Le fondazioni delle dighe di terra nell'Italia meridionale e in Sicilia; rassegna dei caratteri meccanici delle formazioni argillose di base

R. JAPPELLI *

SOMMARIO: Vengono passati in rassegna i caratteri fisico-meccanici delle formazioni argillose del Mezzogiorno d'Italia e della Sicilia su cui poggiano alcune dighe, mettendo in evidenza le difficoltà che si incontrano nelle indagini e nella caratterizzazione e delineando alcuni possibili sviluppi.

1. Introduzione

Nel mio intervento mi propongo di presentare un quadro, che sarà necessariamente sommario e perciò lacunoso, dei caratteri fisico-meccanici delle formazioni, sulle quali poggiano alcune dighe italiane, come risulta dai dati riportati nelle memorie presentate al Convegno o già noti sulla letteratura, ricca ormai di contributi sull'argomento. Con l'occasione vorrei prospettare le difficoltà che si incontrano nelle indagini e nella caratterizzazione di tali formazioni ai fini della ricerca progettuale e proporre, infine, per la discussione, alcuni temi, sui quali si avvertono ancora gravi lacune nella conoscenza e nella posizione dei problemi geotecnici.

Limito le considerazioni all'Italia Meridionale ed alla Sicilia, dove, per opera della Cassa per il Mezzogiorno, delle Regioni, dell'ENEL e degli enti di sviluppo, fra i quali l'Ente Irrigazione Puglia e Lucania, nonché l'Ente Sviluppo Agricolo per la Sicilia, sono state realizzate nel dopo-guerra o sono in corso di costruzione numerose ed assai interessanti opere, che offrono ormai spunto per tentare qualche preliminare considerazione di sintesi della materia (fig. 1).

In questa sede non posso presentare altro che un indice del materiale, che è stato possibile raccogliere nel brevissimo tempo, poco più di un mese, assegnatomi dal Comitato Organizzatore. Mi conforta, tuttavia, la convinzione che il confronto, anche sommario, di notizie e dati sperimentali di diversa origine e con vario grado di approfondimento, è sempre utile ed istruttivo.

Poggerò le considerazioni su risultati di studi iniziati sull'argomento, quasi 30 anni or sono, dal gruppo dei ricercatori di Napoli guidati dal Prof. A. CROCE, del quale ho fatto parte e del quale continuo a considerarmi idealmente partecipe, e proseguiti poi in Sicilia con l'aiuto di più giovani collaboratori, alcuni dei quali qui presenti e che nelle discussioni potranno aggiungere qualche elemento alla mia scarna esposizione.

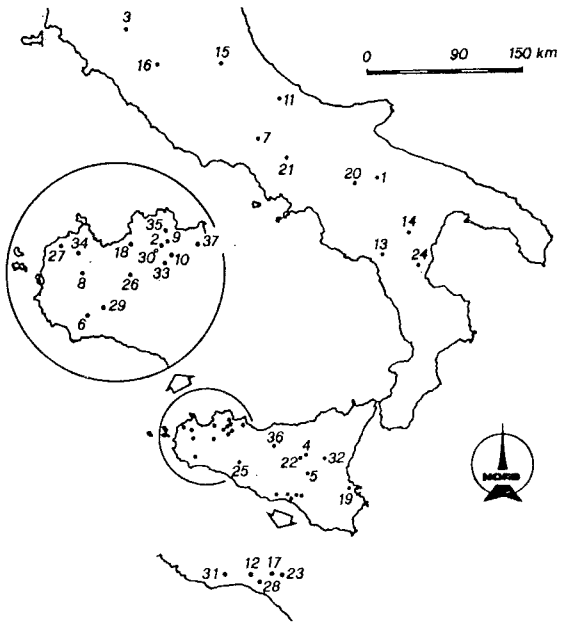

Fig. 1. - Dighe di materiali sciolti su formazioni argillose dell'Italia centro-meridionale e della Sicilia.

2. Ambiente fisico

Sorvolo in questa sede su una presentazione dell'ambiente fisico dell'Italia Meridionale e

* Prof. Ing. Ruggiero JAPPELLI, ordinario di *Geotecnica* nella Facoltà di Ingegneria, Università di Palermo.

della Sicilia, molto ben descritto da eminenti studiosi in memorie antiche e recenti. Sottolineo solo l'estrema varietà dei fattori ambientali e deposizionali dei terreni, che hanno avuto origine in quella parte del paese, nonché la complessità delle vicende, alle quali essi sono stati assoggettati dopo il deposito.

Questi processi, che hanno impresso ai terreni i caratteri geotecnici fondamentali, hanno favorito, pur nella loro diversità, la formazione di alcuni depositi tipici, lo studio dei quali incoraggia un tentativo di sintesi e forse di oggettivazione.

Il medesimo ambiente privilegia le soluzioni con dighe di materiali sciolti, fondate in gran parte su formazioni argillose, alle quali limiterò le mie considerazioni.

Prescindo dai terreni che costituiscono le coltri superficiali, più o meno spesse e molto diverse per origine e composizione, che sempre ricoprono tali formazioni, e ciò perché esse sono tanto variabili nelle loro caratteristiche geotecniche da non consentire alcuna significativa oggettivazione.

Si comprendono nell'esame:

— i terreni di fondazione e di imposta della diga;

— i terreni di fondazione delle opere di scarico;

— i terreni delle sponde prossime all'area dello sbarramento.

3. Caratteri geotecnici delle formazioni argillose e gradi di complessità

Le formazioni argillose, alle quali mi riferisco, hanno spessori molto rilevanti, generalmente dell'ordine delle centinaia di metri. Caratteri geotecnici comuni sono la grana molto fina, la plasticità spesso elevata, il contenuto naturale d'acqua quasi sempre inferiore al limite di plasticità, la porosità relativamente bassa. Salvo eccezioni, il grado di saturazione è prossimo all'unità.

I valori medi dei citati parametri, fino alla profondità significativa, possono considerarsi caratterizzanti ai fini progettuali, perché, in genere, per l'elevato grado di preconsolidazione, il contenuto d'acqua e la porosità, nell'ambito delle profondità esplorate, pur a volte molto dispersi, sono poco dipendenti dalla profondità, come può rilevarsi dai grafici w_n, z delle figg. 2a, b, c. che si riportano a titolo esemplificativo.

Queste formazioni argillose sono quasi sempre fortemente caratterizzate, nell'assetto strutturale, da discontinuità di vario tipo (giunti, fessure) facilmente riconoscibili, ma non sempre rilevabili, con la tecnica ben nota nel campo delle rocce lapidee, e contengono spesso intercalazioni di materiali di composizione molto diversa.

Si può osservare che, mentre i dati relativi alle proprietà indici che ho citato, vengono rilevati con relativa frequenza nel corso degli studi di un progetto, non così accade per l'assetto strutturale, sul quale le notizie sono ancora

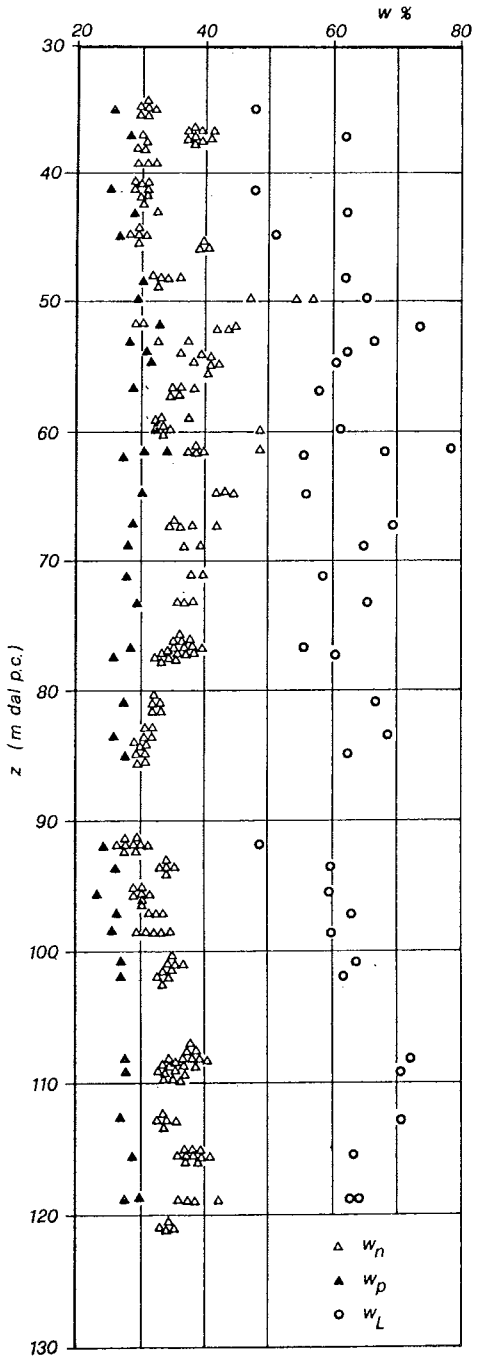

Fig. 2a. - Argille dure omogenee (gruppo 1) - Valori del contenuto naturale d'acqua e dei limiti di Atterberg in funzione della profondità.

molto scarse. Si è forse solo recentemente riconosciuto che, spesso, è su questo dato che occorre spostare l'attenzione, in quanto il comportamento meccanico di talune formazioni argillose del Mezzogiorno, almeno in certi intervalli di sollecitazione e per certi problemi, è più facilmente assimilabile ai modelli proposti dalla meccanica delle rocce, che a quelli relativi ai terreni.

Per comodità di esposizione e di riferimento propongo qui un raggruppamento ovvero una sorta di classifica delle formazioni argillose, sulle quali sono state realizzate o sono in corso di studio dighe di materiali sciolti nel Mezzogiorno. Il fattore guida in questa classifica non è l'età del deposito o la resistenza del materiale o qualche altro ben noto parametro geotecnico, quanto piuttosto il carattere che sembra predominante nel determinare il tipo ed il grado di complessità, ai fini della caratterizzazione meccanica di questi terreni nei riguardi del comportamento dell'opera.

L'elenco è del tutto preliminare e solo esemplificativo del tipo di classifica, che si vuole proporre. Il raggruppamento, che è stato concepito avendo in mente, da un lato, i problemi che si sono incontrati nel corso delle indagini e degli studi di progetto e, dall'altro, nel corso dei lavori di costruzione, può anche valere come un tentativo di prospettare globalmente il tipo di difficoltà che si può prevedere di incontrare nella realizzazione dell'opera e che potrebbe condizionare, ad esempio, un giudizio di fattibilità.

Resta da discutere, evidentemente, quali di queste difficoltà riguardano più propriamente la realizzazione dell'opera e quali, invece, solo il processo di caratterizzazione dei terreni.

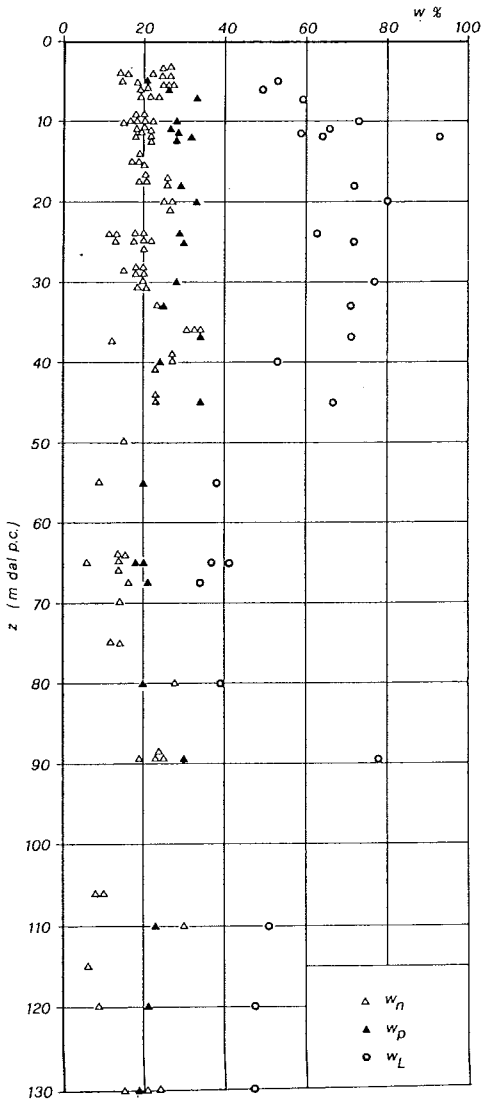

Fig. 2b. - Argille molto dure, discontinue (gruppo 2) - Valori del contenuto naturale d'acqua e dei limiti di Atterberg, in funzione della profondità.

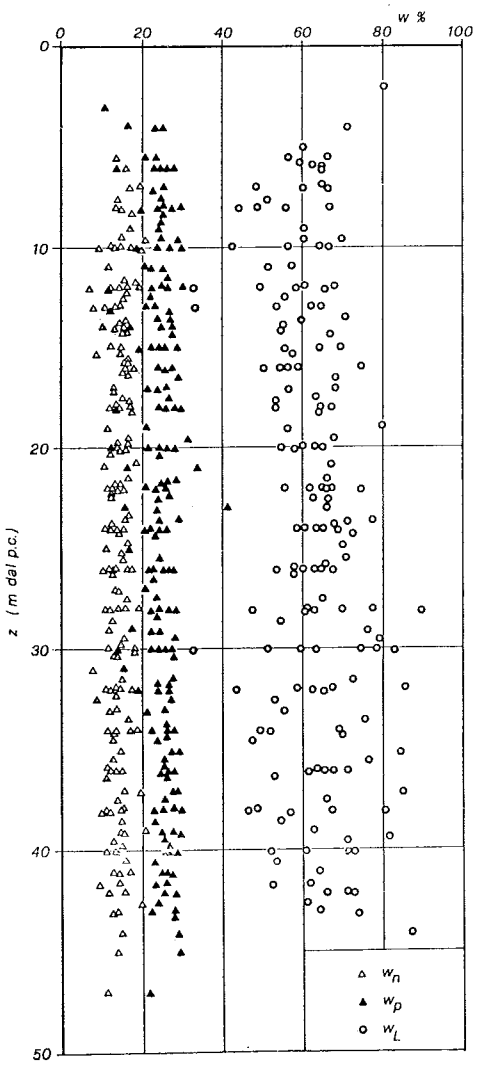

Fig. 2c. - Argille a scaglie o scagliettate (gruppo 4) - Valori del contenuto naturale d'acqua e dei limiti di Atterberg, in funzione della profondità.

In un primo gruppo possono collocarsi le argille mediamente consistenti o dure, relativamente omogenee, intatte o poco fessurate secondo famiglie di discontinuità piuttosto regolari. Su queste argille poggiano le dighe di Abate Alonia, Guadalami e di S. Casciano, sulla quale danno notizia al Convegno BALDOVIN e BERTI; sono in costruzione le dighe del Cimia e di M. Cotugno, sulle quali riferiscono CLAPS, CROCE, TRIMIGLIOZZI, VALOROSO e VIGGIANI; in progetto gli sbarramenti sul Gattano e sul Modione in Sicilia.

In un secondo raggruppamento possono farsi rientrare le argille dure o molto dure, con discontinuità generalmente irregolari, più raramente disposte secondo famiglie riconoscibili, con superfici opache o striate e contenenti talvolta banchi a livelli di sabbia. Su queste argille sono impostate le dighe di Nicoletti, Ogliastro, Trinità; sono in costruzione le dighe del Castello e di Garcia, in progetto quella di Piano del Campo, tutte in Sicilia.

La caratteristica fondamentale del terzo gruppo è la brecciatura, che si manifesta con la presenza nella massa argillosa di piccoli frammenti o noduli di materiali generalmente più resistenti; in progetto su queste argille brecciate le dighe di Agrabona e Sciaguana; già eseguita quella di Comunelli, tutte in Sicilia.

Al quarto gruppo appartengono le argille costituite da ammassi di vere e proprie piccole scaglie, e perciò argille scagliettate, con superfici spesso lucide e striate.

Gli inclusi lapidei, ove presenti, sono rari, per cui il comportamento meccanico dipende dalle caratteristiche dell'argilla.

Su queste formazioni sono state costruite la diga di Castelsanvincenzo in Abruzzo, nonché, in Sicilia, le dighe di Fastaia, Piana dei Greci, Rossella, Scanzano; in costruzione o in progetto, sempre in Sicilia, le dighe di Bifarera, Fittasi, Oreto e Paceco.

Seguono le argille a scaglie, analoghe alle precedenti quanto alla struttura, ma caratterizzate da maggiore eterogeneità e nelle quali sono presenti banchi o frammenti lapidei, anche di grandi dimensioni, in assetto caotico, costituenti una impalcatura che produce effetti sensibili sul comportamento meccanico d'insieme.

Su queste argille risultano fondate le dighe di M. Nicodemo, Camastra, Sella Pedicate nell'Italia Meridionale.

In altra classe, al limite con le rocce lapidee, possono collocarsi le argilliti, fessurate o minutamente fratturate secondo famiglie di discontinuità riconoscibili e classificabili nei diagrammi polari di Schmidt. In corso di studio su questi materiali la diga di Milicia, in Sicilia.

Restano, infine, da considerare i terreni di fondazione costituiti da formazioni argillose composte da due o più termini delle classi precedenti ovvero da una delle argille precedenti e da altri terreni. Esempi di questi casi, particolarmente complessi e interessanti, sono la diga di Villarosa, sulla quale riferiscono al Convegno BALDOVIN e BERTI, in cui sono presenti le argille varicolori e le argille tortoniane, che possono farsi rientrare nei gruppi 5 e 2, rispettivamente, nonché una formazione calcarea in sinistra; la diga di S. Pietro, dove le argille a scaglie del flysch. anch'esse del gruppo 4, sono a contatto con formazioni più francamente lapidee; la diga dello Jato, in cui le argille tortoniane (gruppo 2) passano a valle e in destra a terreni sabbiosi più o meno cementati; la Selva per la presenza di una formazione argillo-marnosa a contatto con i conglomerati; la diga di Corbara, dove le argille scagliettate del flysch (gruppo 4) sono a contatto con formazioni aventi caratteri nettamente più lapidei; la diga di Bomba, dove sono presenti argille del flysch (gruppo 2) in destra e calcari marnosi in sinistra; il Disueri, dove le argille molto dure del secondo gruppo sono a contatto con i termini più nettamente lapidei della serie gessoso solfifera; la vasca di Ogliastro, in cui le argille del primo tipo sono sormontate da un banco di rocce lapidee tenere (fig. 3).

In conclusione, possiamo distinguere:

1) argille dure, omogenee;

2) argille molto dure, fessurate;

3) argille dure, brecciate;

4) argille a scaglie o scagliettate;

5) argille a scaglie o scagliettate, contenenti elementi lapidei;

6) argilliti discontinue;

7) formazioni composte.

4. Indagini

Le formazioni descritte sono spesso strutturalmente complesse, secondo la definizione data in occasione del Simposio di Capri. La tecnica e il significato delle indagini in queste formazioni sono state ampiamente discusse in quell'occasione.

In alcune comunicazioni a questo Convegno

vi sono spunti per un progresso della tecnica delle indagini in casi difficili.

CARABELLI illustra una raffinata tecnica di indagine con misure acustiche a impulsi programmati, valida specialmente in rocce lapidee, ma probabilmente molto utile in alcune delle formazioni argillose che ho menzionato, per porre in evidenza anomalie, discontinuità, anisotropie strutturali e per il controllo della riuscita di interventi nel sottosuolo.

Specialmente importante è la possibilità, che si intravede ormai concretamente, di ottenere una risposta puntuale oltre che globale. Vale l'esempio del controllo delle riprese dei getti di calcestruzzo.

Sarebbe molto utile verificare in concreto la fattibilità ed il significato geotecnico di queste ricerche nelle formazioni argillose, che ho richiamato.

FRANCHINI suggerisce una serie di utili accorgimenti tecnologici per la migliore esecuzione di delicate prove meccaniche in sito con l'impiego di ancoraggi di contrasto, che arrecano il minimo disturbo alla roccia. I cenni riportati nella nota di BALDOVIN-BERTI per lo studio di una diga in Liguria, nonché una recente esperienza, sulla quale riferiranno UMILTÀ e NOCILLA, per un analogo studio in Sicilia, inducono ad affermare che queste prove, con opportune varianti e adattamenti, sono fattibili e possono

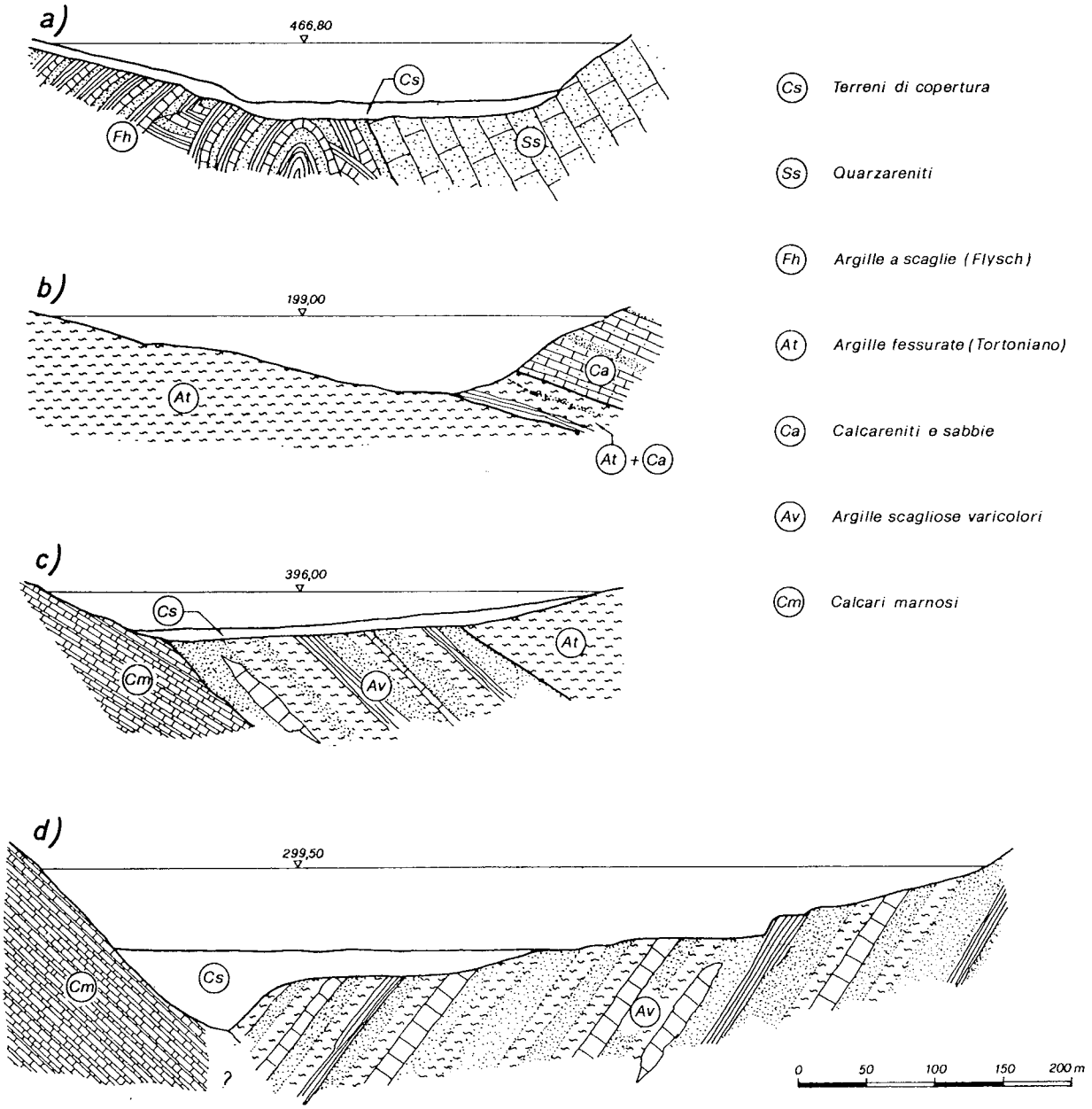

Fig. 3. - Sezioni longitudinali schematiche dei terreni di fondazione delle dighe: S. Pietro (a), Jato (b), Villarosa (c), Bomba (d).

essere molto significative anche per la caratterizzazione di formazioni argillose complesse.

Sempre con riferimento alle indagini su questi terreni, vorrei sottolineare ancora l'importanza di:

— un'accurata progettazione dei particolari delle indagini con appropriata scelta della tecnologia di esplorazione del sottosuolo, della metodologia di prova in laboratorio e in sito;

— una visione unitaria e integrata fra terreni e rocce ai fini di una realistica caratterizzazione meccanica del sottosuolo;

— un'esposizione dettagliata dei dati sperimentali per una migliore utilizzazione del notevole lavoro sperimentale, che si va compiendo in questo settore dell'ingegneria nei numerosissimi laboratori impegnati.

5. **Notizie sulle proprietà meccaniche**

Per quanto riguarda le principali proprietà di queste argille, le notizie disponibili sono in verità ancora molto scarse e frammentarie, certamente a causa delle difficoltà della sperimentazione in laboratorio e in sito. Si può dire però che solo recentemente il problema ha attirato l'attenzione del Gruppo di ricerca C.N.R. per la Geotecnica, che ha avviato ricerche sistematiche al riguardo, sia con i programmi di ricerca ordinari sia nell'ambito del Progetto Finalizzato Conservazione del Suolo.

La caratterizzazione meccanica di queste argille, con tutte le difficoltà che si incontrano per una convincente schematizzazione geometrica e fisica del sottosuolo e nell'attribuzione dei parametri per lo sviluppo dei calcoli di progetto e verifica, deve essere finalizzata:

— al livello ed al tipo delle sollecitazioni che si prevede di applicare, per imposizione di carichi o per effetto di scavi;

— al tipo di calcoli e verifiche, che si ha in animo di effettuare.

Nel settore e per la categoria di opere in esame i carichi applicati sono generalmente modesti in relazione al carico di preconsolidazione, ma i tagli di pendio e le asportazioni dalle sponde sono spesso cospicui, con effetti rilevanti sulla risposta meccanica dei terreni.

Con riferimento al secondo punto ci si orienta sempre più frequentemente, e più correttamente che nel passato, ad impostare i calcoli geotecnici in termini di pressioni effettive, il che presuppone una valutazione delle pressioni neutre.

In ogni caso, le difficoltà che si incontrano nella caratterizzazione meccanica del sottosuolo sono principalmente dovute alle incertezze nella valutazione degli effetti dell'acqua del serbatoio, in dipendenza della quale i problemi di fondazione delle dighe si distinguono nettamente da quelli dei rilevati in genere.

Ho provato dunque a sottoporre la materia ad un'elaborazione, accompagnata da un esame critico complessivo, allo scopo di tentare di produrre una sintesi sull'argomento, considerando i caratteri meccanici fondamentali di queste formazioni, in relazione ai problemi di fondazione delle dighe e particolarmente:

— il grado di preconsolidazione;

— la permeabilità

— le pressioni neutre;

— la resistenza al taglio;

— la deformabilità;

quali risultano da dati pubblicati da vari autori italiani — al riguardo ho raccolto e consultato una cinquantina di memorie relative alle dighe che ho citato — nonché da indagini e da esperienze ancora inedite, delle quali sono a conoscenza, specie per quanto riguarda la Sicilia. Queste si riferiscono a dati di laboratorio, prove in sito, risultati di misure sul comportamento delle singole opere eseguite con la strumentazione geotecnica installata in sito.

5.1. *Grado di preconsolidazione*

È molto importante ai fini della caratterizzazione meccanica di una formazione argillosa. Esso va riferito al sistema, difficilmente definibile degli sforzi normali e di taglio, ai quali il materiale è stato sottoposto nel passato. Convenzionalmente è riferito agli sforzi normali verticali e pertanto può individuarsi con una certa attendibilità solo quando la formazione è stata sottoposta prevalentemente a tali sollecitazioni. Ciò vale essenzialmente per le argille del primo gruppo.

Le esperienze di laboratorio al riguardo, relativamente semplici, non sono però usuali, in quanto il carico di preconsolidazione di queste argille è di regola tanto elevato, che le prove non possono condursi con gli apparecchi convenzionali, con i quali in genere non può applicarsi un carico superiore ad alcune diecine di kg/cm^2.

I dati disponibili in letteratura sulle fondazioni delle dighe già realizzate sono perciò del tutto carenti su questa importante caratteristica. Da notizie indirette risulta, tuttavia, che le opere finora costruite ricadono tutte su terreni

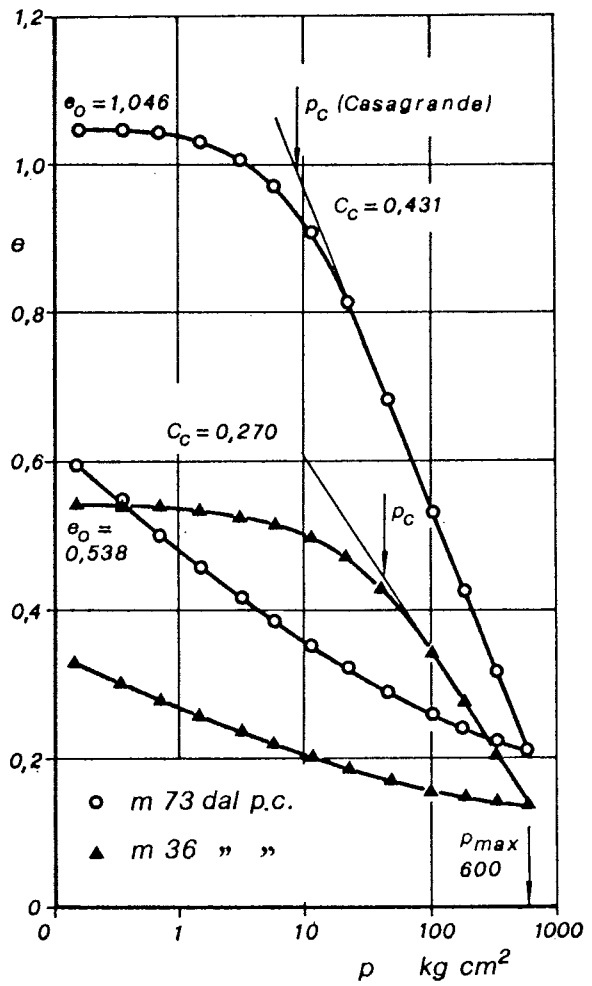

Fig. 4. - Argille dure omogenee (gruppo 1) - Risultati tipici di prove di compressione edometrica.

con carichi di preconsolidazione nettamente più elevati di quelli trasmessi dal manufatto.

Per le dighe più recenti, ancora in fase di studio, e sempre con riferimento alle argille del primo gruppo, si dispone di qualche dato orientativo per il Gattano, per Modione e per Cimia, in Sicilia, dove il grado di preconsolidazione (OCR) raggiunge anche una diecina di unità, come può rilevarsi dalle curve di compressione edometrica, riportate a titolo di esempio nella fig. 4, che si riferiscono ad argille dure omogenee del gruppo 1.

Quasi nulla si conosce sul grado di preconsolidazione delle argille degli altri gruppi, per le evidenti difficoltà di sperimentazione e di definizione stessa di questa grandezza, difficoltà che vanno crescendo con il grado di complessità strutturale.

5.2. *Permeabilità*

Malgrado il diffuso stato di fratturazione (gruppi 2 e 4) e la presenza delle *brecciature* (gruppo 3) e degli *inclusi lapidei* (gruppo 5), le formazioni menzionate hanno permeabilità molto bassa, salvo casi particolari ed eccezionali. Si osservi che molti serbatoi sono già in esercizio da molti anni senza inconvenienti.

Le misure in laboratorio o le valutazioni indirette dalle curve cedimenti-tempo, tramite la teoria della consolidazione, hanno validità limitata se non sono effettuate su provini rappresentativi anche dello stato di fratturazione. Da queste elaborazioni si ottengono valori del coefficiente di permeabilità dell'ordine di $10^{-9} \div 10^{-7}$ cm/sec.

Qualche dato più affidabile potrebbe ricavarsi dall'interpretazione di curve cedimenti-tempo rilevate per alcune dighe in esercizio. A tal fine occorrerebbe, tuttavia, disporre di misure di spostamenti di qualche punto ubicato ad una certa profondità nell'interno della formazione.

In sito sono state eseguite spesso prove di assorbimento, delle quali si riportano i risultati in unità lugeon, e che possono ritenersi valide e utili, sempre che le pressioni di prova non siano tanto elevate da dar luogo, come talvolta è accaduto, a fenomeni di fratturazione idraulica.

Talvolta i risultati non sono significativi, solo per la difficoltà di realizzare la tenuta in presenza di famiglie di discontinuità con giacitura all'incirca parallela all'asse del foro.

Nei rapporti su queste prove vengono, molto spesso, citati assorbimenti nulli.

Qualche caso di permeabilità più elevata si è verificato in prossimità del contatto con formazioni diverse, calcari (Bomba) o arenarie (Scanzano) o per la presenza di inclusi arenacei di una certa importanza (Bifarera). Nei termini arenacei inclusi in questa formazione si sono ottenuti con prove di assorbimento valori del coefficiente di permeabilità dell'ordine di 10^{-6} cm/sec.

Deformazioni di una certa entità, ma non necessariamente a rottura, possono dar luogo ad un riassetto strutturale, con conseguente incremento del coefficiente di permeabilità di un'argilla scagliettata, come è avvenuto in occasione della frana di Risalaimi, nella medesima forma-

zione sulla quale sono impostate le dighe di Scanzano e Rossella, in Sicilia.

5.3. *Pressioni neutre*

Le misure sono molto difficili, principalmente:

— per la ridotta permeabilità;

— per la complessità del sistema di sforzi normali e di taglio, che il materiale ha subito nel passato;

— per la presenza della discontinuità che alterano l'andamento delle pressioni neutre, accelerandone il decorso rispetto al caso del materiale intatto.

I risultati sperimentali di laboratorio sono ancora molto scarsi e riguardano essenzialmente il materiale intatto, cioè privo di discontinuità. Né sono disponibili risultati convincenti di misure di pressioni neutre in sito nelle formazioni argillose, sulle quali poggiano le più importanti dighe nel Mezzogiorno.

A questo Convegno, TRIPICIANO e COLOMBO hanno presentato un interessante studio, che si propongono di sviluppare ancora, sugli strumenti per la misura in sito di alcune importanti grandezze, fra le quali la pressione neutra, e citano molte applicazioni. Se ne trae il convincimento che gli strumenti disponibili sono ormai molto perfezionati come strumenti in sé stessi e che i risultati delle misure sono affidabili se ci si riferisce ad alcune categorie di terreni.

Eppure, nelle formazioni argillose, alle quali si fa riferimento, l'esperienza disponibile è ancora modesta. Non resta che auspicare e cogliere qualche occasione favorevole, perché si possa procedere ad una sperimentazione accurata di questi strumenti nelle fondazioni di dighe su argille complesse.

Le teorie disponibili per il calcolo delle pressioni neutre, anche limitatamente alla condizione non drenata, con applicazione alle fondazioni delle dighe in entrambe le fasi di carico e scarico, sono poco attendibili, perché non consentono ancora di tener conto adeguatamente dell'assetto strutturale di questi terreni.

Come si regolano i progettisti in mancanza di dati sperimentali e di attendibili metodi teorici?

Stimano la pressione neutra e sarebbe interessante che al Convegno si riferisse su qualche esempio di stima ragionata dei coefficienti di pressione neutra;

Assumono l'ipotesi che l'argilla si comporti come una formazione di base infinitamente resistente;

Prescindono dal problema, per ragioni di semplicità, bilanciando questa omissione con un'adeguata scelta del coefficiente di sicurezza.

Altra soluzione, da incoraggiare a mio avviso, potrebbe essere quella di operare con un *metodo osservazionale*, sviluppando calcoli parametrici e fissando un livello di guardia per le pressioni neutre; se, e solo se, quest'ultimo venisse superato, dovrebbero adottarsi provvedimenti, già dettagliatamente e anticipatamente studiati in progetto.

Se alla difficoltà di prevedere le pressioni neutre in queste formazioni si aggiungono quelle di valutare più in generale gli effetti meccanici dell'acqua, nel senso precisato dal precedente Convegno A.G.I. di Milano, effetti che in taluni terreni non si manifestano solo come pressioni neutre, ma in un modo più complesso (rigonfiamenti, softening, collassi, sifonamenti locali), si comprende come taluni progettisti siano portati ad un dimensionamento generoso, solo apparentemente ingiustificato.

5.4. *Resistenza al taglio*

I dati di resistenza in termini di pressioni effettive (c', φ') sono ancora piuttosto rari, quando si fa riferimento alle argille in esame.

Sulla classe delle argille brecciate sono state effettuate recenti esperienze, che hanno fornito $c' = 1 \div 1{,}5$ t/m^2, $\varphi' = 23° \div 29°$; analogamente, per le argille scagliettate, dove si sono ottenuti valori di c' dell'ordine di 3 t/m^2 e di φ' compresi fra $19° \div 24°$.

Negli ultimi anni, grazie agli sforzi di un gruppo di ricercatori nell'ambito dei programmi C.N.R., è stato possibile ottenere i primi interessanti risultati di ricerche sistematiche sull'argomento, con prove di laboratorio sulle argille scagliettate e in sito sulle argille discontinue e sulle argilliti.

Per queste ultime, in particolare, i risultati si presentano, tuttavia, ancora piuttosto dispersi; per l'interpretazione si devono probabilmente invocare meccanismi di rottura alquanto diversi da quelli usuali, riconducibili semmai a quelli relativi ai mezzi granulari dilatanti e a quelli delle rocce giuntate.

UMILTÀ e NOCILLA riferiranno su di una prima serie di dati raccolti in occasione delle indagini di progetto per la diga di Milicia.

Molto più frequenti i valori della coesione

non drenata, che, tuttavia, hanno significato solo per le argille delle prime tre classi, quando i terreni sono saturi. Naturalmente i valori di questo parametro dipendono dal grado di consolidazione.

Per le argille delle prime due classi vengono spesso citati valori di parecchie diecine o addirittura di qualche centinaio di t/m². Tipici sono i casi recenti delle dighe Cimia ($c_u = 30 \div 140$ t/m²) e Castello ($c_u \simeq 200$ t/m²). Per le argille brecciate i pochi valori disponibili di c_u non superano le $10 \div 30$ t/m².

Per le argille con un grado di complessità strutturale più elevato delle precedenti, e caratterizzato da intensa scagliettatura, caoticità, inclusioni lapidee e talvolta non completa saturazione, queste prove sono certamente meno significative.

Quando la resistenza non drenata della formazione argillosa di base assume, come spesso accade, valori di *uno* o *due* ordini di grandezza più elevati di quello dei terreni della coltre, la formazione medesima viene assunta infinitamente resistente e si ammettono nelle verifiche superfici di scivolamento, che, al limite, sono tangenti al tetto della formazione. La resistenza di quest'ultima non interviene, quindi, nel proporzionamento.

5.5. *Deformabilità*

I valori del modulo di compressione edometrica possono dedursi dalle prove di laboratorio effettuate generalmente fino a sollecitazioni massime dell'ordine di qualche centinaio di t/m², e sono da considerarsi significativi per le argille del primo gruppo, per le quali più difficilmente si pongono questioni di rappresentatività del provino.

Per la diga Modione ad esempio, si sono ottenuti valori del modulo edometrico variabili da 5.000 a 15.000 t/m² circa, per tensioni effettive comprese nell'intervallo $10 \div 500$ t/m².

Dai dati disponibili sulle argille scagliettate risulta che queste sono alquanto più deformabili. Per i terreni della diga Rubino, già realizzata, e per quelle di Paceco e Bifarera, in studio, si sono ottenuti valori del modulo non superiori a $1.000 \div 3.000$ t/m² per sollecitazioni comprese nell'intervallo $10 \div 100$ t/m².

Qualche altro dato, rilevato con prove di carico su piastra per la diga di Bifarera, è del medesimo ordine di grandezza.

Oltre ai dati di laboratorio, si dispone dei risultati delle misure dei cedimenti di alcune opere in esercizio da molti anni.

Esclusi i risultati incerti o palesemente affetti da errore, se ci si limita alle misure che riguardano i cedimenti della formazione di base, eliminando quindi il contributo della coltre di ricoprimento, i dati che offrono un certo affidamento, si riducono a quelli di 10 dighe e precisamente Abate Alonia, Castelsanvincenzo, Comunelli, Iato, Nicoletti, Fastaia, Villarosa, Scanzano, Camastra, Guadalami.

In alcuni di questi casi le misure sono state eseguite solo in asse nucleo, sul fondo del taglione; in altri, è stato possibile misurare i cedimenti della formazione anche su qualche base disposta sotto il fianco della valle.

Dove sono disponibili dati al riguardo, si osserva che il cedimento più elevato non si manifesta in asse taglione, dove la diga assume la massima altezza; ciò sta a indicare che i fianchi hanno subito un cedimento maggiore di quello del nucleo (esempi: Castelsanvincenzo, Abate Alonia) per effetto di una ridistribuzione delle pressioni sul piano di posa, dovuta in parte anche alla presenza del taglione di ammorsamento del nucleo nella formazione di base.

Un effetto simile si osserva per la diga Fastaia, ma questa volta in senso longitudinale, e può essere spiegato come un effetto del fattore morfologico della vallata.

Si osservi che in ognuno di questi tre casi il nucleo è costituito di materiale miscelato, relativamente poco deformabile.

Ad un meccanismo diverso si può ricondurre il fenomeno di rotazione longitudinale verso valle di alcune dighe (Iato e forse Bomba). In questi casi il fenomeno è chiaramente condizionato dal fatto che i terreni di fondazione di queste dighe appartengono a formazioni, del tipo che ho denominato « composto », di terreni di diversa comprimibilità.

Le curve cedimenti-tempo relative a queste opere si riferiscono ad un periodo di almeno cinque anni (Comunelli), con un massimo di una ventina di anni (Rossella e Scanzano); escluso il Comunelli, per il quale i risultati dell'osservazione si riferiscono ad un periodo troppo breve, in quasi tutti gli altri casi si può concludere che la consolidazione è praticamente esaurita e che i cedimenti maggiori si sono verificati in fase di costruzione. Su tale argomento riferirà l'Ing. VALORE.

I cedimenti finali massimi assumono valori piuttosto modesti, come già detto, e sono compresi in percentuali dell'altezza del rilevato fra

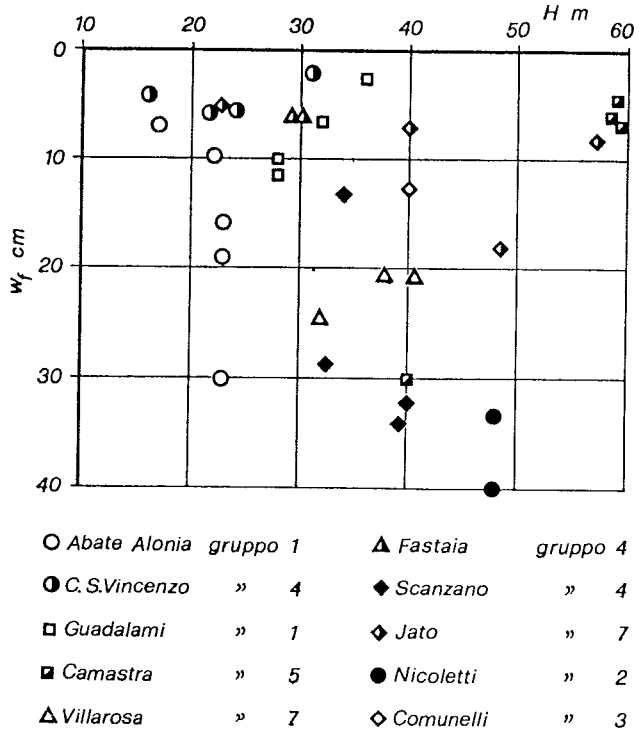

Fig. 5. - Cedimenti finali del piano di fondazione di dighe di materiali sciolti, in funzione dell'altezza del rilevato sulla verticale di misura.

lo 0.067 di Castelsanvincenzo e l'1,2 di Abate Alonia (fig. 5).

Per un'elaborazione rigorosa sarebbe necessario correlare questi dati con una serie di fattori, che dipendono dalla distribuzione dei carichi, dalla sequenza dei lavori, che, talvolta, sembra farsi risentire sulla formazione di base (Comunelli), dalle condizioni di esercizio e, naturalmente, dalle caratteristiche dei terreni e dei materiali. I risultati dei calcoli dipendono dalle ipotesi, che si ammettono sulla distribuzione delle pressioni di contatto terreno-rilevato e nel sottosuolo. Le informazioni disponibili al riguardo sono allo stato ancora scarse e non vanno molto al di là delle considerazioni teoriche. Per il momento, quindi, e per gli scopi che ci prefiggiamo, dobbiamo contentarci di qualche considerazione, poco più che qualitativa.

Per un primo esame conviene mettere da parte, perché più difficilmente interpretabili, i casi di dighe fondate sui terreni dell'ultima classe, le formazioni composte, nonché quelle opere impostate entro vallate dalla morfologia piuttosto complessa, alla quale corrispondono rilevati con forma in pianta meno semplice delle altre.

Restano poche dighe, per le quali con buona approssimazione si può ammettere l'ipotesi di fondazione omogenea e di deformazione piana.

Il modulo è stato valutato come valore medio costante, con riferimento ad uno strato di terreno di spessore all'incirca uguale alla larghezza della diga.

Ne risultano valori compresi fra 20.000 t/m^2 e 40.000 t/m^2 senza apprezzabile distinzione fra una formazione e l'altra.

Il confronto con i risultati delle prove di laboratorio è possibile solo in qualche caso, nel quale eccezionalmente le prove siano state spinte fino a pressioni alquanto più elevate di quelle agenti in sito e risulta soddisfacente se ci si limita a considerare l'ordine di grandezza del modulo di compressione.

Nonostante tali precisazioni, tuttavia, occorre dire che i valori del modulo ricavati da queste valutazioni analitiche appaiano alquanto sovrastimati rispetto a quelli ottenuti in laboratorio.

Faccio osservare che se si assume che il modulo vari molto rapidamente, ciò equivale a considerare uno strato deformabile di spessore molto più modesto rispetto a quello assunto solitamente, ed a cui precedentemente facevo riferimento.

A Monte Cotugno, per i calcoli relativi alla paratia sotto l'aspetto statico, è stato adottato un concetto simile; il modulo è stato fatto variare in soli 4 m, a partire dal tetto della formazione di base, da 35.000 t/m^2 a 65.000 t/m^2, considerando il resto della formazione come rigida.

Bonaldi ed altri valutano, con una approfondita ricerca teorica, le deformazioni indotte dall'invaso sui terreni di appoggio dell'opera di sbarramento e ci inducono a considerare fra gli altri fattori, anche l'influenza della posizione reciproca diga-serbatoio sul comportamento dell'opera in fase di esercizio.

Per procedere nella direzione indicata da questi AA. occorrerebbe, tuttavia, riflettere caso per caso sulla validità dell'ipotesi, implicitamente ammessa, che le sollecitazioni derivanti dall'invaso si trasmettano sul fondo del serbatoio come sollecitazioni totali: mentre ciò è vero solo se si ammettono particolari condizioni di drenaggio al contorno.

In altra interessante comunicazione gli stessi AA. indicano la possibilità di avvalersi di un modello matematico per l'elaborazione dei risultati di misure di spostamenti per un'interpretazione del comportamento d'insieme struttura-fondazione. Il metodo, che è sostanzialmente una back analysis, riguarda le dighe di

calcestruzzo, ma nulla osterebbe al suo impiego anche nelle dighe di terra. Per un progresso in questa direzione occorrerebbe introdurre, tuttavia, un'adeguata caratterizzazione geotecnica del terreno di fondazione, allo stato appena accennata.

In conclusione, oltre che sull'importanza di integrare i pochi dati finora disponibili, attiro l'attenzione dei progettisti sulla necessità di installare punti di misura dei cedimenti non solo sul tetto della formazione, ma anche all'interno, in modo da conoscere i cedimenti di strati di spessore noto. Sarebbe anche molto opportuno tentare qualche misura di spostamenti orizzontali, laddove la forma della valle lascia supporre una notevole componente orizzontale degli spostamenti.

Segnalo l'urgenza di queste indagini, anche in vista dello sviluppo che hanno assunto le soluzioni, come per il Sinni e il Castello, con manti di tenuta sul paramento di monte, anche per dighe di terra fondate su argille.

6. Ricerca progettuale

Per consentire un fruttuoso proseguimento dei lavori del panel, senza impegnare troppo gli ascoltatori, vorrei concludere con qualche considerazione di sintesi che mi è venuta spontanea al termine di questo lavoro.

Da un lato mi sembra di poter dire che i fattori, dai quali le proprietà dipendono, sono ormai sufficientemente individuati, nel senso che essi sono almeno concettualmente sotto controllo; dall'altro, non posso fare a meno di rilevare che, salvo casi particolari, la sperimentazione corrente, che si ha la possibilità di sviluppare con le somme, i tempi e le organizzazioni disponibili in occasione dello studio dei progetti, è spesso ancora carente, così come l'esposizione dei dati, che con queste esperienze si raccolgono, lascia ancora un discreto margine di incertezza nella interpretazione.

Ho tratto poi l'impressione che, in generale, finora, nelle considerazioni di progetto, le caratteristiche geotecniche delle formazioni argillose di base siano intervenute relativamente poco, nel senso che la massima attenzione è stata riservata alle coltri, generalmente di proprietà molto più scadenti, specie sulle sponde, dove spesso i terreni superficiali sono in frana.

La ricerca progettuale è stata impostata prevalentemente sull'adattamento, agevole con le dighe di materiali sciolti, dell'opera alla complessa morfologia superficiale, con allarghi, risvolti, placcaggi, mantellate, colmate, con largo impiego di paratie, con soluzioni, sulle quali ci riferirà fra breve l'Ing. LOTTI, molto brillanti nell'aspetto geotecnico e di grande interesse, anche per i futuri sviluppi dell'attività in questo settore dell'Ingegneria Civile.

Mi sembra, tuttavia, che un approfondimento delle conoscenze sulle proprietà delle argille di base, ancora poco caratterizzate sotto il profilo geotecnico, possa portare ad una rivalutazione dell'importante ruolo di queste, come terreni di appoggio delle dighe, alla scelta di soluzioni sicure e forse anche a un dimensionamento più contenuto, utilizzando in pieno i mezzi di scavo e le moderne tecniche di intervento sul sottosuolo, delle quali ci parlerà l'Ing. SEMBENELLI.

Valga, a questo riguardo, l'esempio della recente diga del Castello, in Sicilia, dove si è ritenuto conveniente procedere a generose asportazioni sulle sponde per poter poggiare il rilevato sulla formazione di base e rendere possibile l'adozione di una struttura di tenuta con manto sul paramento di monte, resa necessaria dalla carenza di un buon materiale da nucleo (fig. 6).

7. Proposte per la discussione

Prendendo lo spunto dalle precedenti osservazioni, mi sono posto alcune domande che po-

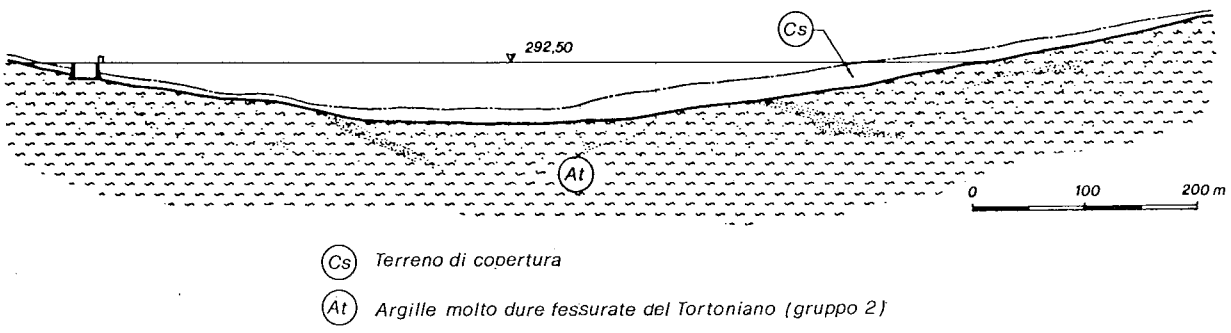

Fig. 6. - Sezione longitudinale schematica dei terreni di fondazione della diga Castello.

trebbero costituire argomenti di riflessione e discussione e che mi permetto di rivolgere agli specialisti qui convenuti:

a) Malgrado i molti studi in laboratorio, in sito, le costose strumentazioni installate, i dati disponibili sulle caratteristiche meccaniche delle formazioni argillose sulle quali sono impostate molte dighe di terra sono ancora scarsi e spesso poco attendibili. Questa carenza dipende:

— dall'obiettiva difficoltà di caratterizzare il comportamento di queste formazioni, spesso molto complesse?

— da una tendenza dei progettisti a dare più peso alle ricerche sui terreni delle coltri?

— dalla scarsa attenzione che i ricercatori hanno riservato finora a queste indagini, certamente molto difficili e forse non immediatamente produttive?

b) In molti casi le proprietà, talvolta molto favorevoli, delle formazioni argillose potrebbero sfruttarsi meglio con appoggio diretto e con un dimensionamento più contenuto del rilevato;

— esiste qualche altro caso, oltre quello citato, nel quale si è ritenuto conveniente appoggiare la diga, in tutto o in parte, sulla formazione di base a prezzo di maggiori scavi e interventi sulle sponde?

— questa soluzione è stata raramente adottata, perché non è stata ritenuta economicamente conveniente? o, invece perché non si è potuto fare assegnamento su una sicura caratterizzazione della formazione di base?

In definitiva, tenuto conto del grande sviluppo assunto dai lavori di costruzione delle dighe, specie nel Mezzogiorno d'Italia, sembra particolarmente urgente ed importante stimolare contributi ed interventi, attraverso i quali si possa arricchire la documentazione disponibile sui caratteri meccanici delle argille di base.

Ringraziamenti

L'A. ringrazia AIRÒ C., LIGUORI V., MUSSO A., NOCILLA N., UMILTÀ G., VALORE C., dell'Istituto di Ingegneria Geotecnica e Mineraria dell'Università di Palermo per l'efficace collaborazione prestata nella raccolta, elaborazione e discussione dei dati esposti nella presente relazione.

BIBLIOGRAFIA

ANIDEL (1953) - *Dighe di Campotosto; Diga di Poggio Cancelli: in terra. Diga del Rio Fucino: a gravità massiccia in calcestruzzo. Dighe di ritenuta degli impianti idroeletrici italiani.* Vol. VI, pagg. 111-112.

ANIDEL (1952) - *La diga di Gela. Dighe di ritenuta degli impianti idroelettrici italiani.* Vol. VI, pag. 253.

BALDOVIN G., BERTI P. (1978) - *Problemi di fondazione in recenti sbarramenti italiani.* A.G.I., XIII Convegno Nazionale di Geotecnica. Merano.

BALDOVIN G., BIGALLI F. (1957) - *Dighe in terra su terreni difficili.* L'Energia Elettrica.

BALDOVIN G., GHIRARDINI A. (1973) - *Ogliastro reservoir peripherical rockfill dam, with 90.000 mq upstream bituminous membrane.* XI Congrès des Grands Barrages, Q42 - R52, pagg. 923-951.

BENEO E. (1956) - *Accumuli terziari da risedimentazione nell'Appennino Centrale e frane sottomarine.* Bollettino Servizio Geologico d'Italia. Vol. LXXVIII (1-2).

BERTI P. (1971) - *Il serbatoio di Ogliastro.* L'Energia Elettrica 9.

CASSINIS P. (1954) - *Diga in terra della Trinità. Alcuni aspetti esecutivi con particolare riferimento alla galleria di deviazione in corpo diga ed al costipamento del materiale limoso con rullo vibrante.* Geotecnica 4.

CLAPS G., CROCE A., TRIMIGLIOZZI A., VALOROSO S., VIGGIANI C. (1978) - *Le strutture di tenuta in fondazione della diga sul Sinni a Monte Cotugno.* A.G.I. - XIII Convegno Nazionale di Geotecnica. Merano.

CONTESSINI F. (1951) - *La diga di Gela in muratura di pietrame a secco.* L'Energia Elettrica 2.

COTECCHIA V. (1959) - *Studi di Geologia in Irpinia per la costruzione di un lago artificiale sul torrente Osento.* Geotecnica 2.

COTECCHIA V., LONOCE R. (1963) - *L'erosione del bacino imbrifero del torrente Rendina e la sedimentazione nel lago artificiale di Abate Alonia.* Geotecnica 1.

COTECCHIA V., VALENTINI G. (1966) - *Geologia, erosione, condizioni di stabilità e possibilità di sbarramento della media valle del fiume Sinni (Lucania).* Geologia Applicata e Idrogeologia. Vol. I.

CROCE A. (1957) - *Dighe ed argini di materiali sciolti. Caratteristiche dei terreni di fondazione e dei materiali. Tecnica sperimentale. Criteri di calcolo.* Geotecnica 4.

CROCE A., VECELLIO P. (1957) - *La diga di terra di Castelsanvincenzo.* Geotecnica 6.

CROCE A. (1960) - *Caratteristiche e comportamento della diga di terra di Castelsanvincenzo.* Estratto da « Relazioni su Ricerche e Studi promosse dall'ANIDEL ».

CROCE A. (1963) - *Recent developments in the design and construction of earth and rockfill dams.* Estratto dal volume « Science et Teehnique pour les Règions peu Dèveloppèes », C.N.R., Roma.

CROCE A. *et al.* (1964) - *Dam Measurements in Italy, Part.* II: *Earth and Rockfill Dams.* Trans. of the Eight Int. Cong. on Large Dams, Edimburgo.

DIREZIONE DELLE COSTRUZIONI IDRAULICHE ED ELETTRICHE DELLA SOCIETÀ ROMANA DI ELETTRICITÁ (1960) - *L'impianto idroelettrigo di S. Biagio Saracinisco e la diga di Selva della Soc. Idroelettrica Alto Liri.* L'Energia Elettrica 6.

DOLCIMASCOLO F. (1957) - *Notizie relative agli studi di alcuni serbatoi irrigui in Sicilia.* A.G.I. - V Convegno di Geotecnica Palermo.

FINZI D., (1957) - *Dighe ed argini di materiali sciolti; tipi costruttivi. Metodi e macchinari per la costruzione. Questioni economiche.* Geotecnica 4.

GUIDUCCI M. F. (1954) - *Il setto impermeabile della diga di terra del Basso Nera.* Geotecnica, pagg. 208-211.

IANNANTUONI W. (1960) - *L'impianto idroelettrico di S. Biagio Saracinisco e la diga di Selva, della Soc. Idroelettrica Alto Liri (Recensione).* Geotecnica 6.

IPPOLITO F., LUCINI R., SILVESTRO F. (1956) - *Studi geologici*

per lo sbarramento del Tevere alla stretta di Corbara. Geotecnica 2.

IPPOLITO F. (1953) - *Sulle condizioni geologiche d'imposta di talune dighe di sbarramento nell'Italia Meridionale.* Mem. e note Ist. Geol. Appl. Università di Napoli, Vol. V.

JAPPELLI R., DOLCIMASCOLO F. (1964) - *Sul comportamento della diga della Trinità durante sei anni di esercizio.* Geotecnica 5.

MANGIAGALLI L. (1925) - *L'impianto idroelettrico dell'Alto Belice.* L'Energia Elettrica.

MERCOGLIANO F., SOLLAZZO R. (1963) - *Materiali a grana grossa della diga sul T. Osento: risultati ottenuti nella posa in opera.* Geotecnica 5.

MOTTA A., RUSSO F. (1967) - *Dèductions tirèes sur quelques barrages pendant la pèriode d'exploitation.* IX Congrèes des Grands Barrages, Istambul.

NICOTERA P. (1960) - *Problemi geologici nell'impianto idroelettrico di Guadalami (Sicilia).* Geotecnica 5.

PEDICONI M. (1954) - *La costruzione dell'impianto idroelettrico del Basso Nera dell'Azienda Comunale Elettricità ed Acque di Roma (ACEA).* Energia Elettrica, pagg. 964-980.

RADINA B. (1976) - *Studi geologici per lo sbarramento del T. Camastra nel bacino del F. Basento (Appennino Lucano).* Geologia Tecnica 2, pagg. 43-53.

RIPA DI MEANA C. (1962) - *La diga di Corbara e la Centrale di Baschi.* Cantiere 3.

RIPA DI MEANA C. (1962) - *Macchine ed impianti alla realizzazione della diga di Corbara.* Cantiere 6.

RONZON G. P., BIGALLI F. (1959) -*Le opere di scarico del serbatoio della Trinità sul fiume Delia.* L'Energia Elettrica 8.

SOCIETÀ GENERALE ELETTRICA DELLA SICILIA (1961) - *L'impianto idroelettrico di Guadalami.* Sicilia Elettrica 23.

SOLLAZZO R. (1958) - *Diga di terra sul torrente Rendina.* Geotecnica 1.

TESTI S. (1957) - *Diga in terra sul torrente Aja. Alcune particolarità geotecniche e costruttive.* Geotecnica 5.

VECELLIO P. (1949) - *Il largo artificiale di Gela.* L'Energia Elettrica.

VECELLIO P. (1960) - *La frana presso la diga di Gela.* Geotecnica 3.

VECELLIO G. (1961) - *La costruzione della galleria, pozzo piezometrico e condotta forzata dell'impianto di Guadalami.* Costruzioni 67-68.

VEDER C. (1956) - *Diaframma impermeabile semirigido per il taglione di una diga di terra.* Geotecnica, pagg. 185-188.

VERDUCCI E. (1960) - *L'impianto idroelettrico di S. Angelo dell'Azienda Comunale Elettrica ed Acque di Roma.* L'Energia Elettrica.

SUMMARY

Earth dams foundations in South Italy and Sicily: review of mechanical properties of clay formations.

A series of data about mechanical properties of clay formations, referring to 37 dam sites in South Italy and Sicily, are reviewed and discussed in the framework of a classification based on structural characteristics.

The limitations of current investigation techniques are underlined; it is argued that development in this field could result in improvements of dams design.