

## OPERE ED IMPIANTI

DOTT. ING. TITO OGNIBENI

### Fondazioni profonde di dighe, ture e diaframmi

#### Sommario

*Premessi alcuni cenni generali sulla tecnica delle fondazioni profonde per dighe, ture e diaframmi, con speciale riguardo alle condizioni indispensabili per la corretta ed efficace applicazione dei principali metodi in uso, vengono passate in rapida rassegna, ed illustrate, alcune costruzioni fra le più tipiche e significative realizzate, in questo campo, sia in Italia che all'estero.*

Gli scavi per l'impostazione sulla roccia di una diga o del suo diaframma, nel caso di una diga in terra o in scogliera, rappresentano talora un problema difficile, in modo particolare quando il fondo roccioso da raggiungere si trova a rilevante profondità.

Sono noti parecchi casi, in Italia e all'estero, dove la creazione di uno sbarramento è subordinata alla possibilità tecnica ed economica di realizzarne la fondazione o le ture per l'esecuzione degli scavi relativi.

Nella scelta degli esempi di fondazione, oltre alla premessa della profondità che giustifica il titolo della relazione, si è cercato di riferire i casi più interessanti e di formare una rassegna pressochè completa dei vari metodi di fondazione o di scavo.

Premesse e ricerche geologiche, geognostiche e idrologiche, indagini preliminari e supplementari, note critiche, proposte di soluzioni più razionali vengono citate quando contribuiscono a meglio inquadrare il problema e la sua soluzione, nonchè a prospettare varianti possibili in casi analoghi.

In ogni caso, lo studio e la scelta della soluzione più razionale per i problemi della fondazione e per la sua realizzazione pratica sono possibili solo quando siano stati accuratamente rilevati con sondaggi ed altri metodi di ricerca gli elementi necessari; se invece le indagini preliminari sono state omesse od eseguite in modo non esauriente, si possono avere delle amare sorprese [1], come risulterà da vari casi che citeremo nel seguito della nostra esposizione.

Si ritiene pertanto non inutile far precedere la rassegna di vari esempi di fondazioni profonde da un breve richiamo alle indagini preliminari occorrenti nei principali casi che si presentano nella realizzazione dei serbatoi. L'impostazione prescelta dal progettista in base a criteri topografici ed economici (massimo invaso con il minimo volume di diga) deve essere visitata dal geologo, il quale esaminerà le condizioni geognostiche del versante d'aria e stabilirà la posizione approssimativa dei sondaggi necessari per la determinazione dello spessore dei materiali di copertura del fondo roccioso (versante subalveo) che costituirà l'appoggio della diga o l'incastro del diaframma. Egli cercherà di valutare con una certa approssimazione lo spessore stesso, basandosi su riferimenti desunti dalla carta geologica della regione, se esiste, o comunque reperiti e controllati sul posto non solo nella zona d'impostazione, ma anche a monte e a valle, se necessario: potrà così indiziare la presenza di una valle antica e quindi l'epigenetismo della valle recente

da sbarrare e l'eventuale pericolo di perdite attraverso le alluvioni che riempiono la valle primitiva.

Qualora vi siano varie impostazioni possibili, e anche per circoscrivere il programma dei sondaggi definitivi con prelievo dei campioni della roccia in posto, conviene ricorrere all'indagine preliminare col metodo geofisico e precisamente geosismico. Questo metodo è meno costoso e più rapido dei sondaggi pur fornendo dei dati sufficientemente esatti per la scelta preliminare dell'impostazione più favorevole e per l'ubicazione dei sondaggi normali destinati a completare l'indagine di dettaglio. Gioverà comunque tener presente che l'indagine geosismica (e ancor più quella geoelettrica) è normalmente suscettibile di un errore siste-



Fig. 1. - Sondaggi geognostici per una diga a 2 000 m s.l.m.

matico dell'ordine di una decina di metri (in più o in meno), errore che è di poca importanza nelle ricerche minerarie, ma sensibile nelle opere di ingegneria civile.

Nelle gole d'erosione fluviale colmate in seguito ad alluvioni il sistema geosismico non è applicabile per la vicinanza delle pareti rocciose. In simili casi non rimane che il metodo classico e preciso, quello dei sondaggi e dei pozzi e cunicoli d'esplorazione, al quale sempre si ricorre per il rilievo più o meno dettagliato del fondo roccioso. Il sistema di sondaggio più razionale, sicuro e, in definitiva, più economico è costituito dalle trivellazioni con colonna di rivestimento in tubi d'acciaio, eseguite con sonda rotativa (fig. 1 e fig. 23).

I testimoni cilindrici (o «carote») di roccia estratti danno indicazioni precise sulla natura e struttura della roccia stessa, e il foro calibrato può venire frazionato con opportuni otturatori consentendo di determinare la permeabilità per sezioni, mediante l'iniezione d'acqua in pressione, e trarre quindi utili indicazioni circa il probabile assorbimento di boiaccia per la creazione di uno schermo di impermeabilità. Spesso conviene eseguire negli stessi fori di sondaggio in roccia le iniezioni di cemento prima del

ritiro della colonna di rivestimento; e ciò per avere anzitutto indici ancora più probatori sull'esistenza di fessure e sulla loro estensione, nonché sul probabile assorbimento di cemento nell'esecuzione di lavori di impermeabilizzazione, e in secondo luogo per utilizzare il foro che andrebbe altrimenti perduto.

Particolare cura va rivolta alla redazione del rapporto di perforazione, alla classifica dei materiali attraversati e soprattutto delle carote rocciose (nelle apposite cassette), alla registrazione delle perdite di acqua durante la perforazione, ecc. Il diametro minimo delle perforazioni in roccia, che garantisce una auscultazione adeguata, dipende dalla compattezza della roccia e dal tipo di perforazione adottato. Con l'impiego del doppio carottiere si può ottenere una buona percentuale di carote anche in rocce tenere (marna, ecc.).

Nelle antiche valli glaciali riempite da frane e da blocchi spesso enormi, il metodo dei sondaggi tubati è di difficile ed onerosa applicazione e si ricorre allora, per l'individuazione del profilo roccioso, all'esecuzione di pozzi e di cunicoli come è stato praticato all'Alpe Gera sul Cormòr, affluente del Mällero, alla stretta del Wäggital, ecc.

Analoga soluzione e cioè pozzi verticali con galleria subfluviale viene pure adottata, in luogo dei consueti sondaggi, nei corsi d'acqua rapidi e profondi, specialmente in forre calcaree, nelle quali non sono da escludersi strapiombi (fig. 11): notevoli esempi si hanno nelle indagini contemporaneamente eseguite a Génissiat e a Malpertuis sul Rodano, di cui riferisce minutamente il Lugeon [2] e [5]. Fori praticati dai pozzi e dai cunicoli o dalle gallerie subfluviali e spinti possibilmente fino allo sbocco nelle alluvioni o nella sezione liquida della forra danno il contorno per punti del profilo roccioso.

Questo metodo d'indagine è tuttavia costoso e non scevro di incognite, di pericoli, di inconvenienti. Così a Serre-Ponçon [2-3], il pozzo verticale attaccato in sponda destra della Durance, nei calcari liassici, con l'intenzione di sottopassare il fondo roccioso, ha spillato a 60 m di profondità delle sorgenti termali (49 °C) ed è stato poi sospeso perchè il proseguimento comportava una spesa eccessiva; così non è ancora noto con esattezza lo spessore del materasso-alluvionale, che si presume dell'ordine di 100 m: questa sezione doveva venire sbarrata, secondo il progetto originale, con una diga a gravità di 85 m circa di altezza sul livello del fiume per creare un invaso di 600 milioni di m<sup>3</sup> (fig. 25).

Anche nel pozzo scavato in un ripiano accessibile della sponda sinistra del Drac, a monte dell'attuale diga del Sautet, e seguito da galleria cieca subfluviale, si incontrarono delle sorgenti calde («vaclusiennes»), che durante l'esecuzione della diga venivano pompate, d'inverno, alle due stazioni d'iniezione di cemento.

Citiamo infine l'esempio del Wäggital, dove con pozzi e cunicoli praticati sulle due sponde si è rilevato un cosiddetto «letto minore» dovuto all'erosione fluviale, ristretta, che ha fatto seguito a quella più ampia e potente dovuta all'azione glaciale.

È ovvio che qualora i cunicoli d'esplorazione vengano a ricadere in corrispondenza del taglione della diga e quindi nella zona dello schermo di impermeabilità, essi debbono venire raccordati allo stesso come qualunque altra galleria, eventualmente rivestiti o addirittura tampognati con calcestruzzo e intasati con iniezioni; se il sistema viene a trovarsi nella zona più a valle del taglione, esso può far parte invece del dispositivo drenante della diga, integrandolo eventualmente con fori opportunamente diretti.

Al predetto sistema d'indagine va assimilato quello eseguito per lo studio della possibile impostazione di una grandiosa diga progettata presso Andermatt [4]: si è profittato del traforo ferroviario del S. Gottardo per eseguire da questo dei fori a diamante diretti verso l'alto per la determinazione dello spessore delle alluvioni all'impostazione della diga e nel bacino del futuro invaso.

Le maggiori difficoltà inerenti allo scavo o all'attraversamento di una coltre alluvionale o morenica derivano dalla presenza, nella coltre stessa, di una falda acquifera. E tali difficoltà sono tanto più gravi e onerose quanto maggiori sono la permeabilità del materiale acquifero, la profondità degli scavi (che si traduce in carico idrostatico) e quanto più insidiosa è la natura del materiale in posto.

Non interessa conoscere con precisione la permeabilità se si progetta di raggiungere il fondo roccioso con l'ausilio esclusivo dell'aria compressa, nè interessa conoscere sia la permeabilità che le caratteristiche meccaniche del materiale in posto quando se ne prevede il congelamento.

Quando invece si pensi di raggiungere la roccia con scavi a cielo aperto e aggettamento normale, o con pozzi filtranti per l'abbassamento della falda (anche se tale sistema interviene a sussidio dell'affondamento di cassoni ad aria compressa), almeno uno dei sondaggi preliminari (supposta una relativa uniformità della massa di alluvioni e quindi del coefficiente di permeabilità) deve venire equipaggiato come pozzo filtrante in modo da permettere con prove di pompaggio, la determinazione del coefficiente di permeabilità; in base a questo si potranno stabilire con sufficiente approssimazione le portate da emungere attraverso i dispositivi filtranti che si pensa di adottare. I sondaggi più prossimi a quello di prova possono costituire dei tubi piezometrici per il controllo della depressione della falda, a meno che si preferisca affondare degli appositi tubi con punta finestrata.

La determinazione del coefficiente di permeabilità acquista un'importanza fondamentale quando il diaframma non può incastrarsi nella roccia in posto perchè essa si trova a profondità non raggiungibile per ragioni tecniche o economiche e si devono calcolare le perdite per filtrazione attraverso la sezione non diaframata della coltre permeabile.

La determinazione delle caratteristiche meccaniche del materiale è consigliabile in quasi tutti i casi: è indispensabile in previsione di scavi aperti o armati come pure nel caso di affondamento di cassoni con qualsiasi metodo.

Questa ultima soluzione ha avuto buon successo in numerose applicazioni nelle alluvioni sciolte relativamente omogenee, quali si riscontrano nel corso medio dei fiumi, raggiungendo, sia pure con l'ausilio dell'abbassamento di falda, profondità anche dell'ordine di 50 m; si è dimostrata invece praticamente irrealizzabile in terreni morenici, perchè i blocchi in essi contenuti ostacolano l'avanzamento e provocano facilmente la deviazione dei cassoni.

L'indagine geotecnica deve essere ancora più accurata e completa (con prelievo ed esame in laboratorio di campioni indisturbati ottenuti mediante sondaggi di diametro adeguato) quando la diga o il diaframma vengono impostati su terreni compressibili, come è stato il caso per la diga e il taglione di Bou-Hanifia, di cui si riferirà più innanzi.

Riepilogando, vediamo come ogni impostazione di diga o di diaframma rappresenti un caso specifico non solo per la scelta del tipo di sbarramento ma anche per l'indagine preliminare, i cui risultati possono d'altra parte costringere a modifiche di progetto. Occorre quindi la stretta collaborazione del geologo e dell'ingegnere, ambedue dotati di larga esperienza e competenza specifica.

Formano compito dell'ingegnere l'interpretazione e la valutazione dei dati idrogeologici acquisiti attraverso l'indagine preliminare per la scelta del sistema più razionale di scavo o di diaframazione della sezione subalvea.

Le condizioni idrogeologiche sono specialmente determinanti per le ture e i diaframmi. Morene, conoidi e frane non permettono di solito che un'unica soluzione: lo scavo armato.

Infatti, la presenza di numerosi trovanti e blocchi esclude l'infissione di palancole, rende economicamente impossibile la creazione di paratie con pali trivellati, ostacola l'avanzamento dei cassoni affondati ad aria compressa e

ne provoca la deviazione. Lo stesso vale per i cassoni autofondanti. Notevoli difficoltà si incontrano anche nella trivellazione per la posa dei tubi di iniezione, dei tubi congelatori o filtranti. La composizione eterogenea dei materiali di queste formazioni geologiche rende aleatoria quanto mai la riuscita delle iniezioni di cemento, di argilla o di altri mezzi impermeabilizzanti: asfalto, bentonite, emulsioni bituminose. Le formazioni diluviali o alluvionali, dalle fini alle grossolane, si lasciano diaframmare con qualsiasi sistema. Il limite di profondità va dai 20 ai 24 metri per le palancole di acciaio; il primo è stato raggiunto nei diaframmi delle ture che presidiano lo scavo della diga di Génissiat sul Rodano [5]; la sezione subalvea sotto tale profondità fino alla roccia in posto è stata diaframmata con iniezioni di cemento, d'argilla e di sostanze chimiche. Le condizioni geologiche favorevoli: terreni di facile attraversamento, incastro facile e sicuro nel pliocene impermeabile, disponibilità di palancole di peso e momento resistente elevati e dell'attrezzatura necessaria per l'infissione hanno permesso di costituire alla diga di Malapane (Turawa) nella Prussia orientale un diaframma di 5 km di sviluppo e di 24 m di profondità massima [6].

In una zona dove i sondaggi eseguiti in modo sistematico su tutto lo sviluppo del diaframma, allo scopo di stabilire la lunghezza strettamente indispensabile delle palancole, sono state individuate delle lenti sabbiose permeabili a profondità ancora maggiore, queste sono state impermeabilizzate con il metodo Joosten di pietrificazione consistente nella reazione di due liquidi iniettati uno dopo l'altro attraverso tubi da 1" a distanza reciproca di circa 0,50 — 0,80 m. Procedimento costoso e che trova giustificato impiego solo per zone di limitata estensione.

Nelle alluvioni con trovanti i diaframmi metallici sono da escludersi per le difficoltà d'infissione e il pericolo di rottura e di deviazione che renderebbero illusoria la tenuta mai assoluta delle palancole metalliche perchè ogni chiodo (agrafe) costituisce una linea sia pure ridotta di filtrazione.

Anche le sabbie fini e finissime oppongono all'infissione delle palancole delle notevoli difficoltà che si cerca di superare o attenuare con la lubrificazione mediante acqua in pressione: procedimento ausiliare applicato in modo sistematico per il diaframma metallico della diga in terra di Fort Peck.

Con le paratie di pali trivellati tangenti si sono raggiunte delle profondità di 30 m come al taglione della diga di Persano sul Sele. La presenza di qualche trovante non costituisce un ostacolo insormontabile alla costruzione del diaframma, sulla cui tenuta valgono le stesse riserve fatte a proposito delle palancole metalliche, per la presenza del giunto fra palo e palo, che gli accorgimenti e interventi supplementari adottati non sempre riescono a saldare.

Le realizzazioni descritte nella rassegna che segue danno un ulteriore orientamento sugli altri sistemi di fondazione o di diaframmazione, sui limiti di profondità, caratteristiche, ecc.

#### DIGA PARKER [7].

Gli scavi aperti di questa diga sul Colorado, a valle della più nota diga Boulder, si distinguono per la loro notevole profondità di 75 m, tale che la diga ad arco, di 113 m di altezza sul fondo roccioso, sopravanza di soli 38 metri il letto del fiume (fig. 2). Si è cercato di ridurre il più possibile lo sviluppo dell'area di scavo, sia in rela-

zione alle condizioni locali, sia per ragioni economiche, in quanto ogni riduzione incideva non solo sul volume di scavo ma anche sullo sviluppo delle gallerie di deviazione provvisoria. Lo scopo venne indirettamente raggiunto con il metodo dei pozzi filtranti per abbassamento della falda. Eliminando infatti le infiltrazioni dirette sulle due pareti

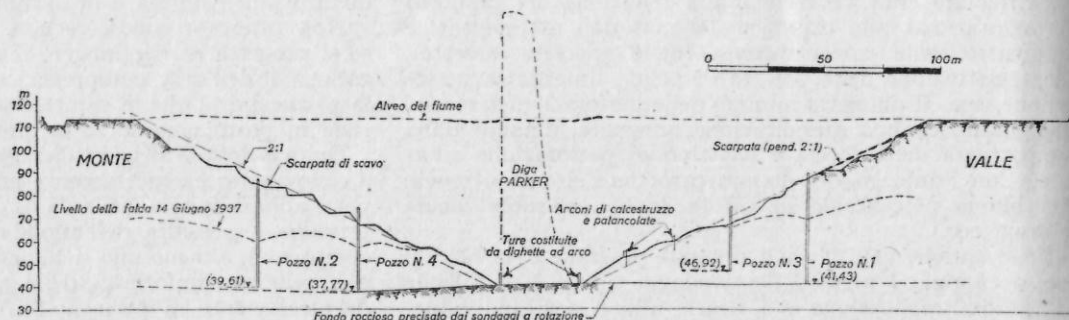


Fig. 2. - Diga Parker sul Colorado. Sezione sull'asse del fiume.

di scavo, a monte e a valle, si consegue una maggiore stabilità delle scarpate e quindi una minore ampiezza di scavo. Sono state inoltre infisse in senso trasversale all'asse della vallata delle palancole metalliche rinforzate alla sommità mediante arconi in c. a. incastrati sui fianchi rocciosi; e infine la ristretta zona d'impostazione della diga sul fondo roccioso è stata presidiata da due dighette ad arco, analogamente a quanto è stato fatto anche alle dighe di Marèges, Osiglia e Génissiat.

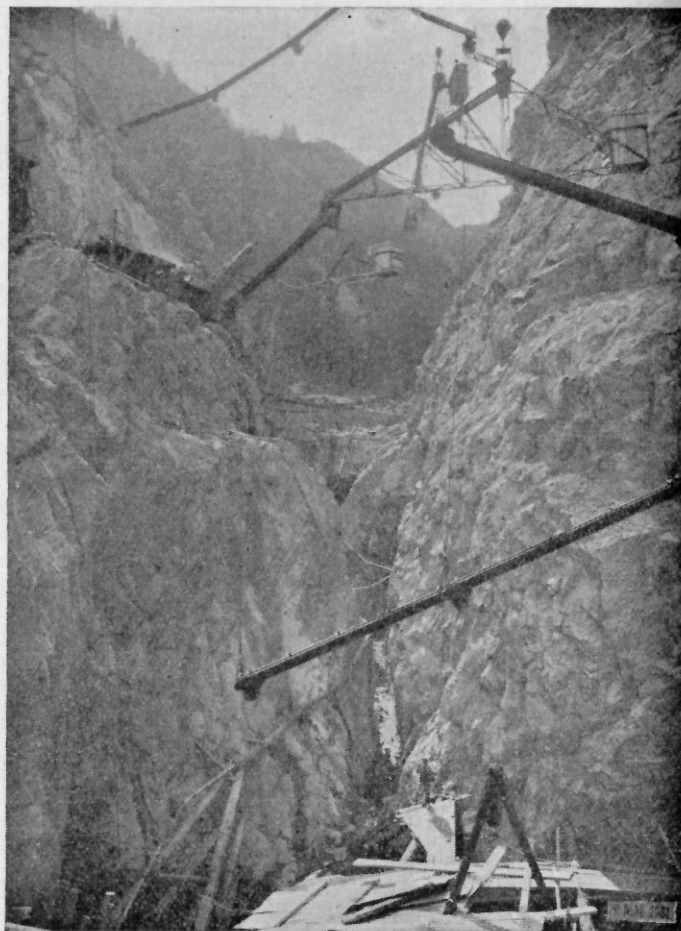


Fig. 3. - Diga Chambon. Corridoio roccioso, la cui ristrettezza spiega come i quattro sondaggi su un asse longitudinale non siano andati a finire nel punto più profondo, e dimostra la necessità in simili casi di rilievi supplementari per sezioni trasversali.

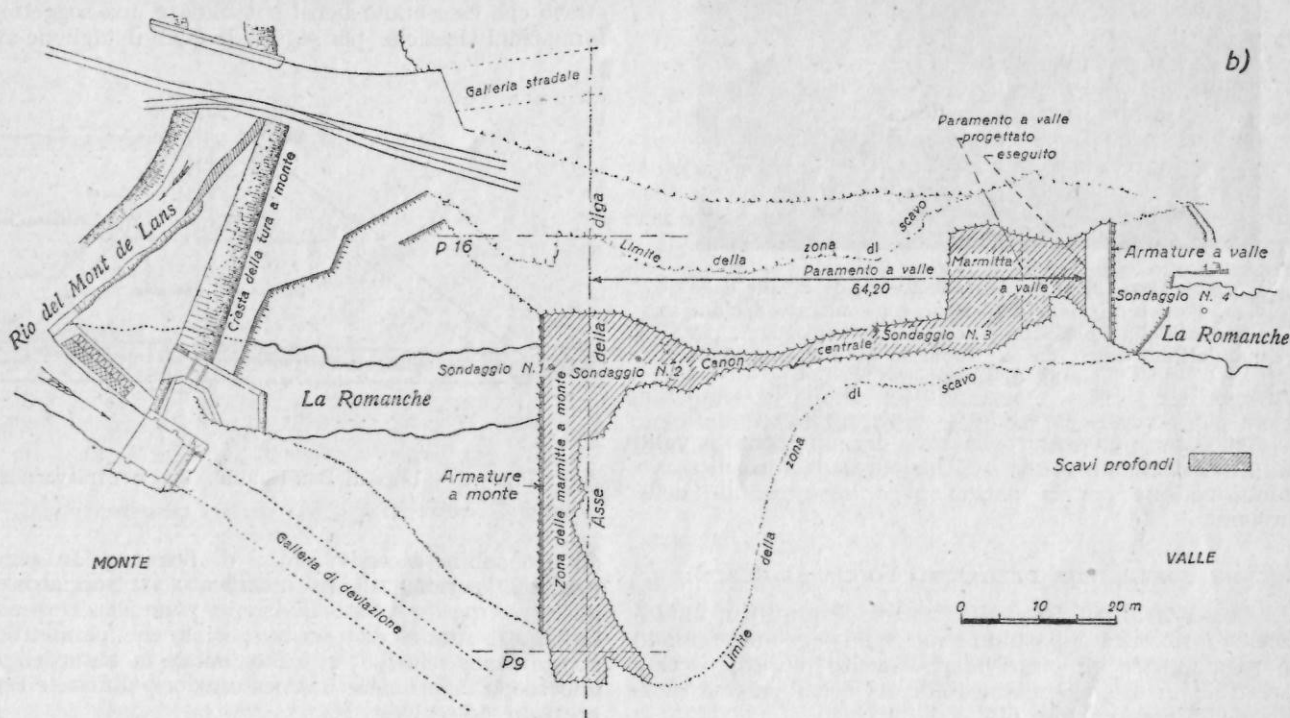
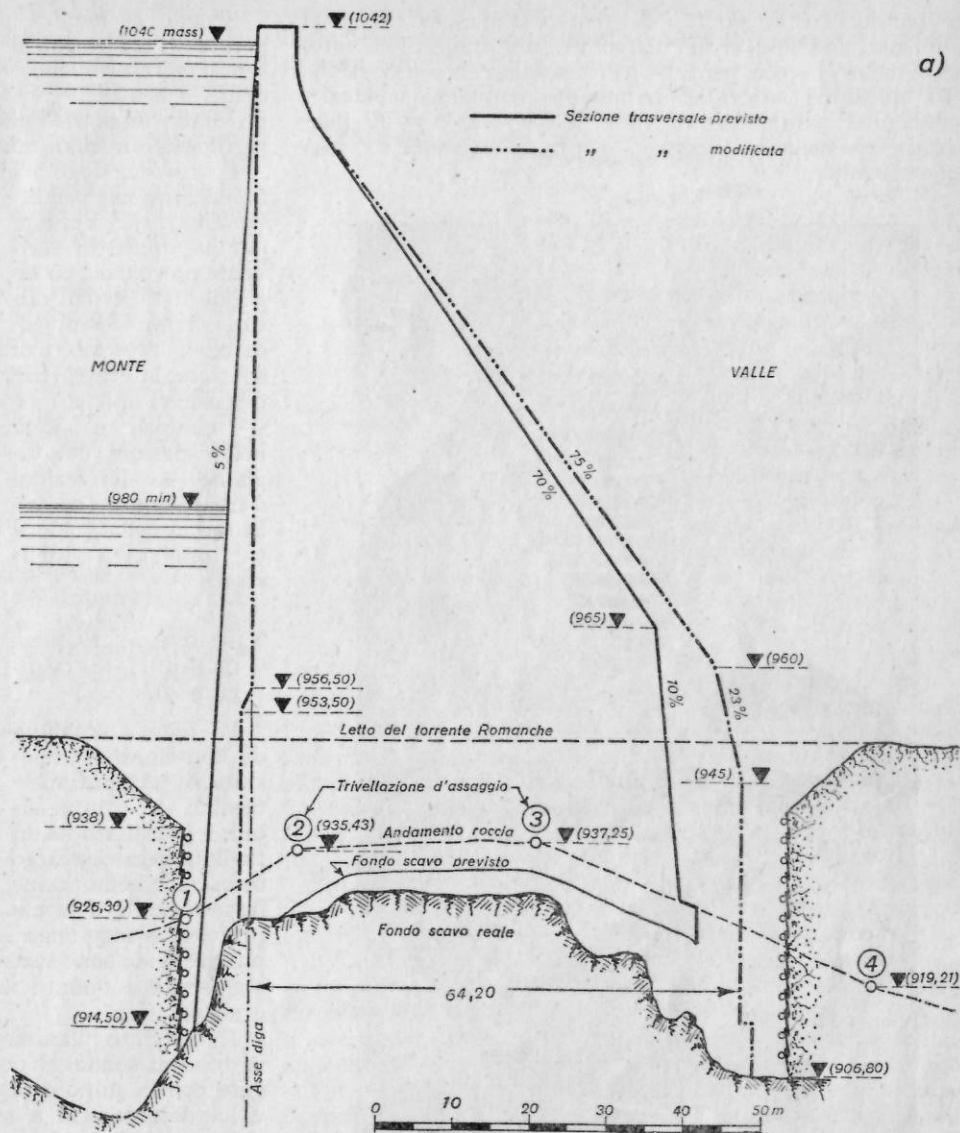
## DIGA DELLO CHAMBON [8].

Le vicende della fondazione di questa diga dimostrano la necessità di una accurata investigazione e determinazione del fondo roccioso. Infatti, la serie di quattro sondaggi disposti lungo l'asse presunto del fondovalle roccioso incontrava lo stesso in fianco, cosicchè la profondità risultò effettivamente maggiore del previsto (fig. 3). La deficienza maggiore si manifestò nelle zone a monte e a valle, dove, per azione del ghiacciaio principale e di uno confluyente in sinistra potevasi legittimamente supporre una sovraescavazione, come infatti gli scavi dimostrarono. Il profilo longitudinale e la planimetria (fig. 4) danno una chiara idea dell'azione glaciale, della profondità degli scavi e delle armature di sostegno necessarie.

Quando gli scavi, prima, e i sondaggi supplementari, poi, permisero di rilevare l'andamento pressochè verticale della parete della grande marmitta a destra del corridoio roccioso, era già stata gettata, anche per provare l'installazione del calcestruzzo, una porzione della spalla destra della diga, per cui non era più possibile apportare una modifica planimetrica che avrebbe permesso di conservare la pendenza

Fig. 4. - Diga Chambon.

a) Profilo trasversale di massima profondità della diga, con le modifiche apportate ai paramenti per la presenza della marmitta glaciale a destra del corridoio roccioso (gneiss); b) Planimetria generale degli scavi.



del paramento a monte, di risparmiare scavi e getti in misura notevole e di recuperare un anno di lavoro, che è andato invece perduto nello studio e nell'esecuzione della soluzione adottata: paramento a monte verticale, rinfilanco al paramento di valle (da 0,70 a 0,75 di pendenza), mensola e ancoraggi sopra il ripiano roccioso della marmitta.

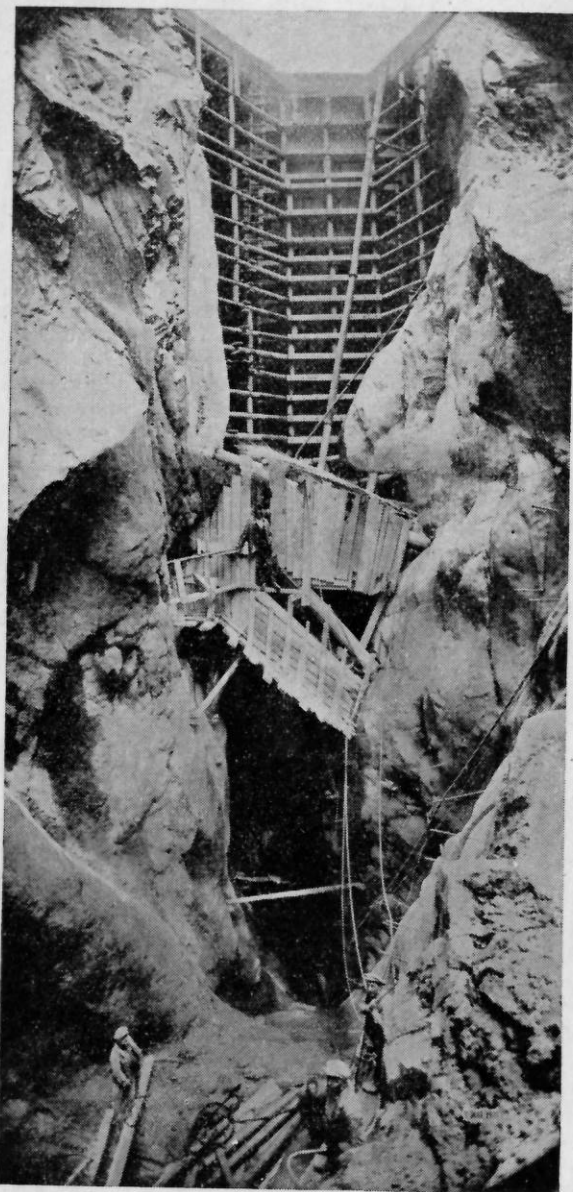


Fig. 5. - Diga Chambon. Marmitta al piede a valle della diga. Essa è originata dall'azione concomitante dei due ghiacciai della Romanche e di Lans, accompagnata, per quest'ultimo tratto, da un fenomeno di difluente dalla sella di sfioramento.

Notevoli pure gli scavi nella zona del paramento a valle (fig. 5). Fortunatamente le infiltrazioni nella zona di scavo furono modeste per la natura poco impermeabile delle alluvioni.

#### TAGLIONE DELLA DIGA DELL'OUED FODDA (ALGERIA).

In presenza di calcare estremamente fessurato in fondazione, si è ritenuto opportuno scavare un taglione profondo che raggiungesse gli strati relativamente più compatti e suscettibili di essere impermeabilizzati con il metodo normale delle iniezioni (fig. 6).

Benchè la tecnica delle iniezioni abbia fatto notevoli progressi, anche per la disponibilità e l'applicazione di materiali d'intasamento dotati di caratteristiche preziose, quale la bentonite, vi sono però dei casi in cui si preferisce un diaframma sostanziale, di cui si perfeziona la tenuta perimetrale mediante iniezioni.

Un caso analogo a quello di Oued Fodda, non già per la fondazione ma per la spalla destra, è offerto dalla diga di Castillon sul Verdon, per la quale lo scrivente preconizza un taglione attraverso il calcare molto fessurato, di circa 100 metri di spessore laterale, con dispositivi di ispezione — cunicoli e pozzi nello spessore del taglione — e di iniezioni d'intasamento contro la roccia nella quale il taglione sarà incastrato.

#### TAGLIONE DELLA DIGA DI BOU-HANIFIA (figura 7).

La diga a scogliera di Bou-Hanifia, impostata su terreni impermeabili e compressibili, è presidiata da un taglione in calcestruzzo incastrato nelle marne impermeabili e la cui profondità raggiunge i 70 m. Le zone permeabili ancora più profonde sono state chiuse con schermi d'iniezione, analogamente a quanto fatto sui fianchi in maniera generale e sistematica.

Il tracciato planimetrico del taglione è stato stabilito, in base ai sondaggi preliminari, con il criterio di raggiungere con la minore profondità possibile gli strati marnosi, e ha determinato a sua volta l'impostazione e la forma della diga. Le prove eseguite sulle marne avevano dimostrato che esse erano bensì consolidate, ma soggette a deformazioni elastiche, per seguire le quali il taglione avrebbe

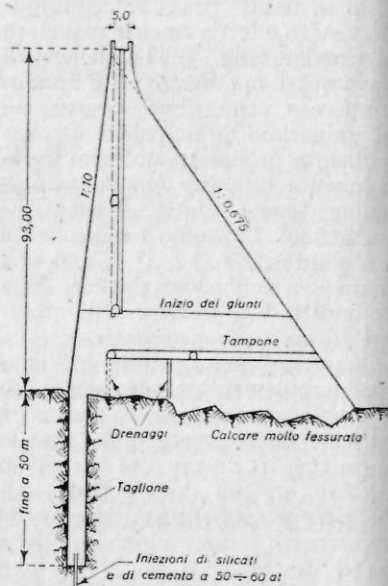


Fig. 6. - Diga dell'Oued Fodda (Algeria).

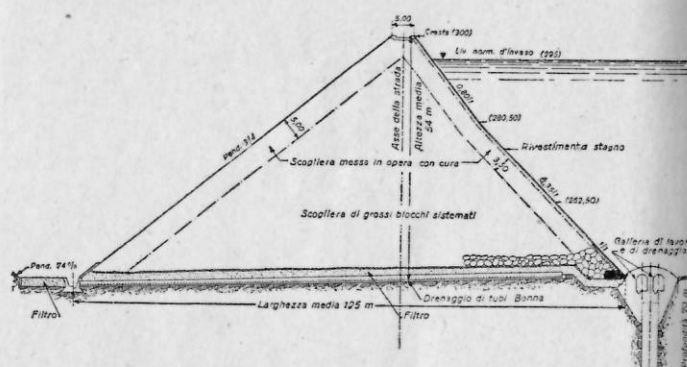


Fig. 7. - Diga di Bou-Hanifia. Sezione trasversale.

dovuto subire eccessivi sforzi di flessione. In seguito ai risultati sperimentali fu modificato il tracciato del taglione, e questo venne diviso in pannelli di 15-20 m di larghezza, riuniti da giunti speciali che permettono uno spostamento relativo; si armò inoltre la base dei pannelli allo scopo di ottenere una fessurazione diffusa e non concentrata del calcestruzzo.

Il taglione ha 4 m di spessore (fig. 7) ed è sormontato da due gallerie, una di lavoro e d'ispezione, l'altra di drenaggio: a questa espansione in sommità del diaframma si raccorda immediatamente il manto di tenuta della diga in scogliera, il peso della quale ha determinato, per la compressibilità del terreno, delle spinte sulla parte superiore del diaframma a contatto. Esse hanno provocato, alla messa in carico parziale, delle lesioni nel manufatto, che sono state riparate con l'applicazione di tiranti « Coyne » nella zona interessata e con iniezioni di saldatura e d'intasamento.

Questo inconveniente avrebbe potuto essere evitato portando più a monte il taglione e raccordando con un tappeto flessibile la testa del diaframma con il manto di tenuta della diga in scogliera.

Le venute d'acqua durante lo scavo e la costruzione del taglione vennero captate con un sistema di pozzi filtranti al di fuori della zona di scavo. I pozzi erano equipaggiati con pompe a pistone.

#### DIGA DELLA BANNALP.

Abbiamo qui un caso tipico di diaframma o nocciolo argilloso costituito nei detriti di falda che formano le sponde del futuro serbatoio della Bannalp in Svizzera (fig. 8). Questo diaframma fa parte del sistema di tenuta della diga in terra e del bacino, ed è stato costruito all'asciutto.

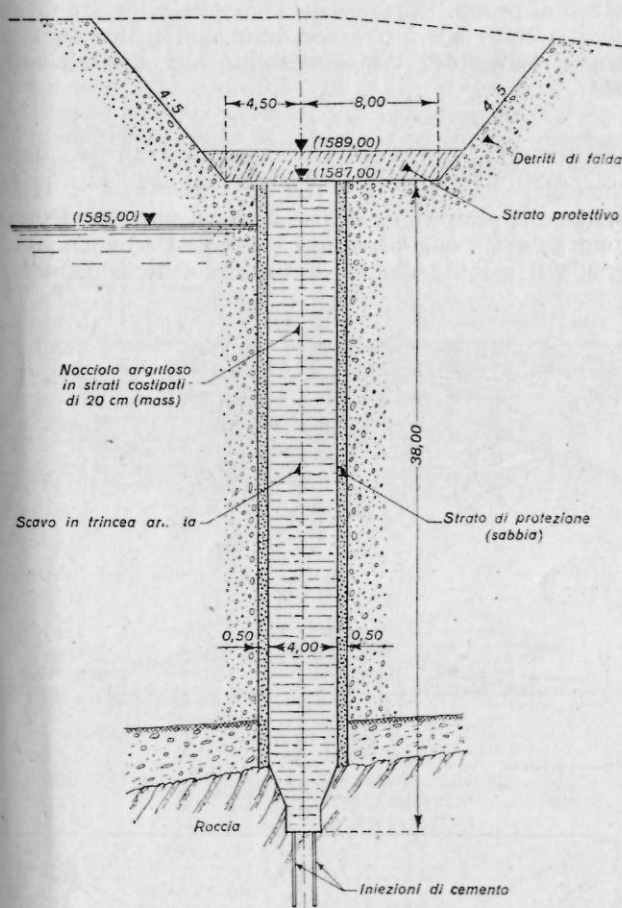


Fig. 8. - Diaframma nella morena alla diga Bannalp (Svizzera).

In sede di progetto si riteneva che il materiale detritico avrebbe esercitato una spinta non indifferente sulle armature durante lo scavo e sul nocciolo d'argilla poi, per cui si era pensato di proteggere quest'ultimo con dei materassi sabbiosi verso monte e verso valle. In realtà, il materiale era talmente coerente che le armature poterono

essere ridotte al minimo e recuperate completamente man mano che montava il nocciolo argilloso, senza soluzione di continuità.

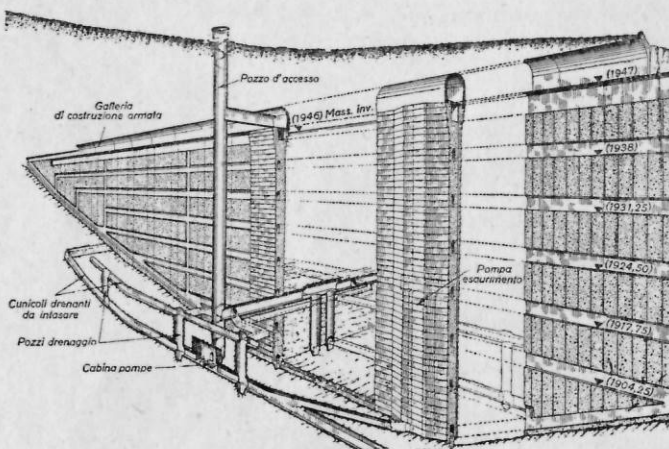


Fig. 9. - Diaframma di S. Giacomo di Fraele.

#### DIAFRAMMA DI S. GIACOMO DI FRAELE.

Impostato all'altezza del passo omonimo per intercettare le filtrazioni del futuro lago creato con la diga a vani interni del Passo del Forno attraverso la potente massa alluvionale detritica, che sbarra il bacino, verso il versante danubiano, esso ha uno sviluppo longitudinale di 500 m e una profondità massima sotto il livello di invaso di 50 m (fig. 9).

Pozzi e sondaggi preliminari servirono per la determinazione del profilo roccioso; un rilievo geofisico ne ha controllato e integrato i dati geognostici.

La topografia del terreno impose la costruzione di una galleria di lavoro di adeguata sezione, a partire dalla quale fu eseguito lo scavo armato, per pannelli verticali di 5 m a sostegno dei singoli tronchi di 18 m della galleria, alternati con pannelli di 13 m, scavati in un secondo tempo.

Per un'altezza di 15 m sopra la roccia la sezione da diaframmare è immersa nella falda che è stata pompata con pozzi ed evacuata al letto dell'Adda con un cunicolo di 900 m di lunghezza sopra il livello massimo della falda.

Il diaframma in calcestruzzo armato ha uno spessore minimo di 2,50 m; nel suo corpo si sviluppano ben 7 ordini di gallerie d'ispezione collegati con pozzi verticali.

Vennero eseguite numerose prove di compressione sul materiale in posto per determinarne le caratteristiche meccaniche. Come aveva già rilevato il Terzaghi nelle sue classiche esperienze, è risultato che dopo un certo cedimento necessario per mobilitare la resistenza passiva del terreno, si ha un comportamento elastico del materiale. Allo scopo di permettere questo relativo cedimento nel giunto con la roccia rispettivamente con il taglione, si è disposto uno strato di bitume di tenuta fra il tamponamento di riempimento del taglione e il diaframma che vi s'incapsula.

Iniezioni d'argilla sul paramento acqueo servono per aumentare la tenuta del diaframma, iniezioni di cemento verso monte per ridurre il cedimento necessario alla mobilitazione della spinta passiva del terreno che deve contrastare la spinta idrostatica opposta.

#### DIGA DELLA VAL DI FIER [10].

Le ture per lo scavo della diga di Val di Fier in Savoia furono eseguite con cassoni ad aria compressa. Quello a monte raggiunse il fondo roccioso a più di 7 m di maggiore profondità di quello a valle, come si può rilevare tanto nel disegno (fig. 10) che nella fotografia (fig. 11). Ci troviamo in presenza di un « ombilico fluviale ». Questa sovraesca-

vazione, rispetto al fondo normale roccioso, fu per compromettere l'esecuzione della diga, avendo costretto a spingere gli scavi e la sottomurazione della tura a più di 30 m di profondità. Essa è dovuta, secondo il Lugeon [2], all'

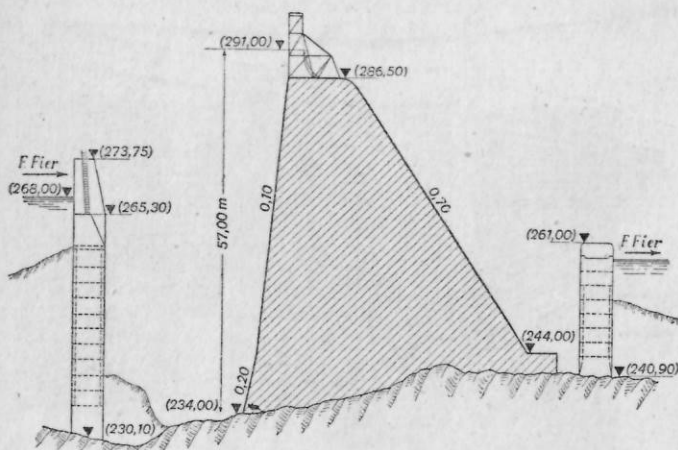


Fig. 10. - Sezione trasversale della diga di Val di Fier con i cassoni-ture.

l'aumento dell'erosione in profondità nei punti di restringimento della valle, in modo da ristabilire un'eguale sezione di deflusso. Si consiglia in simili casi di estendere l'indagine del profilo longitudinale tanto verso monte che verso valle, alla ricerca delle sezioni più favorevoli per le opere subalvee sia provvisoriale che definitive.

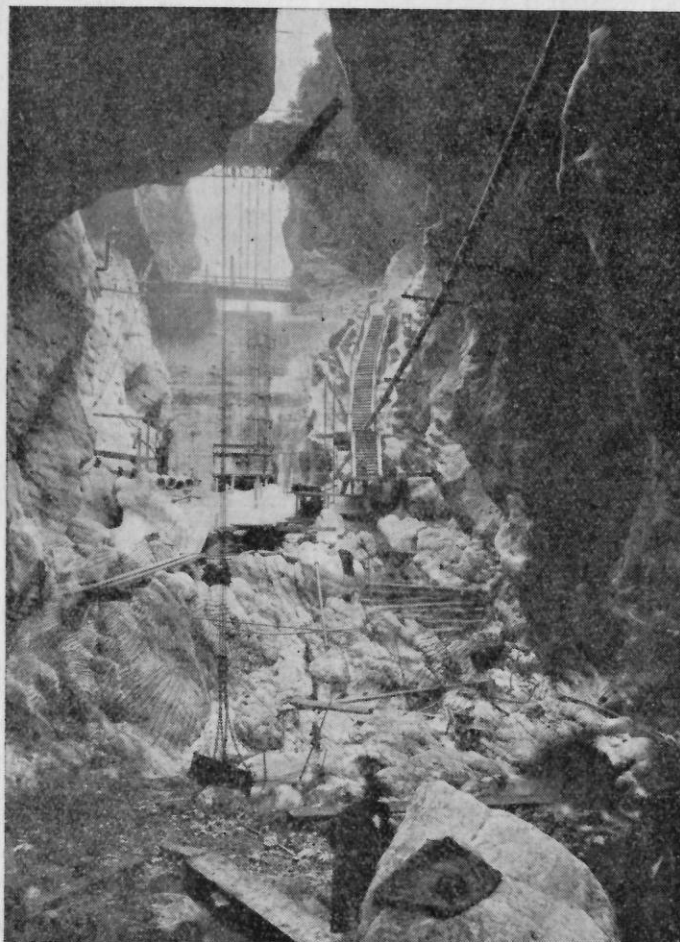


Fig. 11. - Il fondovalle roccioso per l'importazione della diga di Val di Fier in Savoia. Vista dalla tura a monte verso quella a valle.

Vedremo più innanzi, a proposito della tura sul Corinza, che anche questa regola di compenso ha le sue eccezioni, perchè può intervenire un altro fattore e cioè la varia durezza della stessa roccia da un punto all'altro del fondovalle.

Nella fotografia va rilevata l'accurata preparazione della roccia di fondazione per il getto del calcestruzzo.

#### DIAPRAMMA DELLA DIGA IN TERRA DI WYMAN [11].

Rappresenta la prima realizzazione di un diaframma a mezzo di cassoni affiancati e affondati con l'aria compressa fino alla roccia in posto, e il prototipo di quasi tutti i diaframmi delle dighe in terra degli Stati Uniti impostate su un materasso alluvionale di spessore notevole.

I cassoni del diaframma avevano le dimensioni in pianta di  $2,40 \times 12,20$  m. La pressione massima raggiunta è stata di 3,75 atm, alla quale gli operai lavoravano solo 45 minuti, per cui lo scavo è venuto a costare circa 80 dollari al metro cubo. L'attrito fra le pareti e l'alluvione ricca di trovanti era così forte che l'affondamento si arrestava sovente parecchi metri sopra il fondo roccioso che veniva raggiunto con sottomurazione progressiva a strati di 50 cm di spessore. Fra un cassone e l'altro rimanevano dei giunti di 0,45 a 1,40 m di larghezza che venivano tamponati con calcestruzzo per mezzo di una caminata di 76 cm di diametro. In corrispondenza dell'alveo antico è stato creato un secondo diaframma di cassoni più a monte e parallelo al primo. Il materiale alluvionale fra i due diaframmi è stato scavato e sostituito con materiale argilloso per aumentare l'impermeabilità del dispositivo di tenuta.

#### DIAPRAMMI DELLE DIGHE DELL'ACQUEDOTTO DI QUABBIN E DELL'ACQUEDOTTO DEL DELAWARE [13] (figg. 12, 13 e 14).

Seguono il prototipo del diaframma della diga Wyman, con un notevole miglioramento tecnico ed economico, impiegando il metodo dell'abbassamento della falda per ri-

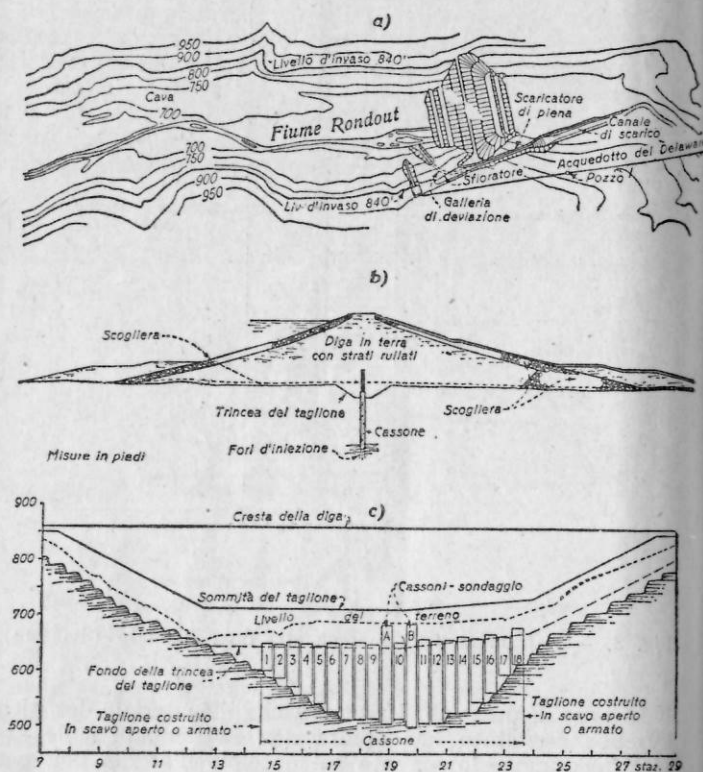


Fig. 12. - Diga Merriman.

a) Pianta; b) Sezione trasversale; c) Sezione longitudinale.

durre la pressione nella camera di lavoro. Un primo cassone affondato con l'aria compressa fino a raggiungere la roccia in posto viene sistemato come pozzo filtrante sotto il suo coltello. Si ottiene attraverso il pompaggio un primo abbassamento della falda che permette l'affondamento a cielo libero del cassone adiacente fino al livello nuovo della falda, e ad aria compressa, a pressione ridotta, per la tratta residua sino alla roccia.

La sezione longitudinale del diaframma della diga Merriman (fig. 12) nel Delaware indica la disposizione dei cassoni: sono stati affondati anzitutto due cassoni d'esplorazione, sistemati poi come pozzi filtranti, poi gli altri, con una profondità massima di 50 m sotto il livello della falda. Analogamente si è proceduto sia alla diga di Quabbin [2] che alle altre due del Delaware.

La costituzione geologica della copertura del fondo valle roccioso è pressochè identica in tutte queste dighe e quindi anche la loro permeabilità media o di massa (i francesi dicono: perméabilité en grand); il coefficiente di permeabilità medio risulta in base ai dati grafici dei « Proceedings » pari a  $k = 0,0015$  m/s. Le figure 12 e 13 servono a meglio illustrare la soluzione tecnica nei suoi dettagli [12].

Notevole nella diga Merriman la profonda alterazione corticale della roccia in posto sotto la potente copertura diluviale, alterazione che verrà sanata con le iniezioni di cemento fino alla zona compatta.

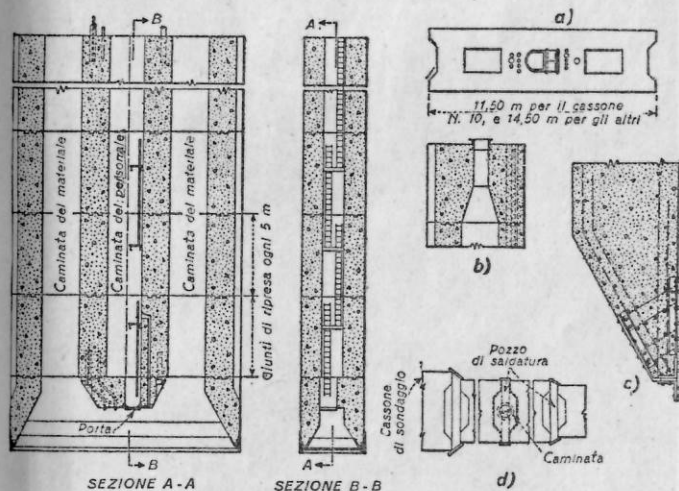


Fig. 13. - Cassoni del taglione della diga Merriman.  
a) b) c) d) Dettagli.

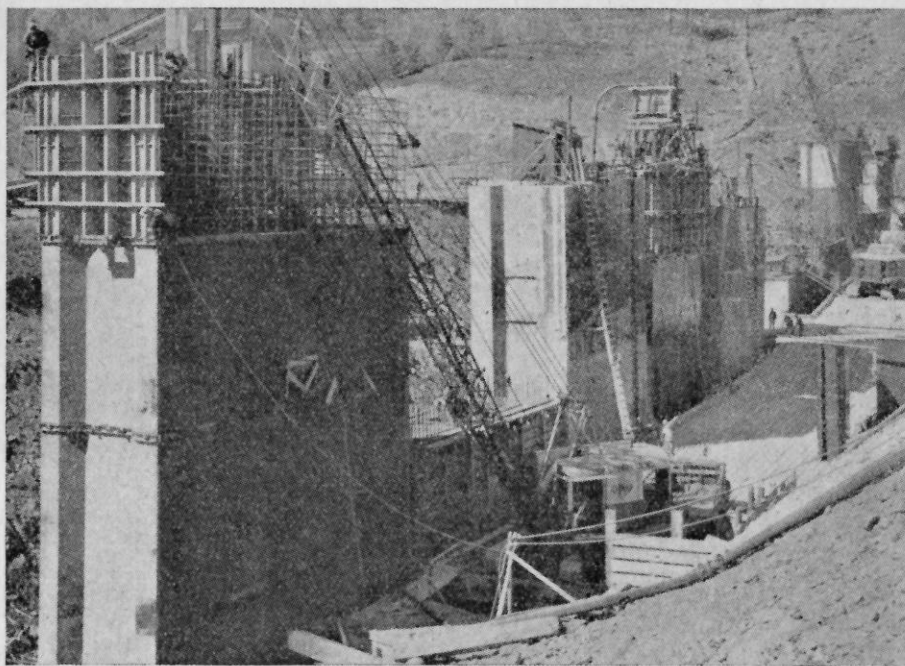


Fig. 14. - Cassoni affondati fino a 54 m di profondità per costruire il taglione della diga Merriman nel Delaware.

di un diaframma in calcestruzzo nelle alluvioni fluvio-glaciali composte di sabbia fine con lenti limose e trovanti di dimensioni non comuni. Si tentò dapprima di affondare un cassone con sottoescavazione, ma l'afflusso della sabbia rese vano il tentativo. Per la presenza dei blocchi, non si poteva pensare a una palancolata.

Si decise l'affondamento ad aria compressa fino alla pressione di 2,5 atm. Poichè non si voleva superare questa pressione nella camera di lavoro, si costruì un filtro al fondo del cassone e si praticò a mezzo pompaggio l'abbassamento della falda. Accanto fu affondato un secondo cassone a profondità maggiore del precedente, grazie all'abbassamento della falda, utilizzandolo poi a sua volta per un ulteriore abbassamento dell'acqua. Così si raggiunse con un primo gruppo di 4 pozzi, e poi con altri 6, il fondo

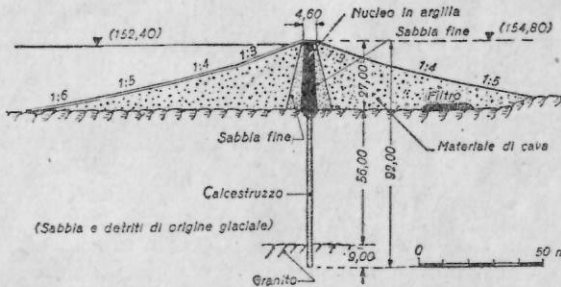


Fig. 15. - Diga della Silent Valley.

DIAFRAMMA DELLA DIGA DELLA SILENT VALLEY (fig 15).

Anche nella costruzione di questo diaframma è stato applicato il metodo dell'abbassamento della falda con pozzi successivamente affondati mediante l'aria compressa. L'abbassamento ottenuto con il primo pozzo permetteva al prossimo di raggiungere una maggiore profondità, e così via.

Mentre i sondaggi avevano segnalato la roccia a 15 m sotto il livello del suolo, si doveva constatare nel corso del lavoro, cioè dopo che erano stati già spesi 40 milioni, che il fondo roccioso (granito, in parte decomposto) si trovava a profondità ben maggiore, per cui si decise la costruzione

roccioso. Questi ultimi si trovavano sull'asse della diga, spaziati di 17 m, con diametri di  $3,30 \div 3,70$  metri. Il pozzo più profondo raggiungeva la roccia a 64 m di profondità e penetrava per ben 7 m nel granito decomposto e fessurato. La portata di esaurimento totale era di 52 l/s. Per il rivestimento dei pozzi si impiegarono al fondo delle forme in ghisa. Eseguiti i 10 pozzi su tutta la lunghezza della diga, si procedé allo scavo della trincea per il diaframma. A partire da 30 m di profondità, si impiegarono anche qui le forme di ghisa, che diedero ottimi risultati, perchè sopportavano la spinta del terreno e impedivano la

irruzione di sabbia fine; i giunti fra le piastre, essendo bloccati, venivano chiusi con iniezioni.

Le piastre rimanevano immerse nel getto, solo gli sbadacchi venivano recuperati.

La diga in terra ha 24 m di altezza massima ed uno sviluppo di 480 m.

**TAGLIONE DELLA DIGA AD ARCO DI S. DOMENICO SUL FIUME SAGITTARIO [14].**

Rappresenta un notevole esempio dell'impiego delle iniezioni di cemento puro — boiaccia — nelle alluvioni in posto, per la creazione di diaframmi: nel caso specifico, per la realizzazione di due ture stagne, fra le quali poter eseguire lo scavo senza soverchie infiltrazioni e gettare un taglione in calcestruzzo incastrato nella roccia.

Mentre per i dettagli esecutivi si rimanda il lettore all'articolo pubblicato dall'ing. Franzi nella Rivista Tecnica delle Ferrovie Italiane del 15 luglio 1927, si riportano qui le possibili varianti ed altri rilievi di notevole interesse, nonchè fotografie inedite (figg. 16, 17).

Diremo anzitutto che, in assenza di indagini geognostiche preliminari, si erano iniziati gli scavi per la diga progettata a gravità. I sondaggi, eseguiti in un secondo tempo, rivelarono la presenza di una gola di origine fluviale profonda oltre 50 m sotto l'alveo attuale del fiume.

Esclusa la possibilità di raggiungere tale profondità con il sistema dell'aria compressa, si pensò di cementare le alluvioni in posto a mezzo di più ordini di trivellazioni spinte fino alla roccia in posto.

Il risultato superò le più ottimistiche previsioni perchè la cementazione riuscì non solo a rendere stagne, ma anche resistenti alla notevole spinta esterna le due ture, entro le quali fu poi eseguito lo scavo. Le infiltrazioni di acqua che al fondo non superarono i 16 l/s, erano dovute esclusivamente alla fessurazione della roccia calcarea della gola.

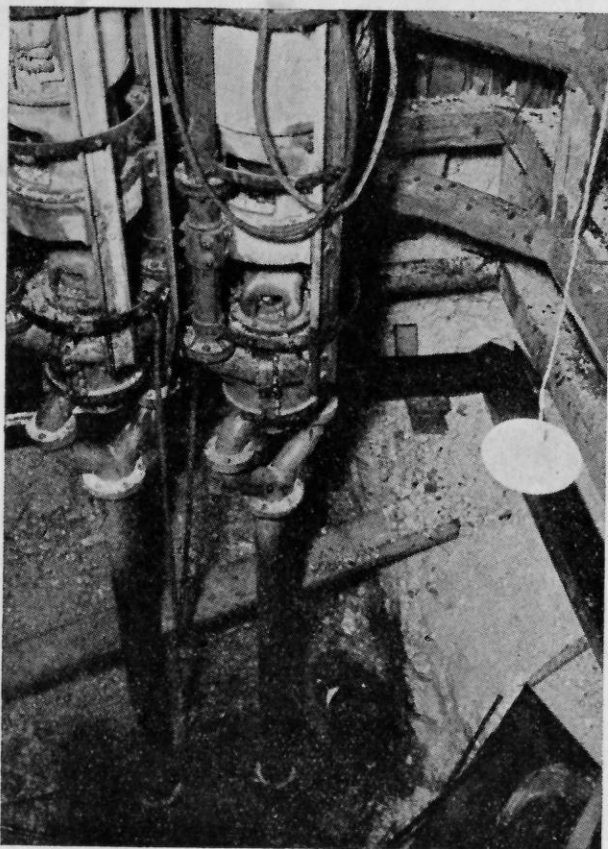


Fig. 16. - Gola del Sagittario. Scavo nell'alluvione cementata della tura a monte e incasso nella roccia.

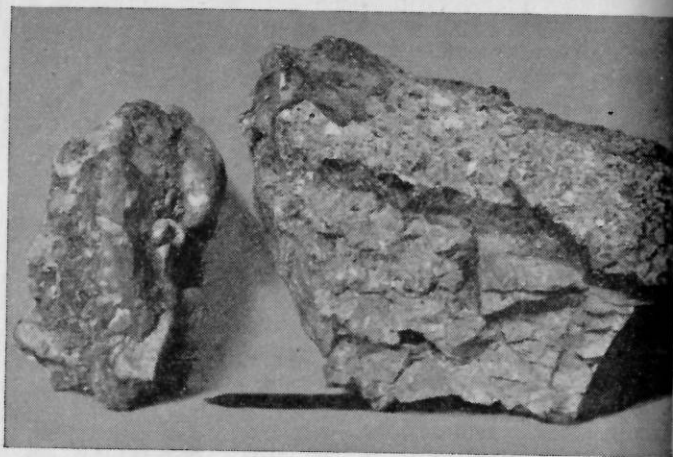


Fig. 17. - Campioni di alluvioni cementate; in destra crostone cementato aderente alla roccia scavata per l'incasso del taglione.

Armature di legname vennero adottate solo per misura precauzionale.

Avendo diretto l'esecuzione degli scavi fra le ture di alluvione cementate (figg. 16 e 17) e il getto del taglione fino all'imposta della diga ad arco, ritengo che in caso analogo converrebbe insistere nel principio delle cementazioni, procedendo cioè con sondaggi ed eventuali iniezioni supplementari, controllando l'efficacia di queste e perfezionandole via via, in modo da costituire un taglione unico,

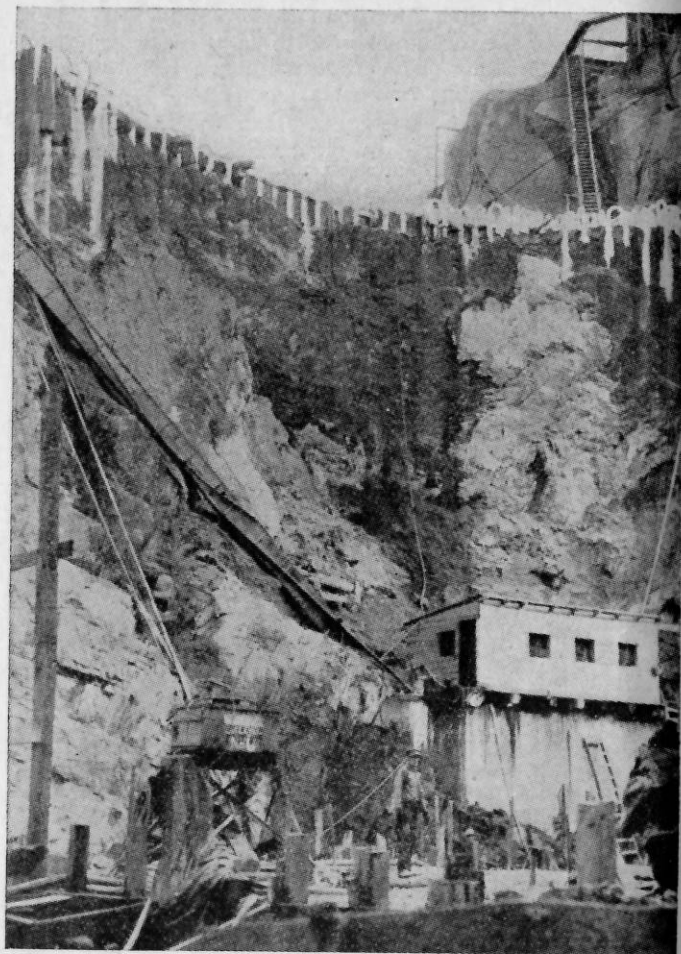


Fig. 18. - Frana bloccata col congelamento negli scavi della diga Grand Coulée sul Columbia (S. U.).

sul quale potrebbe essere fondata senz'altro la diga, evitando lo scavo e il getto di un taglione di calcestruzzo.

Qualora le sole iniezioni di cemento si dimostrassero insufficienti, per la presenza di sacche o lenti o strati sabbiosi che filtrano il cemento invece di lasciarlo diffondere, bisognerebbe prevedere le iniezioni chimiche e precisamente il metodo della pietrificazione per reazione di due soluzioni: silicato di sodio e cloruro di calcio.

In caso di dubbio sulla riuscita delle iniezioni di cemento, sole o abbinate a quelle chimiche, può convenire di ricorrere ad un sistema di temporanea diaframmazione, realizzabile col congelamento del materiale sciolto acquifero, di temporaneo aggotamento con pozzi filtranti sistemati al di fuori della zona di scavo, come si pratica comunemente nell'abbassamento di falda per scavi di fondazione in terreni sciolti.

Con il sistema del congelamento si raggiunge in qualunque caso, ossia con qualunque materiale sciolto, dall'alluvione grossolana al limo più fino, purché impregnato d'acqua, non solo la preclusione dell'acqua dalla zona di scavo, ma anche il consolidamento del materiale, per cui si rendono inutili le armature (fig. 18).

Nel caso del Sagittario bastava una serie unica di tubi congelatori (le colonne di sondaggio stesse) a monte e a valle della zona di scavo, tubi che avrebbero potuto essere poi recuperati a differenza dei tubi di iniezione. Siccome il metodo di congelamento esige una spesa d'impianto e di esercizio non indifferente, la sua applicazione va limitata alle notevoli profondità, ai casi più difficili.

Dell'abbassamento di falda è già stato fatto cenno a proposito dei diaframmi costituiti da cassoni in c. a. affondati con l'aria compressa. Per la sicurezza d'esercizio tale metodo richiede almeno una doppia alimentazione delle pompe, quindi o una riserva termica o due linee elettriche indipendenti anche come centrale di allacciamento.

#### DIAFRAMMA DELLA DIGA IN SCOGLIERA DEL MALPASO NEL PERÙ.

Con materiale d'intasamento diverso, e cioè con asfalto fluido, ma con una tecnica molto simile a quella del Sagittario, è stata realizzata una diaframmazione relativamente stagna della sezione subalvea di una tura che doveva presidiare gli scavi del taglione della diga in scogliera del Malpaso nel Perù.

Questa diga sbarra una stretta di roccia porfirica incastonata nella formazione sedimentaria che predomina nel bacino del Mantaro, a monte della città di Oroya. La stretta è di origine glaciale ed è riempita per una profondità di circa 45 m con blocchi e alluvioni.

Questa situazione geognostica ha portato alla soluzione della diga in scogliera con un taglione in calcestruzzo di 32 m di altezza, opportunamente raccordato al paramento a monte dello sbarramento. Per la sua costruzione si dovettero attraversare i 45 m di copertura con trincea aperta per i primi 20 m e fra due diaframmi di palancole metalliche per i rimanenti 25 m.

Allo scopo di ridurre le infiltrazioni attraverso il materiale molto permeabile, la sezione subalvea in corrispondenza della tura di deviazione (costituita da una intelaiatura di legname riempita di pietrame e da una palancole metallica di tenuta) venne diaframmata con iniezioni di asfalto praticate attraverso tubi da 1 1/2" (40-49 mm) muniti di fori  $\phi$  20 mm intervallati di 10 cm su 6 m di lunghezza a partire dal fondo del tubo. Questi tubi venivano collocati nei sondaggi da 3" spinti fino alla roccia del fondo, con interasse di 2,10 m. Dopo l'introduzione dei tubi di iniezione, le colonne da 3" venivano ritirate sino a scoprire la parte perforata dei tubi da 1 1/2" e, chiuso lo spazio anulare fra le due tubazioni con un premistoppa, si iniettava dell'asfalto fluido a pressioni variabili da 1 a 40 atm.

La fluidità dell'asfalto veniva mantenuta con il riscaldamento elettrico per mezzo di un resistore disposto al-



Fig. 19. — La forra del Sautet vista dall'alto; a monte il fiume Drac deviato; tura di presidio dello scavo di fondazione.

l'interno del tubo e collegato al suo fondo, ma per il resto isolato. Se un foro assorbiva una quantità troppo forte di asfalto a bassa pressione si riteneva che il suo raggio di azione andasse oltre quello utile e s'interrompeva la corrente onde permettere all'asfalto di raffreddarsi, per riprendere poi l'iniezione previo nuovo riscaldamento dell'asfalto. Le infiltrazioni nello scavo vennero così ridotte a circa 40 l/s.

Il lavoro fu eseguito da una ditta specializzata americana che aveva messo a punto l'attrezzatura e il procedimento nell'impermeabilizzazione, sotto carico, della roccia di fondazione, calcarea e molto fessurata, della diga Hales Bar sul Tennessee.

Una soluzione identica a quella del Sagittario è stata invece applicata in un caso del tutto simile al precedente per la tura di deviazione della diga Diablo sul fiume Skagit e, sia pure in proporzioni più modeste, per la sezione subalvea della tura che presidiava gli scavi della forra del Sautet (fig. 19). In quest'ultimo caso l'impresa generale si rivolse allo specialista sul cantiere solo quando si accorse che i propri tentativi non erano riusciti, per cui si dovette eseguire il lavoro d'impermeabilizzazione sotto battente

e con infiltrazioni che trascinavano nella zona di scavo la boiaccia iniettata.

Il brillante risultato ottenuto (dalle iniezioni di cemento) nelle alluvioni del Sagittario hanno creato l'illusione che ogni alluvione potesse essere trasformata con semplici iniezioni cementizie in un calcestruzzo praticamente impermeabile e senza soluzione di continuità permettendo così di creare con relativa facilità dei diaframmi stagni.

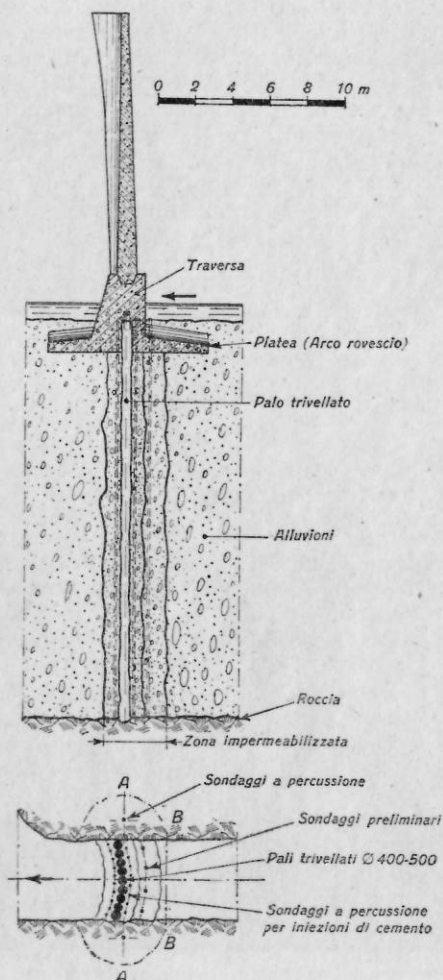


Fig. 20. - Diaframma subalveo per fondazione di ture.

La riuscita è principalmente dovuta alla favorevole composizione granulometrica delle alluvioni, prive o quasi di sabbia, e anche alla delimitazione laterale costituita dalle pareti rocciose. Prove eseguite in alluvioni comuni hanno dato per ben due volte risultati assolutamente negativi.

Le condizioni favorevoli esistenti allo stato naturale, al Sagittario, possono in particolari circostanze venire create artificialmente eliminando il contenuto sabbioso. Ciò è stato realizzato nella costruzione del diaframma subalveo della diga provvisoria di deviazione del torrente Coritena, affluente dell'Isonzo, a monte di Plezzo, sotto la direzione dello scrivente (figg. 20, 21, 22, 23).

Le trivellazioni per il getto dei pali accostati (fig. 20) hanno impoverito le alluvioni in posto del loro contenuto sabbioso e provocato nel tempo stesso una decompressione del terreno: circostanze concomitanti che hanno favorito la penetrazione diffusa ed uniforme della boiaccia di cemento puro, iniettata con procedimento analogo a quello adottato al Sagittario attraverso tubi affondati a monte e a valle dei giunti fra palo e palo. Allo scopo di impedire perdite di boiaccia alla superficie dell'alveo e di garantire una migliore saldatura del diaframma alla traversa d'imposta della so-

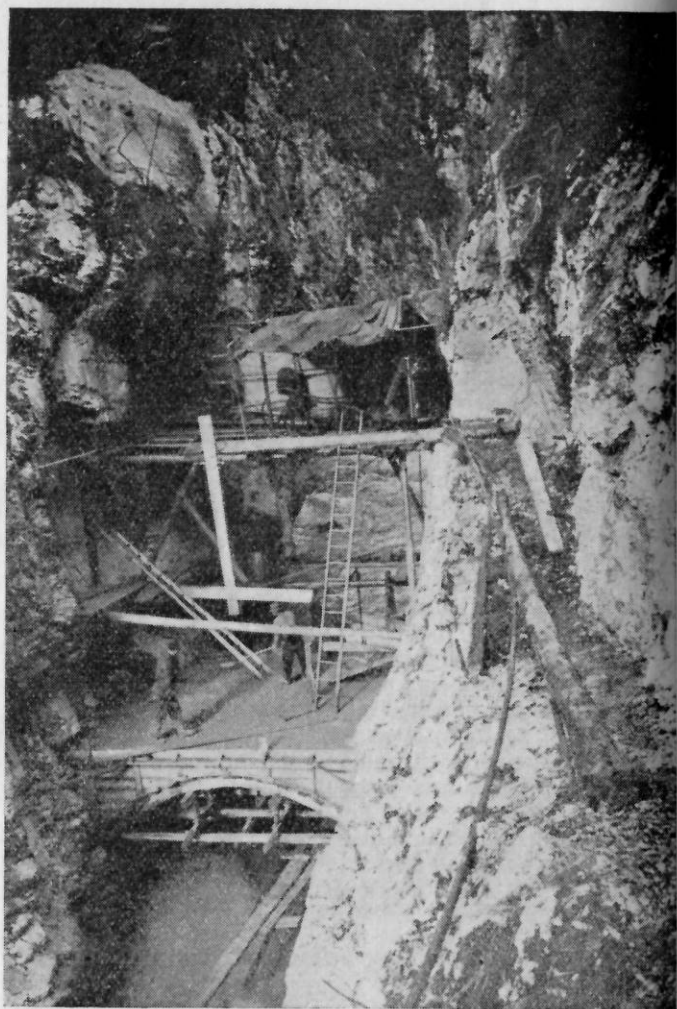


Fig. 21. - Diaframma subalveo nel Coritena. Vista del cantiere nella forra; a destra sull'impalcato sonda rotativa; sotto, il ponte di servizio in calcestruzzo.

vastante voltina di sbarramento, la traversa è stata ampliata verso monte e verso valle da due platee ad arco

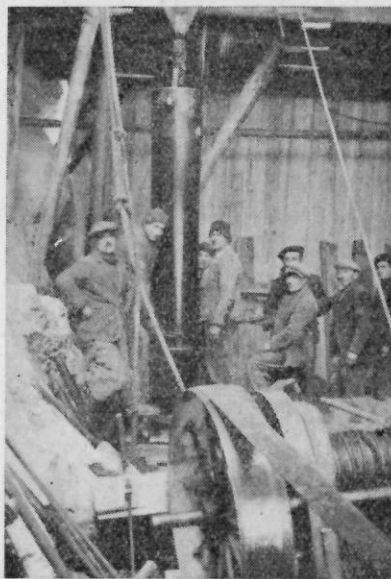


Fig. 22. Trivellazione per i pali del diaframma subalveo (Coritena).

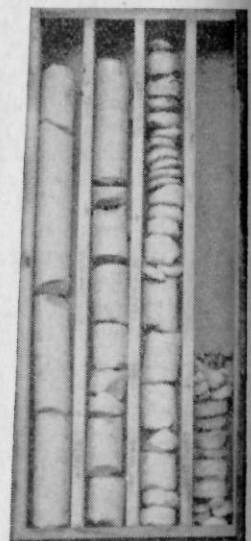


Fig. 23. - Campioni della roccia calcarea sottostante alle alluvioni (Coritena).

rovescio. L'assorbimento di cemento è stato, ciononostante, maggiore del preventivato, appunto per l'impoverimento della parte fina delle alluvioni.

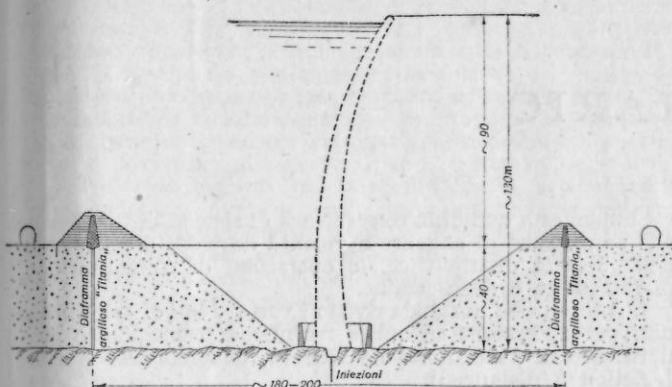


Fig. 24. - Scavi per una grande diga ad arco o a cupola con ture e diaframmi «Titania».

L'indagine geognostica, fatta precedentemente sulla spalla sinistra allo scopo di determinare lo spessore della coltre morenica, fu integrata con l'indagine del versante subalveo tanto per l'impostazione della progettata diga a gravità che per quella della tura a monte (fig. 23). Su proposta del relatore questa venne spostata più a monte nella forra,

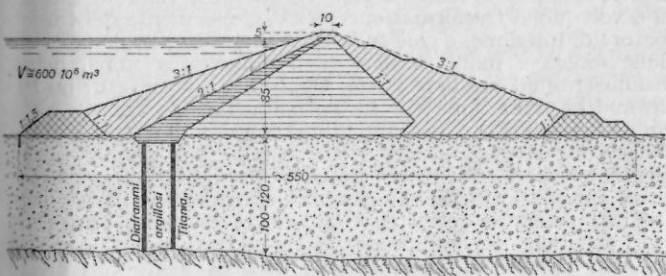


Fig. 25. - Diga di Serre-Ponçon sulla Durance.

con conseguente riduzione nello sviluppo trasversale sia del diaframma che dell'opera in elevazione (fig. 21). Era qui da attendersi, secondo la regola del Lugeon, una maggiore profondità del fondo roccioso, il quale, invece, è risultato dai sondaggi preliminari leggermente sopraelevato rispetto a quello delle zone a valle più svasate; (cioè a motivo, certamente, della maggiore durezza e compattezza della

roccia). Oltre ai vantaggi intrinseci, lo spostamento della tura permette anche l'impostazione di una diga ad arco o a cupola in luogo di una ad arco gravità.

L'esecuzione del diaframma subalveo con pali affiancati ha portato lo scrivente all'ideazione di paratie e diaframmi ottenuti con trivellazioni di grande diametro, nei quali la tenuta non è più affidata ad una semplice linea di tangenza o di accostamento con eventuali interventi integratori, ma a un combaciamento dei singoli elementi su di una superficie pari ad almeno la metà della sezione diametrale della trivellazione o del tubo formatore, raggiungendo anche un collegamento meccanico fra gli elementi. Si ottengono in tal modo delle paratie non solo stagne, ma anche dotate di un notevole momento resistente, con una disposizione planimetrica che presenta una grande analogia con quella delle palancolate metalliche.

Il principio trova analoga applicazione nella costruzione di diaframmi argillosi per grandi profondità (figg. 24 e 25).

TITO OGNIBENI.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] TITO OGNIBENI: *Le dighe del San Gabriele presso Los Angeles*. - «L'Energia Elettrica», aprile 1941.
- [2] MAURICE LUGEON: *Barrages et géologie*. - Ed. Rouge et Cie, Lausanne.
- [3] KILIAN et BLANCHET: *Sur la présence d'une nappe sous-alluvionnaire d'eau thermique et minéralisée dans le lit de la Durance à Serre-Ponçon (Hautes Alpes)*. - «C. R. Acad. des Sc. Paris», 1921, vol. 172.
- [4] MEYER PETER u. FREY (Zurigo): *Das Proj'e't 1943-44 der Unseren Kraftwerke-Technischer Bericht*, Sonderschrift der Schweiz. Bauzeitung, 1945.
- [5] TITO OGNIBENI: *L'impianto idroelettrico di Génissiat sul Rodano*. - «L'Energia Elettrica», ottobre 1940.
- [6] — *Der Staubecken Malapane bei Turawa*. - «Die Bautechnik», 1936, pag. 28 e 44.
- [7] *Parker Dam*. - «Western Construction News», marzo 1938.
- [8] J. CANEL: *Le Barrage-Réservoir du Chambon sur la Romanche*. - «Les Travaux Publics», mai-juin 1936.
- [9] VERGNIAUD e DROUHIN: *Le Barrage de Bou-Hanifa*. - «Annales de l'Institut Technique ecc.», settembre-ottobre 1936.
- [10] DEGOVE: *Utilisation des Forces Hydrauliques*. - Ed. Eyrolles, Parigi.
- [11] «Der Bauingenieur», ottobre 1932.
- [12] STANLEY DORE: *Permeability Determinations Quabbin Dams*. - «Proceedings», marzo 1936.
- [13] DELAWARE: *Aqueduct*. - «Eng. News Record», novembre 1940.
- [14] C. FRANZI: *Scavi per il taglio della diga di S. Domenico sul Sagittario*. - «Rivista Tecnica delle Ferrovie Italiane», 15 luglio 1927.