

Alcuni problemi connessi con il moto dell'acqua nei riguardi delle opere di ritenuta*

A. MOTTA **

1. — Se si vogliono affrontare alcuni aspetti dei problemi connessi con il moto dell'acqua nelle rocce sciolte e lapidee nei riguardi delle strutture a servizio dei serbatoi artificiali, è utile premettere una osservazione, anche se essa è di per sé ovvia; osservazione che vale altresì per altre opere quali canali e gallerie idrauliche.

Per molte opere di ingegneria l'acqua è un fatto di « preesistenza », riconoscibile e valutabile nei suoi effetti al momento del progetto. Gli effetti meccanici che la sua « preesistenza » comporta nelle grandi cavità sotterranee, nelle gallerie e nei tagli stradali, nelle fondazioni dei manufatti sono « subiti » dal progettista, il quale, una volta riconosciute le implicazioni che essa provoca, cerca le soluzioni adatte, per le quali dette implicazioni non comportino pregiudizio all'opera.

Nel caso di un serbatoio artificiale invece, gli effetti dell'acqua non solo dipendono dalla preesistenza di livelli idraulici, di pressioni o di umidità del terreno, ma sono invero direttamente provocati, o esaltati, ad opera compiuta, dall'immissione dell'acqua nel serbatoio stesso.

L'acqua, con la sua presenza nel bacino artificiale, determina infatti le condizioni al contorno delle strutture (siano esse artificiali o naturali) e modifica le condizioni all'interno di esse.

Ciò vale sia per le opere, sia per i terreni sulle quali esse sono appoggiate, sia per le sponde che sono chiamate a racchiudere il serbatoio. Il comportamento poi di tali strutture deve essere previsto, sia in regime di quiete del livello idraulico del serbatoio, sia in regime di variabilità, intendendosi per variabilità le modificazioni indotte in detto livello in dipendenza del tipo di esercizio che il serbatoio è destinato a svolgere.

2. — Compito del progettista è dunque quello di riconoscere, con ragionevole approssimazione, i terreni e le loro caratteristiche meccaniche, avvalendosi dell'impiego dei mezzi che la tecnica

mette a sua disposizione, e di ipotizzare le nuove condizioni che nei terreni stessi si verificano in conseguenza della realizzazione dell'opera e dell'immissione dell'acqua nel serbatoio.

Da qui scaturisce la necessità di successive fasi di aggiornamento ed adeguamento del progetto per soddisfare alle ipotesi assunte.

La validità di una siffatta schematizzazione è peraltro fatalmente legata alla affidabilità che si può assegnare alle informazioni fornite dai mezzi di indagine.

E' opportuno cioè non richiedere ai mezzi di indagine più di quanto essi con ragionevole approssimazione possono fornire. E d'altra parte non sempre un sovrabbondante impiego di essi favorisce una più esatta interpretazione delle caratteristiche che interessa conoscere, così come non sempre certe estrapolazioni dei dati conosciuti, da situazioni certe a situazioni presunte, rispettano il grado di ammissibilità consentito dai calcoli di progetto.

Dal discorso dell'affidabilità delle risultanze delle indagini si passa direttamente a quello del controllo che è necessario eseguire in fase esecutiva e di esercizio delle previsioni fatte in sede di progetto.

Per effettuare tale controllo è necessario poter contare su strumenti adatti, predisposti in numero e posizioni adeguate ed installati nel tempo più opportuno e cioè già prima dell'inizio della costruzione delle opere. E' un onere finanziario questo, peraltro non eccessivamente elevato rispetto al costo dell'opera, che deve essere previsto, per mettere in grado il progettista di verificare l'attendibilità delle ipotesi assunte per il calcolo dell'opera e di disporre eventuali successivi adeguamenti del progetto stesso.

3. — Vorrei ora, prendendo spunto da alcuni degli aspetti connessi con gli effetti del moto dell'acqua, richiamare, anche se solo sommariamente, qualche esempio pratico che con detti aspetti ha attinenza.

4. — I terreni di fondazione delle dighe, siano essi rocce sciolte o lapidee, sono spesso sede di circolazione d'acqua.

* Contributo al « panel » sul tema: « Effetti meccanici del moto dell'acqua nelle rocce sciolte e lapidee » all'XI Convegno di Geotecnica, Milano, marzo 1973.

** Dott. ing. Alberto MOTTA - ENEL, CPCIEC, Torino.

Una conoscenza completa di tale aspetto, che è di importanza fondamentale per il progetto, presenta peraltro spesso difficoltà non modeste nella sua acquisizione.

E' questo il caso incontrato per la sopraelevazione della diga di Poggio Cancelli (figura 1) sul Rio Castellano a servizio del serbatoio idroelettrico di Campotosto.

La diga è impostata sui terreni lacustri del Quaternario, che ricoprono la formazione marnosa arenacea del Miocene, costituente tutta la ampia conca di Campotosto. I terreni del Quaternario costituiscono una coltre, di circa 40 m di spessore, in una alternanza caotica di lenti sovrapposte di argille, argille torbose, limi sabbiosi, sabbie limose, ghiaie e sabbia e trovanti

di arenarie; coltre che ha evidenziato una permeabilità fortemente variabile da punto a punto, sia in senso verticale, sia in senso orizzontale.

Sia il Quaternario che il Miocene, anche successivamente alla costruzione della diga di 1^a fase, erano sede di una abbondante circolazione d'acqua con numerose risorgive in corrispondenza della piana valliva. Tale situazione si era verificata in quanto nella diga di 1^a fase, che tratteneva un'altezza d'acqua di circa 12 metri, la zona centrale impermeabile era semplicemente immersata nei limi sabbiosi superficiali senza schermo sottostante di sorta, salvo un velo d'iniezioni binarie nelle due spalle.

I sondaggi ed i piezometri, eseguiti per la costruzione della sopraelevazione, in corrisponden-

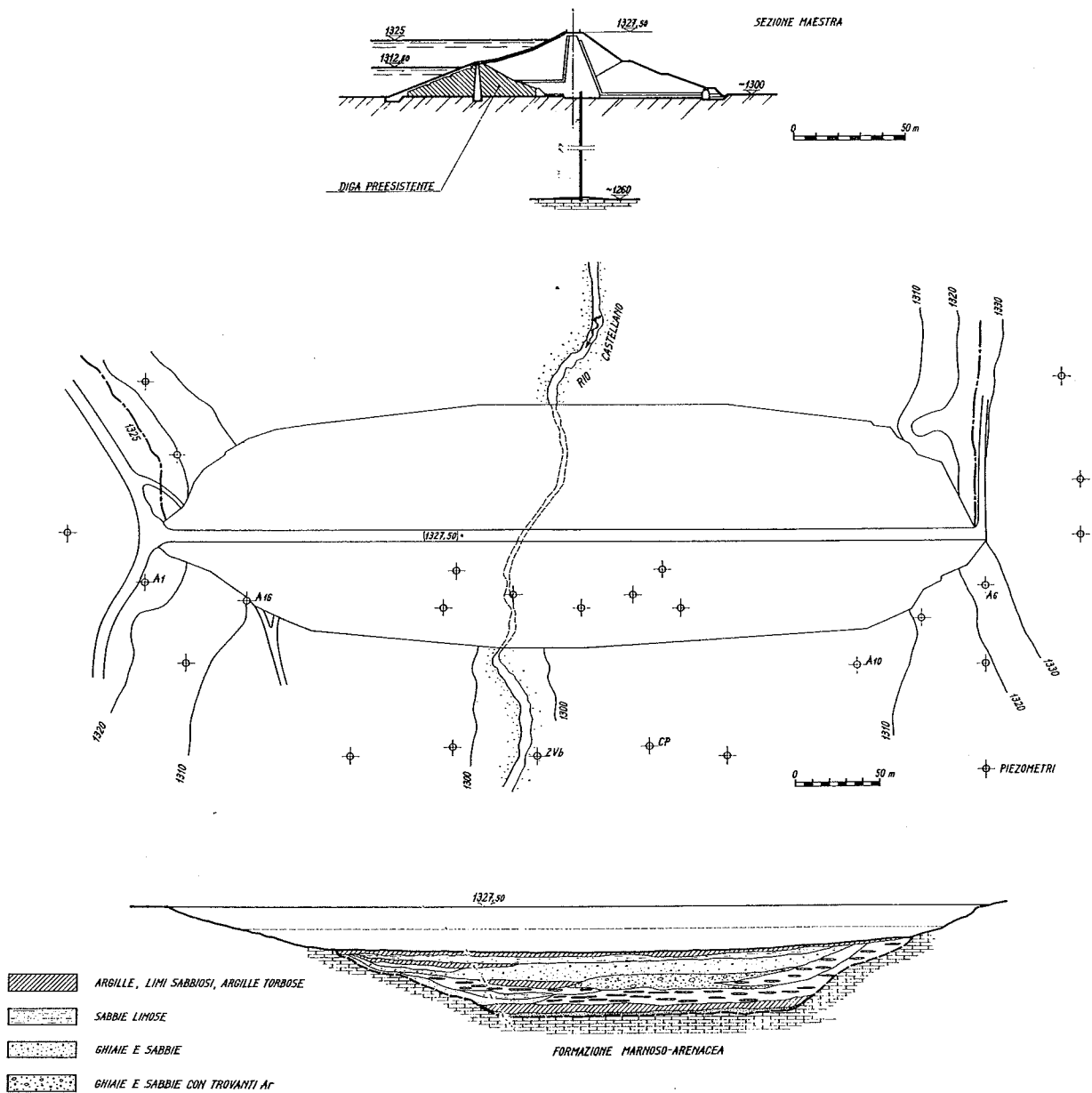


Fig. 1. - Sopraelevazione della diga di Poggio Cancelli.

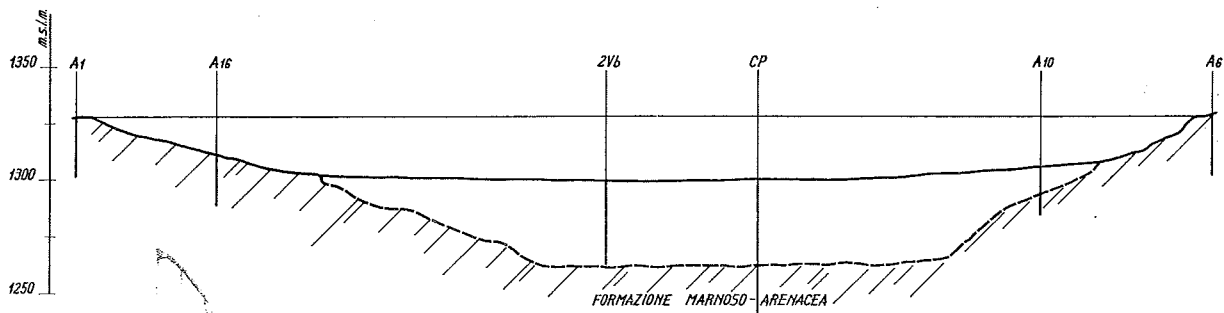
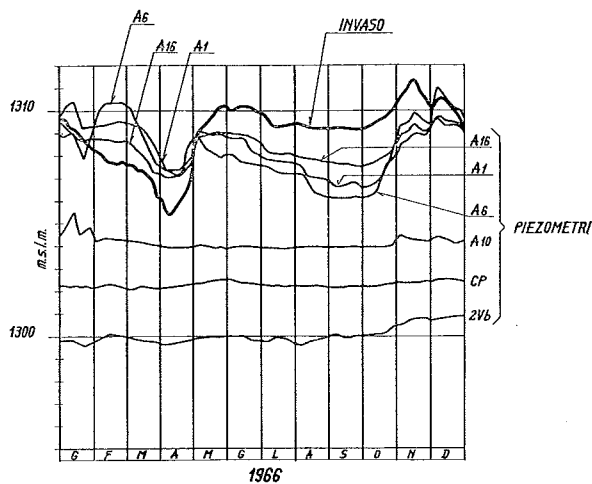


Fig. 2. - Sopraelevazione della diga di Poggio Cancelli.

za delle spalle e dei terreni interessati dalla futura sopraelevazione, evidenziarono sì l'andamento dei livelli idraulici, ma non permisero di definire in maniera convincente quanta della circolazione d'acqua nei terreni del Quaternario fosse da addebitare agli apporti provenienti dalla circostante formazione marnoso arenacea e quanta invece agli apporti della circolazione sottopassante la diga di prima fase.

Fu deciso quindi di costruire una paratia immorsata nelle rocce del Miocene, tale da interessare tutta la zona del Quaternario, nonché un velo profondo circa 50 metri nelle due spalle in roccia.

A schermo completato le risorgive erano sparite, ma la falda nella zona valliva aveva accusato un abbassamento piuttosto modesto. In effetti tale falda risultò in massima parte alimentata dagli apporti laterali provenienti dalle arenarie, apporti per i quali i veli di iniezioni ternarie eseguiti nelle due spalle, si erano dimostrati scarsamente efficaci.

In fig. 2 sono riportati i livelli idrici riscontrati nel 1966, a taglio ormai ultimato in una serie di 6 piezometri posti subito a valle dell'impronta della futura diga.

Si può osservare che mentre i piezometri in-

dicati con 2VB, CP, A10, che interessano i terreni lacustri, evidenziano andamenti dei livelli pressoché costanti nel tempo ed indipendenti dai livelli dell'invaso di 1^a fase, i livelli invece afferenti i piezometri che attraversano la formazione marnoso arenacea, sono abbastanza in buon accordo con le oscillazioni del serbatoio, salvo che per il periodo febbraio-marzo in cui sono influenzati da condizioni meteorologiche locali.

Se ne dedusse la necessità di prevedere per la diga un adeguato filtro orizzontale con funzione drenante dal basso e la possibilità, dopo il primo invaso sperimentale, di prolungare i veli di iniezione previsti sulle due spalle, qualora se ne dimostrasse la necessità in fase di esercizio.

5. — Nelle dighe in materiali sciolti la filtrazione dell'acqua attraverso il corpo diga viene impedita o direttamente sul paramento di monte con rivestimenti impermeabili a contatto dell'invaso, o prevedendo in posizione centrale un nucleo costituito da terre fini con marcate caratteristiche di impermeabilità o impiegando per tutto il corpo diga un unico tipo di terra a bassa permeabilità.

In questi due ultimi casi il progettista, in sede di calcolo, deve prevedere il verificarsi in fase

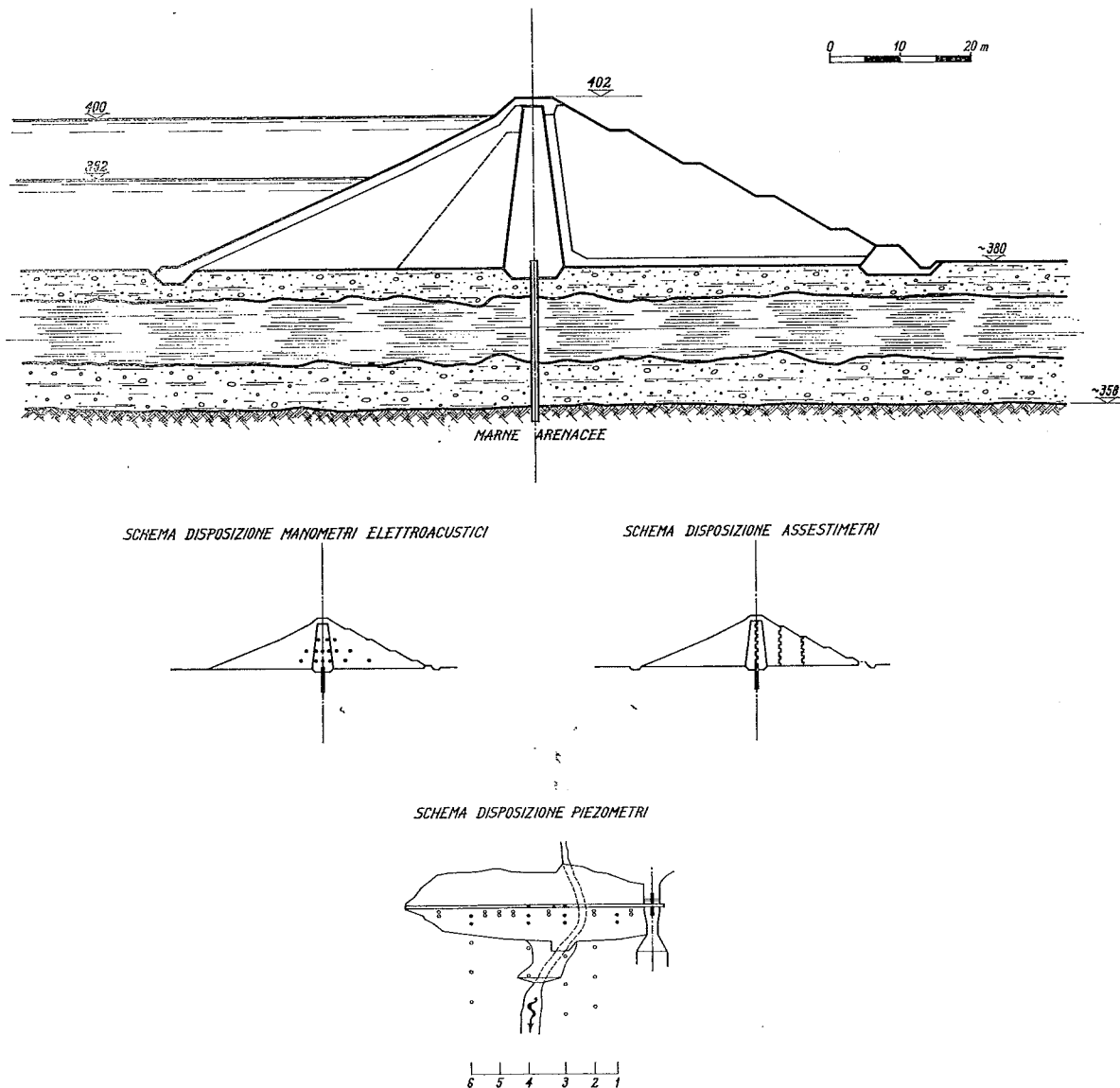


Fig. 3. - Diga di Polverina.

di costruzione e di esercizio di valori di pressioni neutre, talvolta anche piuttosto elevati, in dipendenza delle caratteristiche delle terre impiegate per la costruzione.

E' questo un problema della massima delicatezza e può risultare utile verificare quanto a tale proposito si è rilevato in manufatti già costruiti.

Un caso di qualche interesse, per le misure che si sono potute effettuare, è offerto dalla diga di Polverina (figura 3) sul fiume Chienti costruita nel 1965 a servizio dell'impianto idroelettrico di Valcimarra. Si tratta di una diga con un'altezza di ritenuta di circa 20 metri ed una larghezza di circa 340 metri, del tipo a zone, con nucleo centrale interposto tra due semicorpi fortemente drenanti.

Il nucleo è protetto verso valle da un filtro di

materiali selezionati e verso monte da una zona di transizione, avente permeabilità intermedia tra quella del nucleo e quella del contronucleo di monte.

Una serie di strumenti (manometri elettroacustici, assestimetri, piezometri) posti su 6 allineamenti dà modo di controllare il rilevato e le fondazioni.

Le terre del nucleo (figura 4) pur possedendo buone caratteristiche di impermeabilità, presentavano in cava umidità naturali molto variabili, abbastanza elevate, e comunque mediamente sempre superiori al valore ottimo (circa 14,5%), rilevato in laboratorio ai fini della costipazione.

Nel diagramma centrale sono riportati i valori delle pressioni neutre lette a tre manometri elettro-acustici, installati in tre differenti quote

del nucleo, valori letti sia durante la costruzione, sia durante la fase di primo invaso.

Nel diagramma inferiore sono riportati per gli stessi intervalli di tempo i cedimenti relativi ricavati dalle letture degli assestimetri, riferiti a tre ideali strati di nucleo di 4,5 metri di spessore, strati che contengono rispettivamente i tre manometri sopra richiamati.

Si può dedurre un discreto accordo tra i due diagrammi, sia nella fase di insorgenza delle pressioni neutre, sia nella fase di consolidazione:

- il valore dei cedimenti relativi per il primo strato, per il quale furono impiegate terre a più alta umidità naturale, raggiunse circa l'8 per cento durante la costruzione, contro un 2 per cento per il secondo strato e l'1% per il terzo strato;
- i corrispondenti valori del rapporto $\epsilon/\gamma H$,

(che chiama in causa l'altezza del carico medio sullo strato considerato) sono rispettivamente, a meno di un coefficiente dimensionale, 2,7-0,9-0,7;

- per lo strato inferiore del nucleo, il valore massimo della pressione neutra prima della fase di consolidazione fu, in altezza d'acqua, pari circa all'altezza del rilevato sovrastante il piano di installazione del manometro.

6. — Per le dighe imbasate su terreni permeabili le filtrazioni al di sotto del corpo diga sono impedito ricorrendo all'adozione di schermi che, a seconda delle caratteristiche e dello spessore dei materiali di fondazione, sono costituiti o da veli di iniezione (ad esempio le dighe di Bomba e S. Pietro), o da tagli in muratura (ad esempio la diga di S. Valentino), o da paratie in calcestruzzo di limitata larghezza (ad esempio le

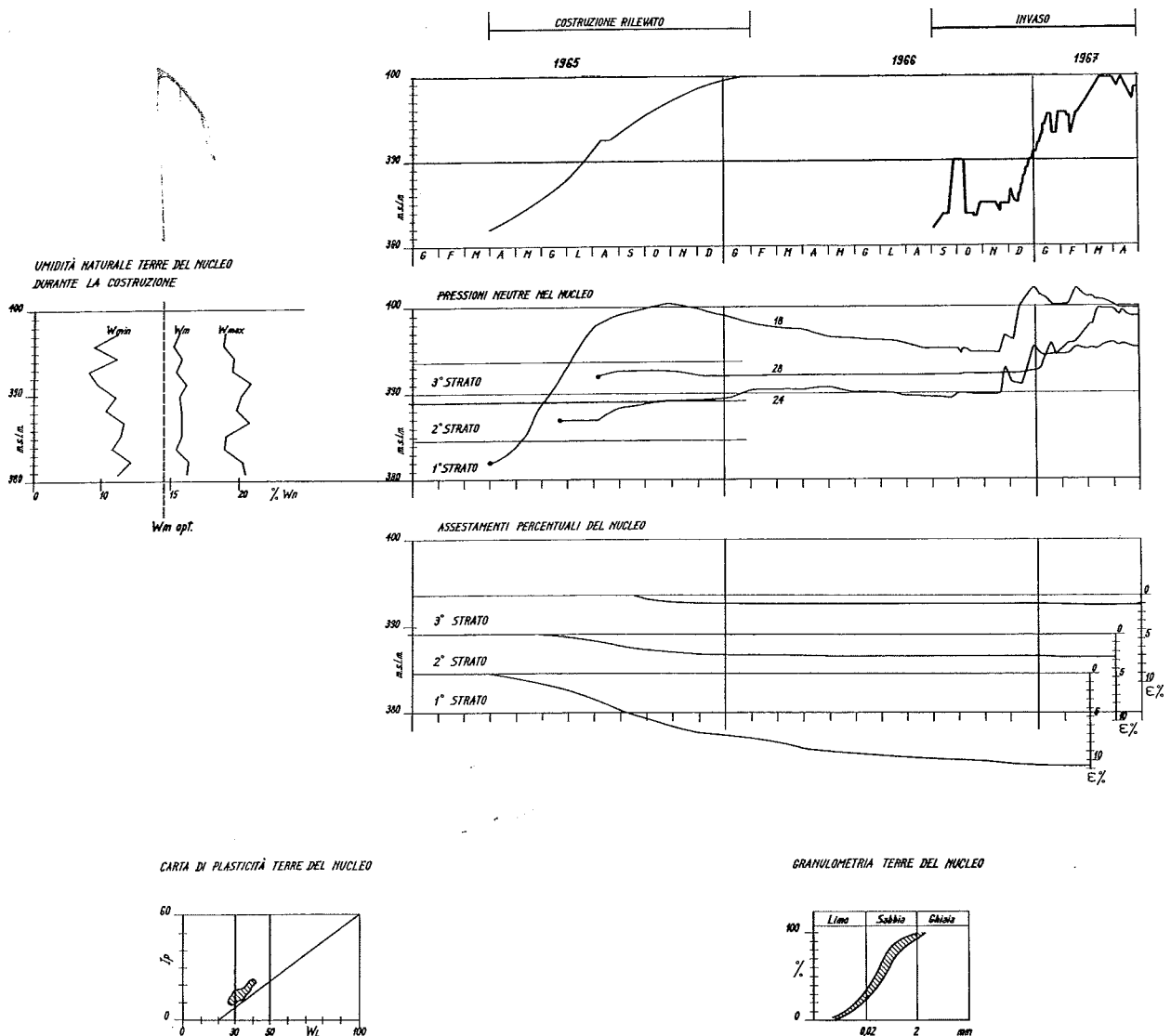


Fig. 4. - Diga di Polverina.

dighe di Zoccolo e di Corbara). Lo sviluppo della tecnologia di scavo a sezione ristretta, anche per forti profondità, in presenza di fanghi di bentonite, ha offerto un comodo strumento per risolvere, con costi abbastanza contenuti, il problema delle permeazioni nei terreni di fondazione.

Ma la paratia in calcestruzzo non si presta di per sé a resistere ad elevati sforzi trasversali, salvo attuare particolari provvedimenti di armatura e tirantatura.

Quando poi la paratia è impiegata a costruire il taglione di una diga ed attraversa materiali di elevata plasticità destinati perciò a subire deformazioni rilevanti, non è facile determinare gli sforzi ai quali essa deve resistere e verificare quindi le caratteristiche di progetto. In questi casi è pertanto opportuno dimensionarla piuttosto largamente, sia riguardo allo spessore, sia riguardo all'armatura.

La mancata adozione di siffatte precauzioni può comportare il verificarsi di lesioni anche nella parte alta sottostante il nucleo.

Per la diga di Polverina i terreni di fondazione, costituiti da depositi recenti fluviali e fluvio-lacustri a grana varia posti a tetto della formazione di base delle marne arenacee, possono essere schematicamente rappresentati da uno strato pressoché continuo di argille di discreta plasticità dello spessore di circa 8 metri, interposto tra due strati di ghiaia e sabbia. Agli effetti di schermo una paratia in calcestruzzo

della profondità di circa 20 metri e dello spessore di 50 cm, munita di una leggera armatura per tutta l'altezza, si immorsa nella formazione di base.

In sede di vaso sperimentale (figura 5) le perdite della diga, provenienti dal filtro, cominciarono immediatamente ad incrementarsi oltre i limiti previsti, raggiungendo in 20 giorni per un carico di soli 10 metri, il valore di oltre 20 l/s.

L'osservazione accurata di tutta la strumentazione della diga portò da un lato a determinare che presumibilmente la maggior parte della filtrazione era concentrata tra le sezioni 3 e 4 e d'altro canto portò a convincimento che il fenomeno non fosse da attribuirsi a deficienze di alcun genere addebitabili alla struttura della diga.

In definitiva tali previsioni, rese possibili dalla rete di apparecchiature predisposte, fecero ritenere che presumibilmente fosse intervenuto qualche fenomeno di lesione nella parte alta della paratia in corrispondenza dello strato di ghiaie e sabbie immediatamente sottostante al nucleo. E che questa previsione fosse centrata fu confermato dal fatto che la campagna di iniezioni (figura 6) eseguite con miscele binarie di tipo tamponante nel rapporto 25/6 e ternarie tipo 81/16/3, in fori intervallati di m 1,50 e ad inclinazione alternata del 15% e del 5%, portarono in brevissimo tempo al tamponamento della zona

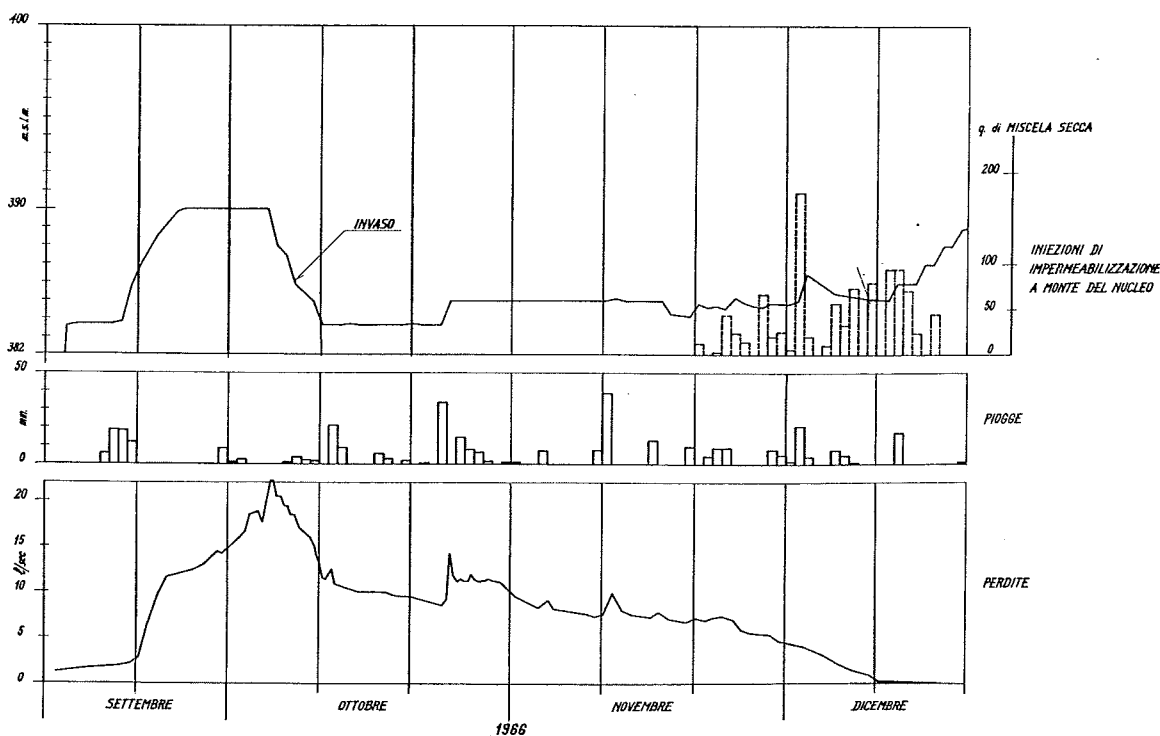


Fig. 5. - Diga di Polverina, vaso sperimentale.

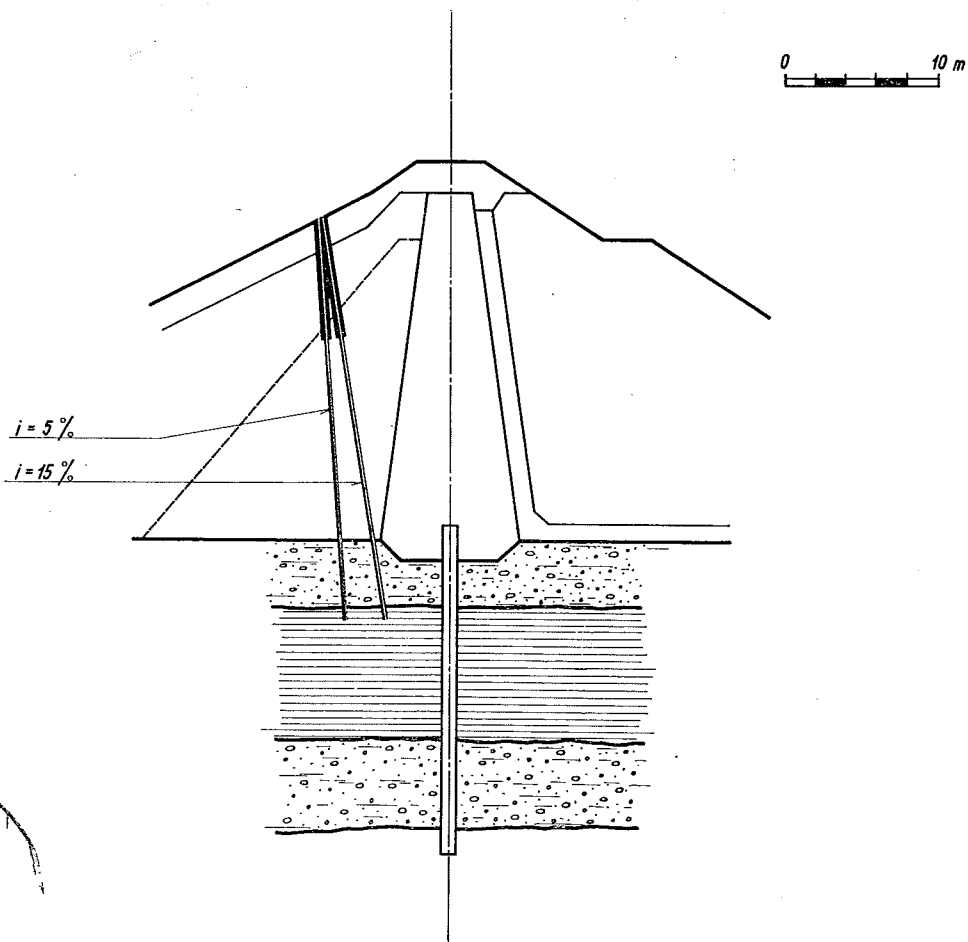


Fig. 6j - Diga di Polverina; schema delle iniezioni di impermeabilizzazione a monte del nucleo.

dissestata. Dopo soli 20 giorni di lavoro, iniettando proprio nella zona compresa tra le sezioni 3 e 4, le perdite si annullarono praticamente ed ai successivi reinvasii non superarono mai i limiti previsti, di circa 1,5 l/s in corrispondenza del massimo invaso.

7. — Nell'affrontare i problemi connessi con la costruzione dei bacini artificiali, il progettista si trova spesso a dover verificare la stabilità di strutture naturali che in conseguenza della creazione dell'invaso sono chiamate a svolgere anche esse funzioni di contenimento.

E' questo il caso delle sponde dei serbatoi in genere e di quelle particolari parti di esse, che, per la morfologia dei luoghi, rappresentano delle vere e proprie dighe naturali.

Mi riferisco a quelle selle, che, per la loro limitata altezza rispetto al livello dell'invaso, rappresentano elemento di delicata valutazione.

Pur non volendo sviluppare alcuna trattazione sulle metodologie più appropriate di indagine e di calcolo a tale riguardo, penso sia opportuno spendere qualche parola allo scopo di mettere

in luce i particolari aspetti dell'impostazione di un siffatto problema.

Gli elementi che entrano in gioco nella calcolazione sono rappresentati praticamente:

- dal carico idrostatico dell'invaso;
- dalle caratteristiche del terreno (peso di volume e caratteristiche meccaniche);
- dai preesistenti e futuri livelli idrici ed eventuali pressioni neutre;
- da eventuali azioni sismiche.

Le indagini devono ovviamente essere rivolte alla conoscenza di questi elementi, per i quali le moderne tecnologie offrono differenti metodi di indagine, che peraltro in alcuni casi non sempre possono soddisfare appieno il progettista, specialmente quando si tratti di riconoscere le caratteristiche meccaniche delle rocce che formano il baluardo naturale; sono note ad esempio le difficoltà che si incontrano a tal riguardo per un caotico eterogeneo.

Ma anche nel caso, oserei dire fortunato, che si possa avere una conoscenza di base delle caratteristiche meccaniche della roccia, le valuta-

zioni devono superare non poche difficoltà interpretative.

Ad esempio per la Sella S. Maria (figura 7) chiamata a contenere la sopraelevazione del Serbatoio di Campotosto, gli studi eseguiti dal Servizio Geotecnico dell'ENEL, condussero alle seguenti considerazioni conclusive:

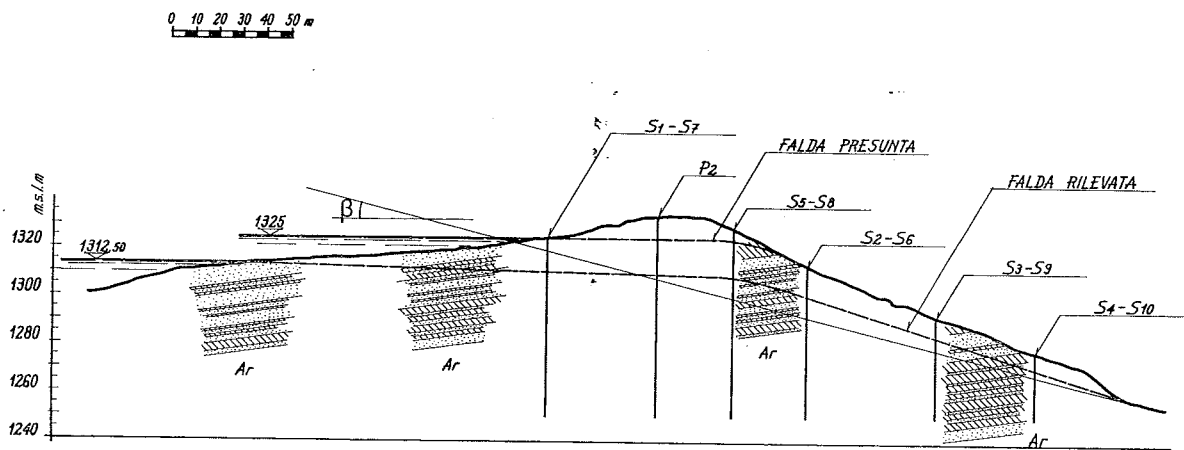
— I sondaggi a perforazione ed un cunicolo di assaggio avevano confermato le previsioni geologiche preliminari, evidenziando che le marne arenacee e le arenarie a cemento calcitico o calcitico argilloso, si presentavano in strati o pacchi di strati alternati di spessore variabile tra 10 cm e 1 metro, con giacitura nell'insieme uniforme caratterizzata da una inclinazione di pochi gradi (5° - 15°) verso il serbatoio, con permeabilità d'insieme compresa tra 10^7 e 10^5 cm/s.

— Le prove geomeccaniche avevano indicato che alla formazione marnoso-arenacea della Sella poteva essere attribuito un angolo $\varphi = 32^{\circ}$ ed una coesione $C = 3,1 \text{ T/m}^2$.

— Le misure effettuate ai piezometri avevano permesso di ricostruire il regime dei livelli idrici, che risultava direttamente correlato con la quota dell'invaso del serbatoio.

In definitiva era possibile calcolare per varie inclinazioni dei supposti piani di scorrimento i valori dei fattori di sicurezza loro afferenti.

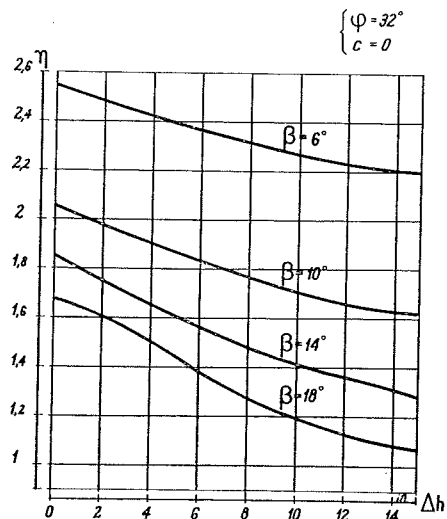
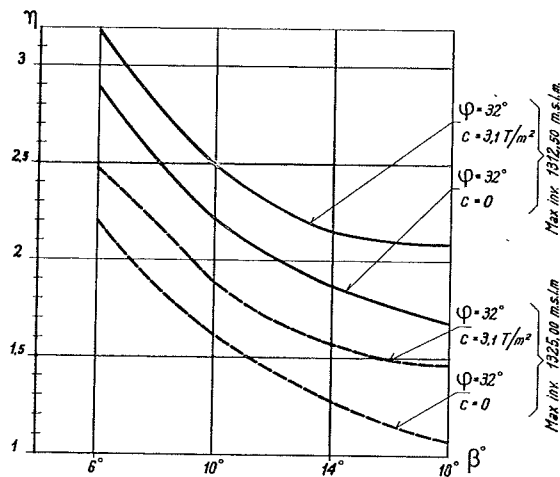
Estrapolando l'andamento dei livelli idrici dal caso dell'esistente invaso, al caso della sopraelevazione, i corrispondenti valori del fattore di sicurezza, per un presunto piano di max pendenza, raggiungevano praticamente l'unità nel caso non si potesse fare affidamento sulla coe-



Ar - FORMAZIONE MARNOSO-ARENACEA ($\varphi = 32^{\circ}$, $c = 3,1 \text{ T/m}^2$)

P2, S1, S2, ... - PIEZOMETRI

β - INCLINAZIONE DEI PRESUNTI PIANI DI SCORRIMENTO



Δh - VARIAZIONE DEL LIVELLO DELLA FALDA RISPETTO AL MASSIMO LIVELLO DELLA SITUAZIONE ATTUALE

Fig. 7. - Sella S. Maria.

sione (linea tratteggiata del diagramma riportato a sinistra).

Si rendeva pertanto necessario fare ricorso ad interventi costruttivi per costringere i livelli idrici a mantenersi entro limiti (diagramma a destra in basso) sufficienti (e cioè con una sopraelevazione max di 4-5 metri rispetto agli attuali) e tali, come appare dal diagramma riportato a destra, da non far scendere il fattore di sicurezza al disotto di 1,5, interventi che furono individuati in uno schermo di iniezione profondo 45 metri ed in una eventuale galleria di drenaggio munita di pozzi filtranti ubicata alla quota 1300 circa.

8. — Sin qui ho sfiorato alcuni dei problemi che interessano il comportamento delle strutture nel caso che il livello idraulico del serbatoio sia considerato in stato di quiete.

Ma i serbatoi a scopo idroelettrico sono spesso destinati a svolgere un particolare tipo di esercizio che richiede frequenti oscillazioni, anche giornaliere, dei livelli di invaso. Mi riferisco in particolare a quei serbatoi che sono al servizio di impianti di produzione idroelettrica da ripompaggio, serbatoi nei quali i livelli subiscono cicliche variazioni che, in dipendenza delle imponenti potenze installate nelle centrali (sino a 1000 e più MW) e dei conseguenti grossi volumi

d'acqua in giuoco, assumono valori anche di 10 e più metri nelle 24 ore.

Nel serbatoio inferiore dell'impianto di Revin, ad esempio, la variazione di livello prevista di m 15,70 avviene giornalmente in 5 ore in fase di produzione ed in 7. 1/2 ore in fase di pompaggio, per un volume di acqua $6,9 \times 10^6$ m³.

Una siffatta variabilità del livello d'invaso costituisce per tutte le strutture, siano esse naturali od artificiali, che racchiudono il serbatoio, un nuovo e ben particolare vincolo.

Assumono pertanto il più vivo interesse gli studi attualmente in corso presso alcuni Istituti Universitari sugli effetti che le variazioni cicliche del carico determinano nei terreni nei riguardi delle loro caratteristiche meccaniche e delle pressioni neutre, studi sui quali mi auguro che in questa sede ci venga portata dalla voce degli « addetti ai lavori », qualche prima notizia che ascolteremo con la maggiore attenzione.

E' questo, per progettisti e costruttori, un argomento di particolare attualità, in vista dei nuovi compiti che oggi soon demandati agli impianti idroelettrici, argomento che, per le deduzioni ad esso conseguenti, consentirà di affrontare con maggiore rigorosità i problemi connessi con la stabilità di sbarramenti e di sponde dei serbatoi a servizio degli impianti da ripompaggio.

SUMMARY

Some problems of water movement in soils and rocks in the field of artificial reservoirs

The paper represents a contribution to the panel

discussion on the theme: « Mechanical Effects of Water Movements in Soils and Rocks » at the XI Italian Geotechnical Conference, Milano, march 1973.