diretto di osservazione e controllo della stabilità dei rilevati durante tutta la durata dei lavori di costruzione, lavori che talvolta si protraggono per tempi anche molto lunghi. Il metodo consiste nel posizionare in una zona del terreno di fondazione celle per la misura delle pressioni neutrali, secondo lo schema di fig. 7a. È noto infatti, anche da analisi numeriche ad elementi finiti, che la rottura nel terreno inizia appena al di sotto del bordo superiore del rilevato, per estendersi lateralmente come indicato in fig. 7b (zone 1-2-3-4) fino al collasso totale. L'applicazione di un carico in condizioni non drenate può indurre in qualche punto nel terreno il raggiungimento di una condizione di rottura locale determinabile in modo analogo a quanto indicato da SKEMPTON [1954]. Se viene aggiunto un ulteriore incremento di carico a quello esistente, si genera una migrazione di tensioni dalle zone già plasticizzate a quelle immediatamente circostanti, ancora distanti dalla rottura. Come conseguenza della migrazione delle tensioni nascono ulteriori incrementi di pressione neutrale nelle zone non in condizione plastica che si sommano a quelli esistenti. In relazione a ciò, una volta note le caratteristiche geotecniche dei terreni di fondazione desunte da prove di laboratorio, è possibile individuare, sulla base del confronto tra i livelli di pressione neutrale misurati in sito e quelli previsti con un calcolo analitico, quelle zone nelle quali il terreno ha raggiunto lo stato limite di rottura per taglio. Con questo metodo può essere calcolato il grado di mobilitazione della resistenza al taglio nel terreno, definito dal parametro N in figura 7a. Inoltre, sulla base delle misure e calcolazioni eseguite, è possibile anche effettuare previsioni del comportamento futuro del terreno di fondazione in relazione ad ulteriori incrementi di carico.

Per ultimo si ricordano i contributi presentati da F. Van Weele del TNO di Delft, di K. Traczynski, del Politecnico di Varsavia, di A. Coutinho, del Laboratorio di Ingegneria Civile di Lisbona, e di

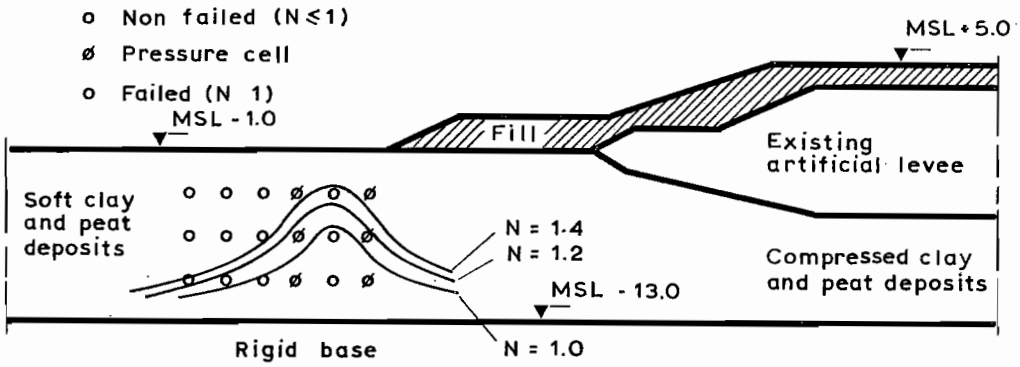

Fig. 7(a). - Distribuzione delle celle di pressione neutrale nel terreno (Postma).

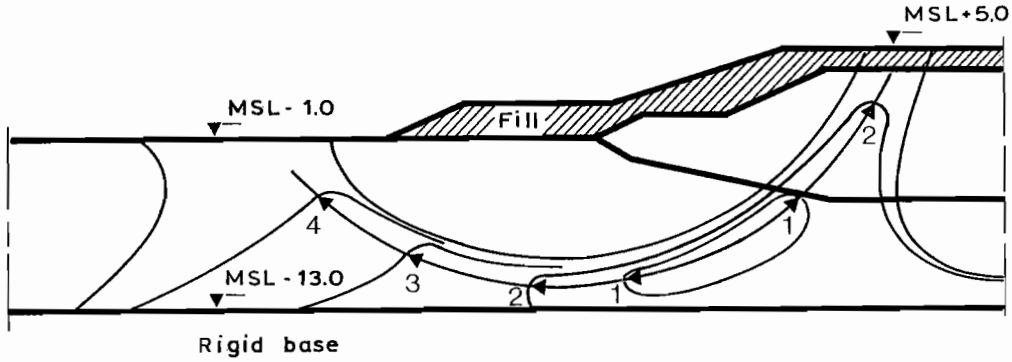

Fig. 7(b). - Sviluppo delle zone in condizione plastica nel terreno (Postma).

C. Christensen dell'Impresa Christiani e Nielsen.

Il primo contributo, di natura prevalentemente tecnico commerciale, mette in evidenza l'efficacia dei metodi basati sulla riflessione dell'onda di sollecitazione per la misura della integrità dei pali; il secondo fornisce dei cenni riguardo l'impiego di una sostanza chiamata «Emulgat» per il sostegno degli scavi eseguiti per la realizzazione della metropolitana di Varsavia; il terzo contributo tratta dell'interpretazione di alcune prove eseguite con il pressiometro autoperforante per mezzo di un programma di calcolo automatico e l'ultimo fornisce una descrizione della teoria della spinta delle terre di Brinch Hansen applicata al calcolo delle paratie.

3. Conclusioni e commenti

L'idea di riunire un gruppo di giovani ricercatori geotecnici per dare vita ad una conferenza espressamente a loro dedicata si è rivelata senza dubbio molto azzeccata sotto molteplici punti di vista.

Innanzitutto è sembrata ideale la scelta di un luogo per lo svolgimento dei lavori che stimolasse in modo particolare lo stare insieme dei partecipanti non solo durante le sessioni dedicate alla presentazione delle memorie, ma anche nelle ore libere. Da questo punto di vista la scelta di un «college» che creasse un'atmosfera per così dire «studentesca» è apparsa piuttosto indovinata sia nella forma che nella sostanza.

In secondo luogo, il clima di estrema cordialità che si è subito instaurato anche durante la presentazione delle memorie e durante la discussione, che seguiva con ampio contributo di tutti i partecipanti, è stato oltremodo stimolante e coinvolgente.

Va rilevato che fra i contributi presentati se ne sono distinti alcuni rispetto ad altri – si citano ad esempio i lavori di Ozanam e Bond nel campo della modellazione numerica, di Dannemand-Haar e Evans per i modelli fisici, di De Buhan per le soluzioni analitiche, di Postma per quanto riguarda il controllo e l'interpretazione delle misure in sito – che hanno fatto intravedere un panorama europeo di ricerca in continua crescita e sviluppo.

Un appunto può essere forse fatto riguardo l'aderenza dei contributi presentati al tema della conferenza: a tale proposito soltanto 15 su 23 (65%) sono risultati pertinenti al problema del calcolo a rottura in ingegneria geotecnica.

Inoltre dovrebbe essere tenuta presente l'utilità di disporre di informazioni dettagliate sulle ricerche che vengono presentate; un articolo completo, anziché un sommario esteso, sarebbe senz'altro più opportuno.

Concludendo, la prima conferenza di giovani ricercatori geotecnici, sia da un punto di vista tecnico che sociale, si è rivelata un indubbio suc-

cesso, merito questo anche dell'ottima organizzazione dimostrata dalla Associazione Geotecnica Danese. Essa è stata altresì un valido mezzo per lo scambio informale di opinioni diverse, condizione necessaria per la crescita e lo sviluppo di nuove idee nell'ingegneria geotecnica.

BIBLIOGRAFIA

BOND A. - *A Finite Element Study into the Behaviour of Embankments on Soft Clay*. Imperial College, London, U.K.

BREINLINGER F. - *The FEM as Design Aid for Tunnels in Open Cuts*. Institut fuer Grundbau und Bodenmechanik, Universitaet of Stuttgart, F.R. Germany.

DE BUHAN P. - *Collapse Design of Reinforced Soil Structures*. Ècole Politechnique, Palaiseau, France.

CHRISTENSEN C.T. - *Sheet Pile Walls according to J. Brinch Hansen's Earth Pressure Theory*. Christiani & Nielsen, Copenhagen, Denmark.

COUTINHO S.G. - *An Intrepretation Method of Selfboring Pressuremeter Tests*. Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.

DANNEMAND J. - *Laterally Loaded Model Piles in Clay Tested in a Centrifuge*. Danish Geotechnical Institute, DGI, Denmark.

DENDANI H. e CHAU B. - *A Constitutive Model and Applications to Earth Dam Materials*. Institut de Mecanique de Grenoble, France.

EVANS K. - *The Endbearing of Deep Foundation in Intact Soft Rock*. University of Oxford, U.K.

GUTTORMSEN T.R. - *Reliability Approach for Offshore Pile Desing*. Norvegian Geotechnical Institute, Norway.

HAAR F. - *Group Effect for laterally loaded Piles in dry Sand*. Technical University of Denmark.

JOHANSSON L. - *A Computer Program for the Calculation of Primary and Secondary Consolidation in Uniformly Layered, Homogeneous Soil Profiles*. Technical University, Lulea, Sweden.

KUNZ C. - *Design Charts for Horizontal Underdrains in Homogeneous Earth Dams*. Federal Waterway Engineering, F.R.G.

LOJANDER M. - *Mechanical Behaviour of Clay and Silt*. TKK, Rak, Finland.

LOTVONEN S. - *The Safety of an Anchored Sheet Pile Wall determined by the Reliability Index Method*. University of Oulu, Finland.

OZANAM O. - *Developments in Numerical Modeling of Discontinuities*. Ècole Centrale de Paris, France.

POSTMA T.R. - *Excess Pore Water Pressure Measurement as a Method for Embankment Stability Control*. Delft Geotechnics.

SIMONINI P. - *Small Scale Model Tests of Shallow Foundations on Sand under Inclined Loads*. Istituto di Costruzioni Marittime e di Geotecnica, Università di Padova.

STUNDNER H. - *Soil Nailing and Anchored Walls*. Technical University, Vienna, Austria.

TRACZYNSKI K. - *Research Concerning the Possibilities of Utilizing EMULGAT in the Construction fo Warsaw Underground*. Institute of Roads and Bridges, Warsaw Technical University, Warsaw, Poland.

VAN DEN BERG P. - *Analysis of buried flexible pipes*. Delft Geotechnics, The Netherlands.

VAN DEN BROECK M. - *The Behaviour of Pile in Group*. University of Ghent, Belgium.

VAN WEELE A.F. - *Application of Stress Wave Theory in foundation Engineering*. TNO Institute for Building Material and Structures, Delft, The Netherlands.

WOLDRINGH R.F. - *Dynamic Soil Compaction*. Delft University of Technology, The Netherlands.

BIBLIOGRAFIA AGGIUNTIVA

BARTON Y.O. (1982) - *Laterally loaded Model Piles in Sand: Centrifuge Tests*. Ph. D. Thesis, Cambridge University, U.K.

BOOKER J.R. & SMALL J.C. (1982) - *Finite Layer Analysis of Consolidation* 1. Int. J. Num. An. Meth. in Geom., Vol. 6, 151-171.

CHEN W.F. (1975) - *Limit Analysis and Soil Plasticity*. Elsevier.

DARVE F. & LEBANIEH S. (1982) - *Incremental Constitutive Law for Sands and Clays: Simulation of Monotonic and Ciclic Tests*. Int. J. Num. An. Meth. in Geom., Vol. 6, 243-275.

DUNCAN J.M. & CHANG C.Y. (1970) - *Non linear analysis of stress-strain in soils*. J. Soil. Mech. Div., 96, 1628-1653.

LEE K.L. & ALBAISA A. (1974) - Earthquake Induced Settlements in Saturated Sands, J. Geot. Eng. Div. ASCE, GT4, 387-406.

OVESEN K. (1979) - *Discussion*. Proc. Int. Conf. on Soil Mech. Found. Eng., Vol. 4, 318-323.

POULOS H.D. & DAVIS E.H. (1980), *Pile Foundation Analysis and Design*. Series in Geotechnical Engineering, John Wiley e Son.

RANDOLPH M.F. (1980), PIGLET - *A Computer Program for the Analysis and Design of Pile Group under General Loading Condition*. Cued Soils TR91, Cambridge University, U.K.

SKEMPTON A.W. (1954) - *The Pore-Pressure Coefficient A and B*. Geotechnique, Vol. 4, No. 4, 143-147.

STOCKER M.F., KOEBERG G.W., GASSLER G., GUDEHUS G. (1979) - *Soil Nailing*. Proc. Coll. Int. sur le Renforcement del Sols (2), 469-474, Paris.

SUMMARY

The First Young Geotechnical Engineers' Conference YGEC '87

A general review of the First Young Geotechnical Engineers' Conference, held in Copenhagen from 22th to 26th June 1987, is given in the paper. The most interesting contributions presented at the Conference are also briefly summarized in the paper.