

La geotecnica delle rocce lapidee *

G. OBERTI **

SOMMARIO: Il Relatore, rilevato il generale interesse odierno sull'argomento della meccanica delle rocce, che pure è disciplina di recente fondazione, passa in rassegna una serie di contributi al 1° tema del Convegno concernenti i due argomenti seguenti:

- 1) esperienze sulle caratteristiche geomeccaniche delle rocce lapidee;
- 2) opere di consolidamento e fondazioni in rocce lapidee.

Sul primo argomento le comunicazioni degli Autori riguardano innanzitutto ricerche in sito sulle proprietà delle rocce condotte essenzialmente con metodi geofisici o meccanici. Altre comunicazioni concernono le prove di laboratorio, in particolare le prove triassiali con camera anisotropa su ammassi granulari, le prove su campioni informi di roccia, le indagini sul comportamento meccanico di materiali particolari.

Sul secondo argomento le comunicazioni riguardano casi tipici di fondazioni su roccia per mezzo di pali e problemi di consolidamento di stratificazioni rocciose inclinate.

Nelle considerazioni conclusive il relatore sottolinea (nella trattazione dei problemi relativi al tema in oggetto) la necessità del frequente riferimento a continui anisotropi (per lo più ortotropi) di cui occorre sperimentalmente individuare i parametri meccanici fondamentali.

1. Considerazioni preliminari.

La meccanica delle rocce è oggi di attualità: i Congressi ed i Convegni che ne trattano, sia a livello nazionale, sia a livello internazionale, si moltiplicano ⁽¹⁾. E difficile impresa ormai è seguirne le trattazioni, leggerne le talora ponderose e prolisse relazioni, studiarne e meditarne le conclusioni.

Ricordo, quando, una trentina di anni or sono fui incaricato di esaminare il problema statico di una grande diga ad arco puro sbarrante una stretta di eccezionale altezza e di limitata ampiezza [OBERTI, BONFIOLI, 1936]. Per giungere ad una soluzione possibile fui allora costretto a mettere in conto la deformabilità elastica della roccia di imposta. E ciò non fu cosa agevole poichè — in quei tempi — dominava ancora la classica trattazione del GUIDI [1928] che presupponeva, in accordo con le Norme regolamentari allora vigenti, che le dighe ad arco dovessero venire impostate su rocce,

oltre che sicuramente sane, tali da potersi considerare come teoricamente indeformabili.

Qualche anno dopo la soluzione del problema di sbarrare la larga valle del fiume Piave, poco a valle di Pieve di Cadore, con una diga del tipo arco-gravità fu resa possibile proprio ammettendo la notevole deformabilità della roccia di fondazione [ROBERTI, 1948] che consentiva di valorizzare l'effetto « arco », in conseguenza del cedimento elastico dell'imposta delle « mensole » [DANUSSO, OBERTI, 1955].

All'incirca nello stesso periodo venne sistematicamente introdotto, nel progetto statico delle grandi condotte forzate e delle gallerie in pressione, il contributo resistente della roccia considerata come elemento di contenimento elasticamente deformabile. E si iniziarono al riguardo ricerche sperimentali in grande scala, sia in laboratorio, sia in sito [OBERTI, VERDUCCI, 1949].

Ma, sino a pochi anni fa, ci si limitava ad ammettere — anche nei progetti e nei calcoli relativi alle maggiori opere d'ingegneria civile — gli ammassi rocciosi come statisticamente elastici, omogenei ed isotropi.

In particolare, le ricerche sperimentali in sito, che si andavano moltiplicando, tendevano di regola a valutare l'ordine di grandezza di alcuni parametri fondamentali, specie del modulo elastico, presupponendo legittima l'adozione di formule valide — a rigore — per materiali, oltre che ossequianti alla legge di Hooke, omogenei ed isotropi.

La meccanica delle rocce si è venuta afferman-

* Relazione svolta al IX Convegno di Geotecnica (Genova, 28-29 ottobre 1968).

** Prof. ing. Guido OBERTI, Direttore dell'Istituto di Tecnica delle Costruzioni del Politecnico di Torino.

⁽¹⁾ Nell'ottobre del 1968, a quanto mi consta, sono stati tenuti oltre il nostro Convegno:

— il Congresso di Denver (39° Annual Int. Meeting-Society of Exploration Geophysicist), Sett. 29-Ott. 3;

— il Symposium di Madrid (International Symposium on Rock Mechanics), 21-24 Ottobre;

— il Kolloquium di Salisburgo (XVIII Geomechanik Kolloquium) 17-18 Ott.

do in questi ultimi tempi e sta attualmente estendendosi in maniera impressionante proprio perchè si è ormai convinti che le grandi strutture interessanti l'ingegneria civile presentano di norma un comportamento, statico e dinamico, condizionato dalle effettive caratteristiche fisico-meccaniche delle rocce su cui sono fondate o entro cui vengono scavate. E che le semplicistiche, anche se teoricamente attraenti, ipotesi della elasticità lineare, delle omogeneità e della isotropia costituiscono, almeno nella maggior parte dei casi, una prima troppo grossolana approssimazione.

Inoltre appare ormai chiaro che l'analisi degli sforzi indotti, dalle strutture agenti, entro gli ammassi rocciosi deve subordinarsi all'esame e all'indagine del regime di « coazioni » preesistenti. Orbene la valutazione degli sforzi esistenti entro i massicci rocciosi, da noi iniziata molti anni or sono [OBERTI, 1947] sta divenendo un ramo importante della meccanica delle rocce lapidee come lo dimostra — fra l'altro — la promozione di un Congresso Internazionale a Lisbona nel prossimo maggio 1969 dedicato esclusivamente a tale fondamentale argomento.

Appare quindi sempre più utile intensificare anche in Italia le ricerche, teoriche e sperimentali, al fine di porre a disposizione dell'ingegnere cognizioni che risultano basilari per il progetto e per la verifica razionale delle grandi strutture quando siano erette o incise entro rocce lapidee. Ovvero quando siano, come nel caso delle dighe in rockfill o delle grandi strutture murarie, costituite esse stesse sostanzialmente da insiemi rocciosi — talora di varia natura — opportunamente selezionati.

Il tema della *geotecnica delle rocce lapidee*, considerato nella sua più ampia estensione, può compendiarsi essenzialmente in 4 capitoli:

- ricerche (teoriche e sperimentali) sulle rocce lapidee considerate come elementi o « materiali » a sè stanti;
- opere di consolidamento e di bonifica degli ammassi rocciosi, e fondazioni in rocce lapidee;
- strutture costruite utilizzando elementi di roccia lapidea;
- ricerche (teoriche e sperimentali) sul comportamento, statico e dinamico, delle strutture fondate o scavate in rocce lapidee.

La presente Relazione si limita a trattare i primi due capitoli, che hanno formato oggetto della presentazione di 7 Memorie al nostro Convegno ⁽²⁾.

⁽²⁾ Un elenco delle comunicazioni presentate al Convegno sul tema I: La Geotecnica delle rocce lapidee, è riportato in calce alla presente nota.

Il terzo capitolo che pure ci sembra di notevole interesse, basti pensare alle grandi Cattedrali Medioevali oppure alle moderne dighe in rockfill, potrebbe formare oggetto di un tema particolare per un futuro Convegno.

Il quarto infine è argomento specifico del tema 2 sul quale ci intratterà domani il caro Collega Prof. C. GESTELLI GUIDI.

2. Esperienze sulle caratteristiche geomeccaniche delle rocce lapidee.

Un primo esame delle relazioni presentate al nostro Convegno sarà quindi quello concernente l'aspetto propriamente geotecnico delle prove eseguite in sito o in laboratorio su rocce lapidee.

Le memorie di BERTACCHI, BALDOVIN, FUMAGALLI-MOSCONI, MARTINETTI-RIBACCHI e PELLEGRINO forniscono apprezzabili contributi su questo aspetto particolare. Alcune delle memorie citate comportano riferimenti a problemi strutturali concreti risolti previa indagine geomeccanica ed una di esse verrà specificatamente richiamata anche nel successivo paragrafo, relativo appunto alle applicazioni strutturali.

La memoria dell'Ing. P. BERTACCHI dell'ENEL (Milano) fornisce interessanti dati relativi ad indagini « in situ » sulle caratteristiche geotecniche delle rocce lapidee di fondazione di alcune dighe in esercizio mediante metodi geofisici (sismici e sonici).

Tali metodi usati su tratti relativamente brevi (da qualche decina di metri al metro) portano un notevole contributo all'esame delle rocce lapidee. Velocità di propagazione, smorzamento, assorbimento differenziato delle diverse onde (longitudinali, trasversali, superficiali) possono assumere uno spiccato significato geotecnico per differenziare i tipi di rocce, riconoscere zone degradate, individuare fratture e faglie. L'Autore illustra queste possibilità, esponendo i risultati di numerose campagne di misura, effettuate nelle rocce di fondazione di alcune dighe esistenti, per profondità spinta in un caso sino a cento metri.

Accertata con ricerche preliminari la ripetibilità dei metodi adottati, si è potuto constatare che le condizioni di invaso, pur modificando il regime delle sollecitazioni nella roccia di fondazione della diga, non hanno finora determinato variazioni sulla velocità di propagazione delle onde elastiche di tipo sismico e sonico. È in corso un programma sistematico per controllare nel tempo, con il ripetersi degli invasi e svassi, i valori delle caratteristiche geomeccaniche rilevate con detti mezzi geofisici.

Giova rilevare l'interesse di queste prove oltre che per differenziare i « tipi » di rocce e per indi-

viduare zone degradate, o comunque fratturate, anche per riconoscere variazioni delle caratteristiche geomeccaniche delle rocce di fondazione delle dighe per differenti condizioni (ad esempio di involti ripetuti, azioni sismiche, ecc.) che potrebbero aver modificato la natura del contatto tra strati rocciosi eterogenei o fagliati e quindi alterato i valori delle caratteristiche predette.

La correttezza e l'eleganza delle prove sismiche e soniche non deve peraltro mettere in ombra i procedimenti di rilevamento delle caratteristiche meccaniche delle rocce mediante le classiche indagini « statiche », a mezzo di dispositivi di carico che, ai fini concreti, presentano il vantaggio di sottoporre l'ammasso roccioso in esame a stati di tensione comparabili, se non come ampiezza di diffusione, almeno come intensità, a quelli che intervengono nel caso pratico per cui le prove vengono condotte.

È a questo proposito degna di rilievo l'ampia relazione dell'Ing. BALDOVIN la quale, affrontando il problema dell'appoggio di pali di fondazione su di una formazione rocciosa stratificata (strati di arenaria intervallati da argilla e marna), descrive le prove condotte in sito a mezzo di martinetti in un cunicolo sperimentale.

Sono state cioè effettuate le classiche prove geomeccaniche; ossia le prove di compressibilità e successivamente di schiacciamento (a mezzo di martinetto agente sia in direzione ortogonale e sia parallela agli strati), nonché prove di taglio su blocco di roccia isolato (con superficie di scorrimento prestabilita in corrispondenza dello strato di marna argillosa).

In laboratorio le prove sono state condotte su campioni distinti delle due formazioni (arenaria e marna argillosa) ricavandone in deduzione le caratteristiche meccaniche riassunte nei termini delle curve intrinseche dei materiali dei singoli strati.

Inoltre sono state intraprese alcune prove di taglio, concernenti essenzialmente il contatto tra le due stratificazioni e come tali correlabili con le analoghe prove in sito.

Le rimanenti relazioni (sempre concernenti questo primo gruppo) riguardavano essenzialmente prove di laboratorio.

La relazione FUMAGALLI-MOSCONI merita un cenno particolare. Essa, a differenza delle altre relazioni che si riferiscono a problemi di rocce coesive, propone lo studio della deformabilità degli ammassi granulari sciolti, problema la cui importanza è oggi particolare in vista della realizzazione di dighe in rockfill aventi cubature imponenti e altezze eccezionali, oltre i 200 metri.

Le prove promosse dall'ENEL sono state condotte (presso la ISMES - Bergamo) con l'impiego di

una camera cilindrica, appositamente ideata e messa a punto, atta a stabilire la compressibilità dei materiali granulari in esame.

La camera è costituita da anelli alternati, rispettivamente in materiale (acciaio) ad elevata rigidità e in materiale (sughero, gomma) altamente deformabile, atta a realizzare prove di compressibilità mono-assiale a dilatazione laterale impedita, in assenza di disturbi per attrito laterale sulle pareti.

Le prove, che hanno lo scopo di stabilire criteri di scelta e di controllo sui materiali per rockfill, sono condotte su camere di grandi dimensioni (sino al diametro di 1,30 m. e altezza di 2,00 m.) atte a sperimentare su ammassi sciolti di dimensioni massime alquanto elevate e prossime a quelle reali.

Analoghe prove sono state condotte (su materiali di pezzatura più minuta) su camere ad anelli di dimensioni proporzionalmente ridotte ai fini di impostare lo studio dell'« effetto scala », cioè delle condizioni di similitudine del problema trattato e di stabilire quindi i presupposti per la modellazione del problema spaziale delle dighe in rockfill.

A questo proposito la relazione accerta che a determinare il comportamento del sistema non interviene la dimensione in valore assoluto dell'inerte bensì il rapporto tra le dimensioni dell'inerte e le dimensioni del sistema ed individua quindi la possibilità di modellazione dei fenomeni in oggetto. Accerta inoltre la convenienza di ricorrere a curve granulometriche continue.

Un interessante particolare è poi offerto dalla camera sopradescritta per la possibilità di rilevare gli sforzi sugli anelli di contenimento in acciaio ed in conseguenza di risalire ai valori dei rapporti tra la pressione assiale applicata all'esterno e la pressione circonferenziale di contenimento.

La rappresentazione grafica del Mohr di tale relazione di equilibrio ha permesso di individuare rette limiti⁽³⁾, sempre interne alle linee stabilite con la prova triassiale classica sui medesimi materiali. Ciò induce a sottolineare la netta distinzione concettuale tra le prove su camere ad anelli (che non comportano scorrimenti interni nel materiale) e le prove triassiali normali ove si configurano chiaramente situazioni limiti di rottura.

È certo che quanto rilevato in tale ricerca merita, anche sul piano concettuale e teorico, un opportuno approfondimento per chiarire alcuni aspetti del complesso problema degli equilibri degli ammassi granulari.

⁽³⁾ Gli angoli di equilibrio, anche per tipi vari di inerti, risultano sempre molto limitati e poco variabili (tra i 24° e i 28°).

La relazione MARTINETTI-RIBACCHI concerne una indagine sulla validità e significato delle prove meccaniche su « campioni informi di rocce ».

L'argomento è interessante per gli aspetti pratici, di rapidità ed economia, di prove che non richiedono la squadratura e la rettifica dei provini. È noto che, da tempo, è pratica corrente l'esecuzione della prova « brasiliana » su campioni a grossolana squadratura, ove sia tuttavia prestabilito accuratamente il parallelismo dei due assi lungo i quali è distribuito il carico applicato.

La ricerca di M. R. concerne invece più generalmente la sperimentazione di provini informi per i quali vengono considerati determinati « indici » definiti come rapporti tra i carichi di rottura ed alcune diverse funzioni caratteristiche delle dimensioni dei provini stessi.

Tali « indici », che hanno le dimensioni di sollecitazioni unitarie, vengono confrontati con i risultati di resistenza a rottura ricavati dalle classiche prove. L'interesse dei predetti indici di resistenza è connesso alla soddisfacente costanza del loro valore (per un medesimo tipo di roccia) nell'ambito di una accettabile dispersione che ne garantisce la significatività e attendibilità. Gli AA. pertanto individuano gli indici significativi nel senso sopra accennato e ne propongono l'adozione rammentando peraltro che, per ottenere una media attendibile, occorre un numero più elevato di provini rispetto alle corrispondenti prove su campioni di forma regolare.

E concludiamo la prima parte di questa rassegna con l'esame della estesa relazione di PELLEGRINO sulla « Compressibilità e resistenza a rottura del tufo napoletano ». L'A. rileva anzitutto la differenza, concettuale e tecnologica, tra rocce compatte e rocce tenere; nelle prime la resistenza propria del materiale ha secondaria importanza e l'attenzione viene spostata su stratificazioni e fratture che ne inficiano la continuità. Nelle rocce tenere invece, caratterizzate da fratture piuttosto distanziate e da marcata porosità, è proprio la resistenza intrinseca del materiale che ha rilevanza per l'ingegnere: inoltre in queste rocce, per i suddetti motivi, le prove di laboratorio (su campioni dell'ordine del decimetro) hanno in genere valore significativo.

In questa premessa si inquadra l'interessante indagine sperimentale compiuta dall'Autore su tufi prelevati in 10 differenti località, nella zona di Napoli, differenti per struttura (tipo A e tipo B) e caratterizzati da valori abbastanza larghi della porosità (da 0,4 a 0,6).

Le varie prove, di compressibilità e di resistenza, sono state effettuate su materiale asciutto e saturo, su provini $\varnothing 10 \times h 20$ cm.

Viene dapprima esposto il comportamento del materiale sottoposto a pressione idrostatica, con l'esame delle deformazioni volumetriche. Il materiale si comporta diversamente con il crescere della pressione applicata: il gradiente delle deformazioni è dapprima limitato, quindi aumenta per un progressivo stritolamento del materiale che va trasformandosi in roccia sciolta, per tornare a diminuire, col crescere del carico, una volta che il materiale pulverulento ha trovato il suo definitivo assestamento.

Anche in condizione di compressione triassiale, con pressioni di contenimento sino a 100 Kg/cm^2 , si ravvisa una differenza di comportamento del materiale che ad un certo limite passa dal regime lapideo a quello pulverulento. Questo limite dipende evidentemente dalla caratteristica del campione, e dalla pressione di confinamento.

Nei due regimi si riscontrano, su uno stesso materiale, valori sostanzialmente diversi del modulo e delle caratteristiche tempo-deformazioni.

Dalle prove di rottura in condizioni triassiali (con 4 carichi di contenimento compresi tra 0 e 98 Kg/cm^2), si è riscontrato un andamento lineare della curva intrinseca. Coesione e angolo di attrito sono nettamente influenzati dalla porosità e dal grado di saturazione del campione e dalle condizioni della prova (drenata o non drenata).

Giova riportare una osservazione finale, che acquista maggior rilievo nel caso dei materiali esaminati ma che vuol avere una portata più generale: in natura esiste una gamma continua di materiali con proprietà fisico-meccaniche variabili con gradualità. Pertanto la suddivisione in rocce sciolte, lapidee tenere, lapidee compatte, non implica una differenza sostanziale per quanto riguarda i principi generali che ne regolano il comportamento geomeccanico.

3. Opere di consolidamento e fondazioni in rocce lapidee.

Come accennato nelle premesse la presente relazione non intende soffermarsi sul settore strutturale, anche al fine di non interferire nell'argomento di pertinenza del Prof. CESTELLI GUIDI al II Tema del nostro Convegno: « Il comportamento delle opere nei riguardi geotecnici ».

Sembra qui peraltro opportuno sottolineare la correlazione tra le indagini geomeccaniche e gli aspetti concreti per le quali queste indagini vengono intraprese e costituire quindi in certo senso una introduzione alla successiva relazione al II Tema.

A questo proposito è opportuno ritornare sulla relazione di BALDOVIN a cui si è già accennato nel

precedente capitolo (« Stabilità dei pali di grande diametro impostati su roccia »).

Sulla stratificazione rocciosa, oggetto degli estesi studi geomeccanici di cui si è riferito, appoggiano pali di fondazione prefabbricati del diametro di 1,80 m. e di lunghezza fino a 35 m., sui quali grava l'impalcato, pure in elementi prefabbricati in c.a.p., del molo VII del porto di Trieste. Il carico massimo agente sul singolo palo (ivi incluso il peso del palo stesso) è di 1300 t. circa.

L'Autore accenna agli schemi di calcolo adottati in merito alla portanza dei pali e indica i criteri seguiti per valutare il grado di stabilità della stratificazione rocciosa sotto la configurazione dei carichi agenti. Esamina l'equilibrio di determinate porzioni dell'ammasso delimitato dalle presunte superfici di scorrimento nel meccanismo di alterazione dell'equilibrio per l'azione di un cuneo di rottura che, a seguito dell'azione di punzonamento, si individua immediatamente al di sotto dei pali.

Evidentemente le superfici di scorrimento si stabiliscono essenzialmente secondo le superfici di stratificazione naturale dell'ammasso roccioso, le quali — per le singole posizioni dei pali — assumono differenti inclinazioni sull'orizzontale.

Le precedenti prove geomeccaniche e geotecniche hanno fornito alcuni parametri caratteristici (angolo di attrito interno, pressione di schiacciamento, ecc.) occorrenti per definire le condizioni di equilibrio ed il conseguente grado di sicurezza offerta dalla fondazione.

Infine M. BEOMONTE ci presenta due memorie riferentisi a due interessanti problemi concreti di intervento in presenza di fenomeni franosi.

La prima concerne un esempio di sostegno di scarpata mediante « bullonature ». In tale rapporto si descrive l'intervento stabilizzante proposto a sostegno di una scarpata (in roccia calcarea intensamente fratturata e stratificata a franapoggio) in conseguenza dello scavo di una trincea stradale.

L'impiego di bullonature (mediante bulloni di 18 mm. intervallati di 2 m. in due direzioni ortogonali) comporta un costo complessivo competitivo, a parità di sicurezza di risultato, rispetto a quello di qualsiasi altro pensabile dispositivo di stabilizzazione. Al riguardo si è considerato l'effetto stabilizzante progressivo dei bulloni nel proporzionarne la lunghezza, procedendo dal basso verso l'alto. In effetti man mano che uno strato risulta bloccato con il numero di bulloni necessario, la situazione d'instabilità si sposta via via agli strati superiori.

L'A. sottolinea l'importanza della corretta considerazione della stratificazione rocciosa, constatando quanto potrebbero condurre lontano dalla realtà

le consuete ipotesi di omogeneità e isotropia che, applicate nel caso in esame, fornirebbero erranee conclusioni sulla stabilità della scarpata.

La 2ª relazione BEOMONTE esamina il problema dell'attraversamento di una frana da parte di una strada carrozzabile. La frana oggetto di esame si manifesta soprattutto in relazione ad una stratificazione parallela di roccia calcarea con pendenza del 100 % mentre (in zona contigua) predomina il « flysch » con estesi affioramenti calcarei.

I primi indici di dissesto si rilevarono allorché si realizzarono fondazioni profonde necessarie per le pile del viadotto previsto per il superamento di un vallone. L'entità allarmante del dissesto comportò innanzitutto una serie di provvedimenti per il controllo del fenomeno franoso, per l'individuazione delle direzioni e inclinazioni di scorrimento, ecc.

Si studiarono allora alcune possibili varianti del tracciato stradale (tra le quali l'attraversamento in galleria della zona superficialmente dissestata). E la soluzione prescelta comportò l'adozione di un tracciato a cielo aperto, a mezza costa, lievemente più a monte e l'attraversamento del vallone a mezzo di un rilevato stradale, con « tombino »⁽⁴⁾ in corrispondenza di una sezione più ristretta della forra. La massa del rilevato ebbe — fra l'altro — il compito di equilibrare la precaria stabilità delle sponde.

4. Considerazioni conclusive e prospettive future.

L'esame delle pregevoli relazioni di cui si è ora riferito, testimonianza del crescente fervore degli studi nel settore della Geotecnica in Italia, suggerisce alcune considerazioni di carattere generale.

Innanzitutto è fatto di osservare il giustificato interesse da parte di alcuni Autori per i problemi riferentisi a rocce stratificate per le quali si sente la necessità di una adeguata trattazione.

Per contro si individua una carenza di fondo in merito alle nozioni teoriche sull'anisotropia, cioè sulla meccanica dei continui anisotropi [HEARMON, 1961] e sul comportamento dei materiali anisotropi soggetti a stati complessi di sollecitazione.

Quest'affermazione non intende suonare a critica per i lavori qui presentati bensì induce ad individuare direttive future per la ricerca teorica e sperimentale, al fine di ovviare alla oggettiva carenza di informazioni al riguardo.

⁽⁴⁾ In corrispondenza del « tombino » si procedette successivamente ad una campagna di iniezioni cementizie per bloccare i cedimenti della fondazione alluvionale del rilevato.

I problemi relativi a continui stratificati vanno innanzitutto affrontati, teoricamente o sperimentalmente, (specie su modelli in laboratorio), nell'ambito di una rigorosa schematizzazione, ai limiti, di campo elastico anisotropo ovvero di ammasso (più o meno incoerente) in stratificazioni aventi differenti caratteristiche, sia geometriche (ad es. spessori) sia meccaniche.

A tale fine occorre disporre dei parametri elastici o « moduli » caratteristici dell'anisotropia, attraverso opportune prove locali e globali in sito, ad estensione delle prove che già si conducono ipotizzando il comportamento elastico isotropo dell'ammasso roccioso, e disporre inoltre degli altri parametri (coesione, angoli di attrito interno e di attrito sugli orizzonti di separazione ecc.) occorrenti per lo studio delle rocce stratificate.

È doveroso peraltro rilevare, anche limitandosi al caso di rocce reputate a comportamento elastico ed isotropo, che la tradizionale interpretazione della prova con martinetto in cunicolo, generalmente adottata per saggiare le caratteristiche di deformabilità di un ammasso roccioso e per dedurre — in particolare — un valore indicativo del modulo elastico normale, non è esente da critiche. Di tale prova è stata proposta un'interpretazione più rigorosa [GOFFI, 1963] che esige una più estesa serie di rilievi della deformata delle generatrici del cunicolo interessate dal carico ⁽⁵⁾.

Inoltre anche le modalità di trasmissione del carico del martinetto alla roccia possono notevolmente influire, come abbiamo potuto recentemente constatare a mezzo di ricerche fotoelastiche su modelli, promosse con l'appoggio dell'ENEL, nel mio Istituto al Politecnico di Torino.

In relazione all'ipotesi di continuo elastico anisotropo diversi metodi sono stati proposti per la determinazione delle caratteristiche relative; essi risultano in generale di più complessa applicazione e di più difficile interpretazione rispetto alle analoghe prove in campo isotropo.

Nel caso più generale di un sistema continuo elastico anisotropo, la legge di HOOKE (generalizzata) lega in ogni punto le 6 componenti cartesiane distinte del tensore simmetrico degli sforzi Φ_{ik} alle sei corrispondenti del tensore di deformazione ξ_{jh} attraverso il legame lineare e omogeneo:

$$\xi_{jh} = C_{jhik} \Phi_{ik} \quad (j, h, i, k = 1, 2, 3)$$

⁽⁵⁾ Per migliorare l'attendibilità del risultato è in tal caso opportuno impiegare non un solo martinetto, bensì una serie di martinetti agenti in parallelo (con il che, al limite, ci si potrebbe riferire ad un problema di elasticità bidimensionale).

in cui i « coefficienti elastici » C_{jhik} (aventi dimensioni reciproche di uno sforzo) si riducono notoriamente da 36 a 21 ammessa l'esistenza di un potenziale. Tali coefficienti saranno delle « costanti », caratteristiche dell'ammasso roccioso — ammesso omogeneo —, da valutare ovviamente per vie sperimentali.

Giova fortunatamente rilevare che una delle più comuni anisotropie, accettabile per le rocce finemente stratificate, è quella ortorombica od ortotropa (con assi di simmetria ortogonali) per cui i coefficienti caratteristici si riducono a nove e a cinque nel caso notevole, e più semplice, di un sistema piano [HARMON, 1961]. Se infine, come è d'uso, si ammettono noti i moduli ν di Poisson ci si può ridurre alla determinazione sperimentale di tre sole costanti elastiche: i due moduli di elasticità normale E_x, E_y secondo le direzioni dei due assi (x, y) di simmetria del sistema e del modulo elastico tangenziale

$$G_{xy} = \tau_{xy} / \gamma_{xy}.$$

In un recente studio del mio ottimo collaboratore E. LAULETTA, promosso con l'ausilio del CNR e di prossima pubblicazione, è stato dimostrato che tali caratteristiche possono ricavarsi con l'ausilio di due sole distinte prove; la prima corrisponde alla classica prova del cunicolo a sezione circolare sottoposto a pressione idrostatica e la seconda è una prova del tutto analoga, realizzata entro una opportuna « fessura » (o fenditura) parallela alla stratificazione con l'ausilio ad esempio, di un martinetto piatto.

È interessante rilevare che può esistere il caso limite di roccia ortotropa avente $E_x = E_y = E_0$, costituita, ad esempio, da strati lamellari di materiale intrinsecamente isotropo. In tal caso la prova idrostatica con cunicolo circolare fornisce deformazioni diametrali uniformi, ma esse risultano tanto maggiori di quelle proprie del continuo isotropo dello stesso materiale quanto più basso è il valore del modulo tangenziale (o di scorrimento) G_{xy} per rispetto al valore competente al materiale isotropo

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}.$$

Ne risulta che l'elaborazione dei risultati, desunti dalle dette prove idrostatiche, nell'ipotesi aprioristica di roccia isotropa conduce a valori del modulo normale E inferiori di quelli ottenuti dalle normali prove su martinetto isolato, che approssimano allora meglio il valore reale E_0 . La combinazione delle due prove può invece risultare di estremo interesse per concludere sulla effettiva isotropia d'insie-

me dell'ammasso roccioso in esame; è quanto da noi fatto in recenti ricerche sul comportamento della roccia di fondazione della diga di Place Moulin [OBERTI, REBAUDI, 1967].

La stratificazione che caratterizza le rocce ortotrope comporta peraltro sovente marcate *discontinuità*, fessure e faglie, la cui presenza può falsare l'interpretazione dei risultati sia delle prove meccaniche, sia delle prove condotte con metodi sonici o sismici, quando ci si basi su teorie fondate sull'ipotesi della *continuità* elastica del sistema.

Inoltre la « globalità » delle prove, cioè la loro attendibilità in termini di valori medi significativi per ampia estensione dell'ammasso roccioso appare di più incerta determinazione. L'argomento merita comunque, sia sul piano teorico sia sul piano sperimentale, l'attenzione e l'impegno che appaiono proporzionati all'importanza dei risultati che si potranno conseguire.

Un capitolo particolare di indagini riguarda infine le prove sistematiche di laboratorio sui materiali delle rocce lapidee specie per la possibilità di una loro corretta « modellazione » e per l'esame dei criteri di rottura. Al riguardo lo studio del comportamento alle sollecitazioni bi e triassiali dei materiali anisotropi ci sembra attualmente agli albori; non si dispone neppure di documentazione esauriente in merito ⁽⁶⁾.

E ci sembra interessante accennare qui ad un altro caso rilevante che ci è recentemente occorso di sperimentare. Le colonne del Duomo di Milano sono costituite da una scorza esterna in conci di marmo di Candoglia, praticamente isotropo, con ottime caratteristiche meccaniche e da un nucleo interno in blocchi squadrati di serizzo. Tale materiale può considerarsi un caso tipico di roccia ortotropa che, dalle normali prove di compressione, ha fornito un valore del modulo elastico E_x (normale alla stratificazione) di 85.000 Kg/cm² e un valore del modulo E_y (parallelo alla stratificazione) di 270.000 Kg/cm². Invece i carichi di rottura a compressione semplice sono risultati, rispettivamente, di 1700 e di 1100 Kg/cm² cioè ai moduli più alti corrispondono sollecitazioni a rottura nettamente inferiori.

Possiamo concludere questa già, forse, troppo estesa relazione ringraziando per l'ascolto e rammentan-

⁽⁶⁾ Finora non possediamo neppure l'equivalente delle « curve intrinseche » per i materiali ortotropi, e cioè per il caso più semplice di anisotropia; sembra peraltro che la normale rappresentazione a mezzo dei consueti diagrammi alla MOHR ($\tau - \sigma$) o dei diagrammi tridimensionali riferiti alle tensioni principali ($\sigma_1 \rightarrow \sigma_2 \rightarrow \sigma_3$) sia inadeguata a caratterizzare le caratteristiche « intrinseche » di siffatti materiali.

do specie ai nostri giovani ricercatori le ispirate parole di un grande scienziato L. KELVIN, già richiamate in altro Convegno [OBERTI, 1964]: « *Scientific discovery is generally a prophetic flash of light, a sudden inspiration or improvisation in its final form* ».

BIBLIOGRAFIA

Comunicazioni presentate al IX Convegno di Geotecnica:

- BERTACCHI P. - *Indagine sulle caratteristiche geotecniche delle rocce lapidee mediante metodi geofisici.*
- BALDOVIN G. - *Stabilità di pali di grande diametro impostati su roccia.*
- FUMAGALLI E., MOSCONI B. - *Esperienze su materiali sciolti d'interesse per la progettazione e costruzione delle dighe in rockfill.*
- BEOMONTE M. - *Un esempio di sostegno di scarpata mediante bullonature.*
- BEOMONTE M. - *Superamento, con il tracciato di una strada, di una frana in calcari stratificati slittanti su argille del flysch.*
- MARTINETTI S., RIBACCHI R. - *Validità e significato delle prove meccaniche su campioni inforni di roccia.*
- PELLEGRINO A. - *Compressibilità e resistenza a rottura del tufo giallo napoletano.*
- DANUSSO A., OBERTI G. (1955) - *Diga arco-gravità sul Piave. Criteri di progetto e ricerche sperimentali.* L'Energia Elettrica.
- GOFFI L. (1963) - *La determinazione del modulo elastico di un ammasso roccioso.* L'Energia Elettrica.
- GUIDI C. (1928) - *Statica delle dighe per serbatoi artificiali.* Ed. Bona.
- HEARMON R. F. (1961) - *An introduction to applied anisotropic elasticity.* Oxford.
- OBERTI G. (1944) - *Sul problema statico delle condotte forzate in c. a. Studi e ricerche sperimentali.* L'Energia Elettrica.
- OBERTI G. (1947) - *Ricerche sulle sollecitazioni preesistenti nelle strutture.* Giornale del Genio Civile.
- OBERTI G. (1948) - *Ricerche sperimentali sulla deformabilità della roccia di fondazione della diga del Piave.* Giornale del Genio Civile.
- OBERTI G. (1949) - *Ricerche sul comportamento statico delle condotte forzate in roccia di Soverzene.* L'Energia Elettrica.
- OBERTI G. (1964) - *Results and interpretation of measurements made on large dams.* General Report Quest. 29 - VIII Congress ICOLD - Edinburgh.
- OBERTI G., BONFIOLI B. (1936) - *Research on the stresses of arch dam rings.* II Congress on Large Dams, Washington, D. C.
- OBERTI G., REBAUDI A. (1967) - *Bedrock stability behavior with time at the Place Moulin arch-gravity dam.* IX Congress ICOLD, Istanbul.
- OBERTI G., VERDUCCI E. (1949) - *La galleria forzata dell'impianto di Lovero.* Studi e ricerche sperimentali. L'Energia Elettrica.

S U M M A R Y

General report on theme Rock mechanics of the IX Italian soil mechanics Conference.

The General Reporter begins with pointing out the present day importance of rock mechanics, a relatively recent science, which forms already a subject for countless congresses, papers, initiatives and studies at all levels.

He then surveys a number of contributions presented at the Genoa Conference and dealing with the following items:

a) experiments concerning the geomechanical characteristics of rocks;

b) consolidation works and foundations in rocks.

As to item *a)*, the individual papers at first deal with in-situ tests on rock properties. Of interest in this first chapter are the tests with geophysical (seismic and sonic) methods or with mechanical procedures (jacking tests in an experimental gallery).

A second chapter treats laboratory tests, particularly triaxial tests on an anisotropic chamber (to investigate the deformability of granular masses for use in rockfill dam construction), tests on rock specimens of irregular shape (for a fast rough determination of the mechanical properties) and research on the mechanical behavior of particular materials (Neapolitan tuff).

As to item *b)*, the papers concern typical specific cases of rock foundations by means of piles and consolidation problems of inclined rock stratifications.

In conclusion the General Reporter stresses above all the need (in problems relative to the theme here under consideration) for referring to anisotropic (mostly orthotropic) continua and, therefore, the need for research improvement so as to arrive at an identification of the basic parameters of rock anisotropy and of the strength properties in different directions.