Osservazioni conseguenti alla scopertura di due diaframmi di tenuta e contenimento

G. ZANELLA *

SOMMARIO: Premesso che la costruzione di due diaframmi aventi andamento planimetrico arcuato e posti ad una reciproca distanza di circa 6,5 m si è resa necessaria per l'imposta di una diga ad arco sul fondo roccioso sottostante di oltre 34 m all'alveo naturale del torrente, si descrivono le conseguenze avute durante l'asportazione del materiale contenuto fra gli stessi e la loro scopertura.

In particolare vengono descritti la permeabilità e la resistenza dei diaframmi eseguiti con circolazione di fanghi bentonitici e sottoposti ad un carico di acqua massimo pari a 3,5 Kg/cm².

Si conclude con l'esposizione delle osservazioni scaturite dall'esperienza, valevoli così per un'opera similare come per la costruzione di diaframmi aventi funzione di sola tenuta, eseguiti al di sotto di sbarramenti, ed in particolare sulle modalità di esecuzione dei giunti fra i pannelli e degli incastri di roccia.

1. Premessa.

L'*Azienda Generale dei Servizi Municipalizzati* del Comune di Verona ha recentemente realizzato il 2° e 3° Salto degli impianti idroelettrici del Leno di Vallarsa e di Terragnolo, nelle vicinanze di Rovereto, in provincia di Trento (Italia Settentrionale).

Il 3° Salto comprende il serbatoio di Moscheri della capacità di circa 2×10^6 m³, ritenuto dalla diga di Toldo. Il problema costruttivo più importante che si è presentato per la realizzazione di tale opera è stato quello del raggiungimento della roccia del fondo, sottostante di circa 34 m all'alveo naturale del torrente.

A tal fine erano stati presi in considerazione per lo sbarramento, in sede di progetto, tre tipi di struttura: a scogliera ed in terra entrambi con diaframma di tenuta in calcestruzzo incastrato nella roccia di base e dei fianchi così da evitare il forte scavo del materiale alluvionale per la scopertura della roccia di fondo; ad arco-cupola con o senza diaframmi di contenimento delle pareti dello scavo così da garantirsi contro eventuali piene e limitare il volume del materiale scavato.

Varie considerazioni, oltre quelle economiche che erano risultate favorevoli alla scelta del tipo ad arco-cupola con diaframma di contenimento, hanno suggerito di abbandonare gli sbarramenti in materiali sciolti.

La diga ha le seguenti caratteristiche:

— altezza massima		m 64
— altezza sul greto		m 30
— volume		m³ 17'000
— spessore in chiave	in sommità	m 1,60
	alla base del tampone	m 6,50
— spessore massimo all'imposta	in sommità	m 3,50
	alla base del tampone	m 11,00
— raggio planimetrico di curvatura della cupola	massimo	m 47,20
	minimo	m 27,17
— raggio planimetrico di curvatura del tampone	massimo	m 54,00
	minimo	m 19,65 ÷ 26,65

L'opera, tracimabile nella parte centrale del coronamento mediante cinque luci, è completata da uno scarico di fondo e da uno scarico di superficie con paratoia automatica a settore, entrambi ubicati in sponda destra, assieme alla galleria di derivazione. Lo scarico di fondo ha funzionato come deviazione provvisoria durante la costruzione.

Una briglia di ritenuta del trasporto solido, da

* Dr. Ing. Giuseppe ZANELLA, Progettista e Direttore dei Lavori dell'*Azienda Generale dei Servizi Municipalizzati* di Verona.

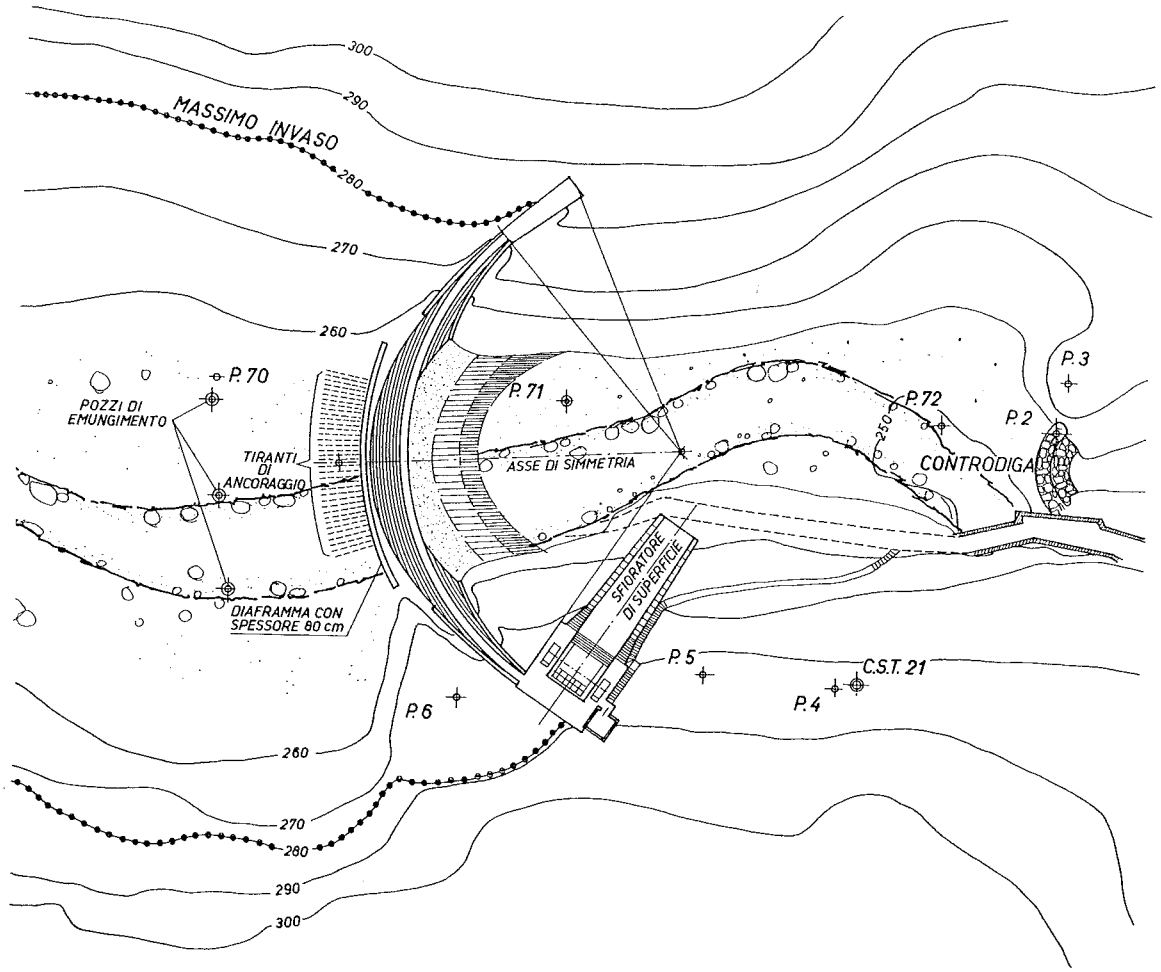


Fig. 1. - Planimetria della diga.

tempo esistente, funge da controdiga per lo smorzamento delle piene. Questo manufatto, costruito alla fine del secolo XIX, è quello che ha comportato l'elevato spessore del materasso alluvionale; la sua demolizione, presa in esame in sede di progetto, non è stato possibile per i gravi inconvenienti che avrebbe causato alle opere esistenti a valle.

La costruzione iniziata nell'ottobre 1963 è stata completata nell'agosto 1965.

2. Descrizione delle opere ; il progetto.

Trascurando di descrivere la struttura vera e propria della diga e le opere annesse, che in questa sede non rivestono particolare importanza, ci si limiterà ad illustrare le modalità costruttive dei diaframmi e del tampone di fondo la cui realizzazione ha peraltro comportato qualche difficoltà.

La disposizione planimetrica dei due diaframmi è stata progettata tenendo presenti le esigenze statiche del tampone di fondo per il quale, dato anche il forte spessore degli archi, era necessario prevedere un ingrossamento degli stessi verso le imposte. A tal fine fu preliminarmente eseguita una serie limitata di sondaggi che incontrando la roccia d'imposta ne ha indicato l'andamento alle diverse quote. Fu successivamente redatto un primo progetto nel quale il raggio di curvatura del diaframma di monte fu mantenuto, per le varie profondità, costantemente uguale a m 54,00 mentre il raggio del diaframma di valle fu previsto di m 26,65 pure costante per le varie profondità. Questo primo progetto fu sottoposto (assieme alla struttura della diga) alle normali prove di carico su modello ridotto in scala 1:80 presso l'*Istituto Sperimentale Modelli e Strutture* (I.S.M.E.S.) di Bergamo, con lo scopo, fra l'altro, di indagare in modo particolare il comportamento del tampone e l'effetto che sullo stesso e sulla struttura superiore avrebbe avuto la controspinta del terreno di valle. Le prove dimostrarono come fosse opportuno accentuare la curvatura del diaframma stesso verso l'imposta destra così da aumentare lo spessore dell'arco,

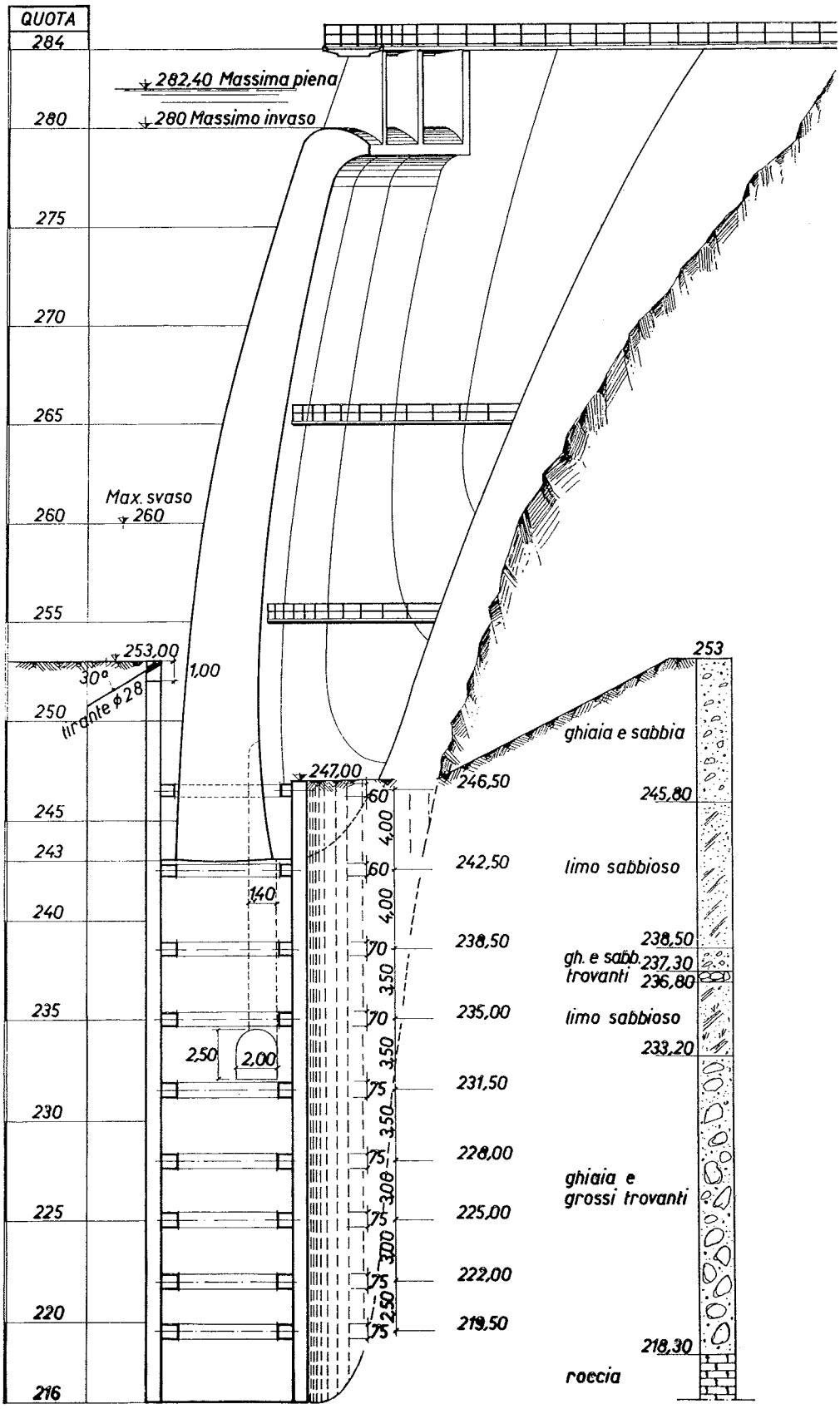


Fig. 2. - Sezione in chiave.

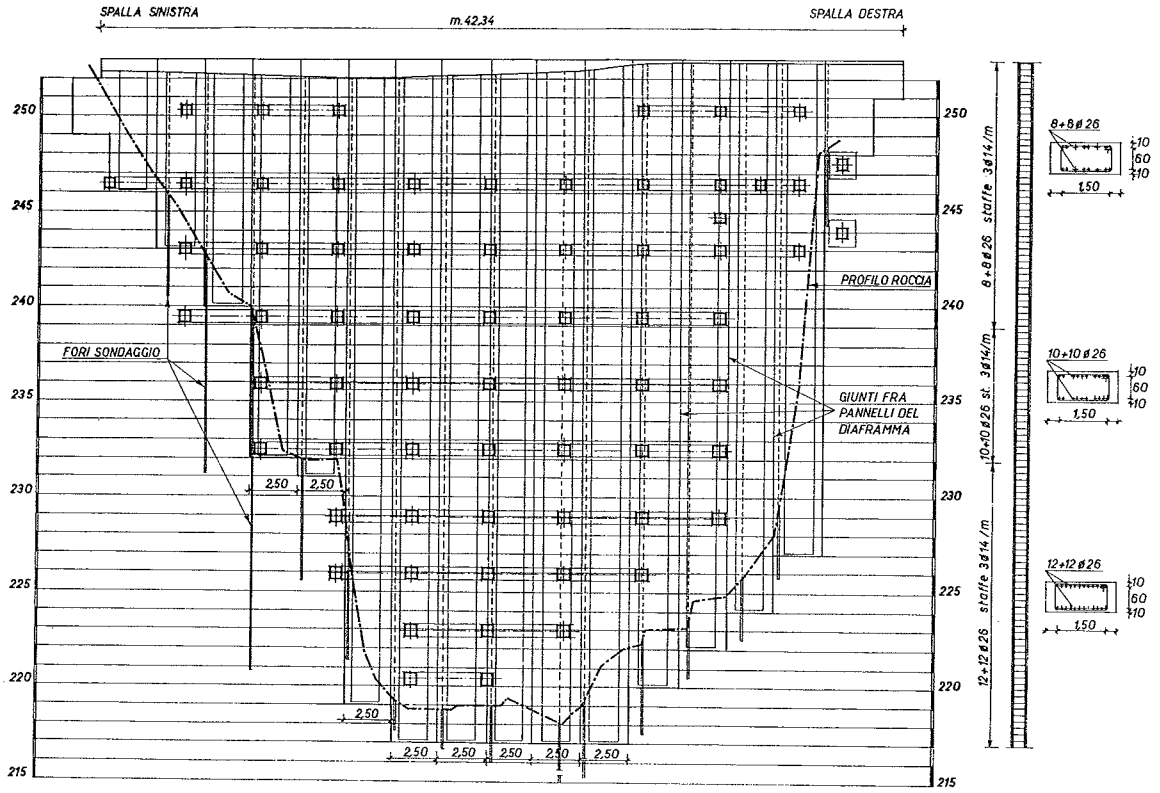


Fig. 3. - Vista dei diaframmi con disposizione dei puntoni ed armature.

che la controspinta del terreno e delle falde di valle contribuiva a diminuire in misura rilevante i cedimenti flessionali della piastra (Prof. Ing. G. Oberti), e come fosse infine opportuno, per ridurre gli sforzi di trazione, prevedere un giunto verticale nel tampone, che venne anche maggiormente armonizzato con la volta soprastante. Il secondo modello provato con queste modifiche ha rilevato l'ottimo comportamento di tutta la struttura. Il diaframma di valle fu perciò realizzato con due raggi di curvatura, di m 19,65 e di m 26,65.

La disposizione altimetrica è diversa per i due diaframmi: quello di monte termina a quota 253 s.l.m. (circa 1,50 m sopra il greto del torrente, così da funzionare da tura di deviazione), quello di valle a quota 247,00 s.l.m. Il terreno a valle fu conseguentemente sbancato sino a tale piano, da dove avrebbe avuto inizio l'asportazione mediante benna mordente del nucleo di materiale alluvionale interposto.

La struttura dei due diaframmi ha uno spessore di m 0,80, costante per tutta la loro altezza. La loro stabilità era assicurata da una reciproca sbadacchiatura con puntoni di calcestruzzo armato aventi una sezione in sommità di m 0,60 × m 0,60

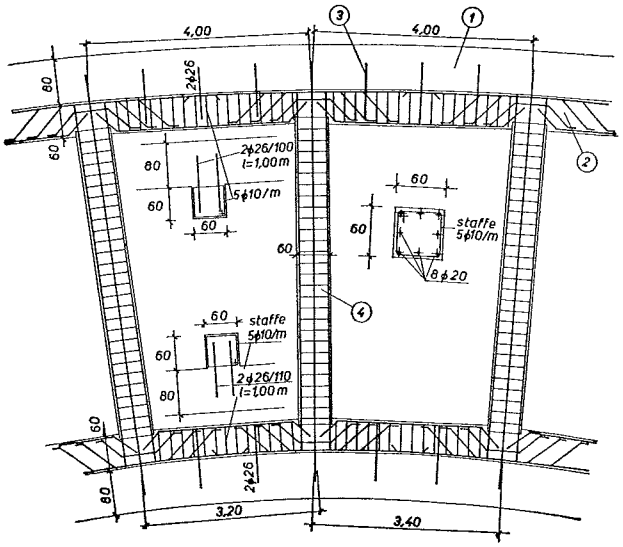


Fig. 4. - Armatura dei puntoni e dei cordoli.

gradualmente crescente verso il fondo sino ad un massimo di m 0,70 × m 0,75. I puntoni, disposti ad una reciproca distanza planimetrica di m 3,20 (misurate sull'asse longitudinale dello scavo) si impostano su due cordoli longitudinali addossati ai diaframmi per tutta la loro lunghezza, disposti altimetricamente ad una distanza decrescente dall'alto

al basso e variabile da un massimo di m 3,50 in sommità ad un minimo di m 2,50 al fondo. Anche la loro sezione è variabile da m 0,60 × m 0,60 alla sommità, a m 0,75 × m 0,90 al fondo (figg. 3, 4 e 5).

Alla sommità del diaframma di monte è stato costruito un cordolo armato, nel quale sono stati ancorati i tiranti di sostegno della parte della struttura superiore a quota 247 s.l.m. che non poteva essere appoggiata al diaframma di valle. I tiranti in acciaio ad alta resistenza del ∅ 28 mm, sono in numero di 29 e della lunghezza di 15 ÷ 16 metri ciascuno, infissi nel terreno con un angolo di 30° e resi aderenti allo stesso mediante iniezioni cementizie (fig. 6).

Il calcolo è stato condotto:

a) per i due diaframmi come soletta continua soggetta alla spinta idrostatica e del terreno, su appoggi cedevoli;

b) per i cordoli longitudinali come travi pure continue soggetti al carico loro trasmesso dai diaframmi e solidali con i puntoni.

Conseguentemente furono dimensionate le relative armature.

La costruzione dei diaframmi fu prevista mediante scavo del terreno con apposita benna lavorante in presenza di fanghi bentonitici da eseguirsi per pannelli della lunghezza di m 2,25 [1].

3. Esecuzione delle opere.

La costruzione ha avuto inizio con il diaframma di monte partendo dalla spalla destra. Dopo lo scavo spinto fino alla roccia, veniva posta in opera l'armatura metallica già predisposta in gabbie ed infine colato il calcestruzzo dosato a q.li 3,5 di cemento a. r. mediante tubazione posata sul fondo dello scavo e mantenuta sempre annegata nel getto. Veniva poi iniziato lo scavo del pannello immediatamente adiacente facendo in modo che la benna incidesse per circa 25 cm il calcestruzzo da poco gettato così da creare una ammorsatura (giunto) per il nuovo pannello.

Già dall'inizio si manifestarono tre difficoltà, che nell'ordine di importanza furono:

a) l'incisione della roccia dei fianchi e del fondo così da garantire la perfetta aderenza del pannello alla stessa senza lasciare vuoti. Questa difficoltà era funzione essenzialmente dell'andamento irregolare della roccia dotata di parecchie cavità e protuberanze e dell'impossibilità da parte dello scalpello, per quanto pesante esso fosse, e che veniva impiegato dopo l'asportazione del materiale alluvionale, di incidere efficacemente la roccia ed infine del particolare tipo di benna impiegato. Questa impossibilità si è manifestata essenzialmente sul fondo;

b) la presenza di grossi trovanti che comportando l'uso dello scalpello costringevano ad una notevole perdita di tempo;

c) la creazione di un giunto veramente sicuro fra i vari pannelli, difficoltà dovuta alla naturale deviazione della benna che pur riuscendo nei primi metri ad incidere il calcestruzzo precedentemente gettato, (quando esso era ancora fresco) se ne allontanava mano a mano che si procedeva verso il fondo così da non consentire più un incastro continuo.

Furono allora presi i seguenti provvedimenti:

a) fu eseguita una serie assai ravvicinata di sondaggi sulla rimanente parte del diaframma di monte ancora da eseguire e per tutto lo sviluppo di quello di valle in prossimità delle spalle così da permettere sopratutto una conoscenza più esatta della roccia laterale e di fondo. Durante l'esecuzione dei sondaggi del diametro di circa 110 mm furono sparate, per demolire i trovanti esistenti, numerose mine;

b) i trovanti che ritardavano l'avanzamento furono fatti brillare con cariche unidirezionali, in modo cioè da non far crollare le pareti dello scavo e danneggiare il calcestruzzo fresco. I risultati furono soddisfacenti sotto ogni riguardo;

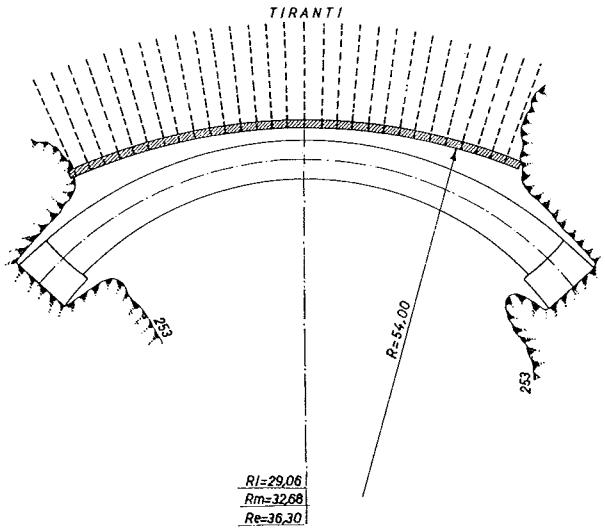
c) in luogo di un solo tratto della lunghezza di m 2,25 fu aperto uno scavo doppio di m 4,50 così da eliminare un giunto. Lo scavo fu praticato poi a tratti alterni, sempre della lunghezza di m 4,50, lasciando fra gli stessi interposto un nucleo di materiale della lunghezza di m 2,25, la cui successiva asportazione diventando assai rapida consentiva alla benna di attaccare il calcestruzzo laterale ancora fresco dal quale veniva guidata e contenuta. Questo provvedimento aumentò la celerità del lavoro e consentì di creare dei giunti più sicuri, come si poté appurare in seguito.

Ultimata l'esecuzione dei diaframmi e la posa in opera dei tiranti di ancoraggio della sommità del diaframma di monte, si intraprese lo sbancamento del terreno dal piano originario del torrente fino alla quota 247 s.l.m., sommità del diaframma di valle, e fu costruito il primo ordine di cordoli longitudinali e di puntoni.

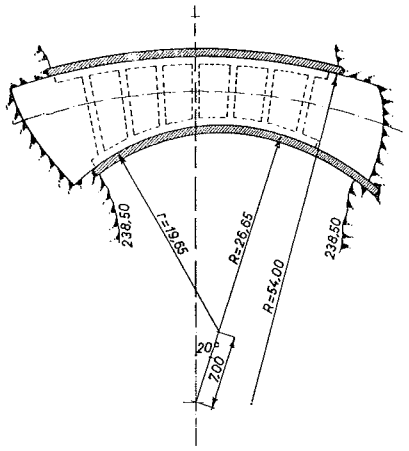
Furono installati poi due gruppi elettropompa

[1] Una simile struttura ma con caratteristiche costruttive alquanto diverse fu già adottata alcuni anni or sono dalla Soc. Montecatini per la diga di Monguelfo.

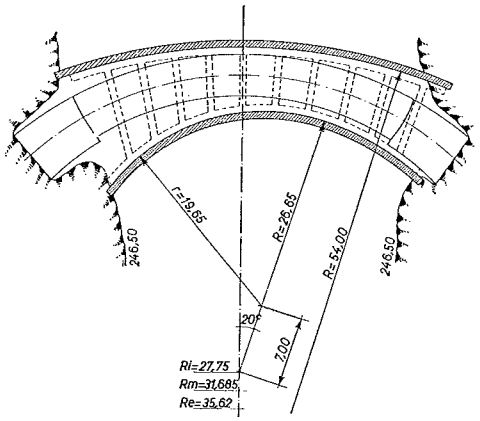
ARCO A QUOTA 253,00 m.s.l.m.



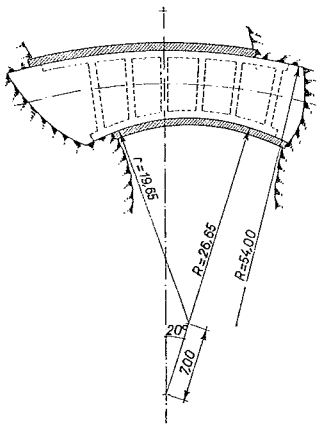
ARCO A QUOTA 238,50 m.s.l.m.



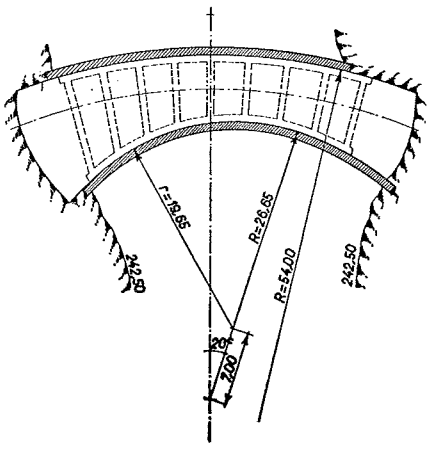
ARCO A QUOTA 246,50 m.s.l.m.



ARCO A Q. 231,50 m.s.l.m.



ARCO A QUOTA 242,50 m.s.l.m.



ARCO A Q. 219,50 m.s.l.m.

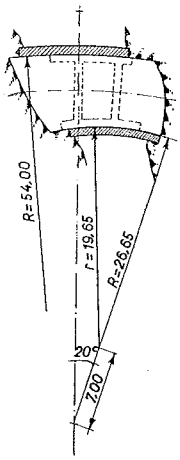


Fig. 5. - Sezioni orizzontali della diga e dei diaframmi a varie quote.

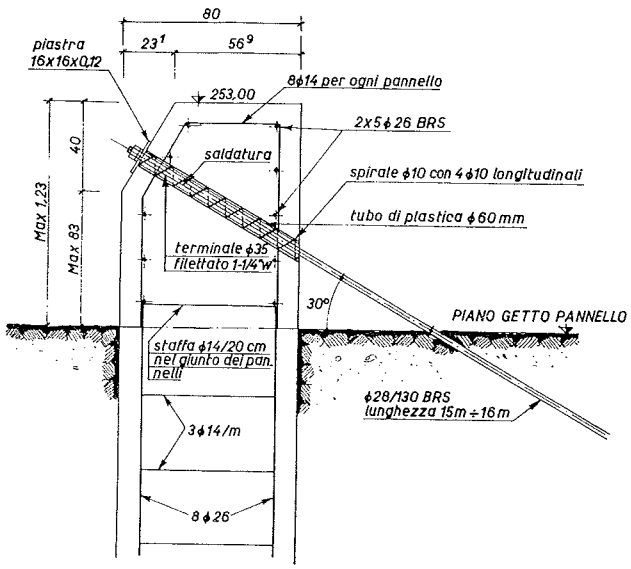


Fig. 6. - Tiranti di ancoraggio in sommità del diaframma di monte.

mobili destinati a seguire l'approfondimento dello scavo e ad aggottare le acque di infiltrazione valutate in sede di progetto pari ad un massimo di 300 l/sec.

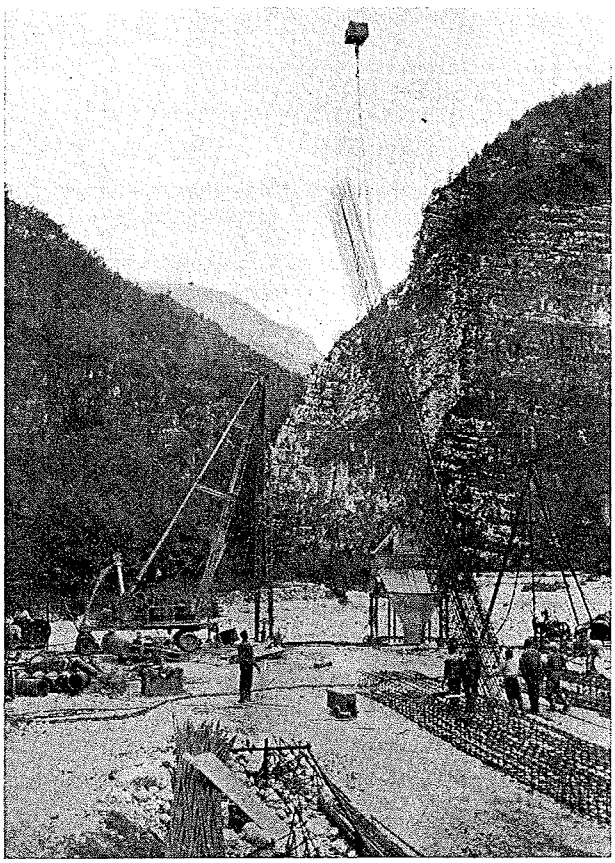


Fig. 7. - Esecuzione del diaframma di monte: posa in opera dell'armatura metallica.

Lo scavo del nucleo centrale venne iniziato con benna mordente a polipo caricante direttamente su autocarro. Durante l'approfondimento dello scavo dal primo al secondo ordine di puntoni si ebbero dai due lati del diaframma di monte forti venute d'acqua con notevole trascinamento di sabbia, passante attraverso varchi di assai limitate dimensioni esistenti fra il calcestruzzo e la roccia dei fianchi. Tali venute si preannunciarono dopo parecchie ore dell'avvenuta scopertura del diaframma, quando il lento stillicidio aveva dilavato la bentonite giacente sul calcestruzzo e nel terreno di contatto.

Poiché il banco di sabbia esistente a monte aveva una potenza di circa 10 m, fu decisa allora l'infissione di palancole metalliche, adiacenti al diaframma così da seguire più efficacemente e per un'altezza di 10 m l'andamento della roccia delle spalle. Fra diaframma e palancole furono praticate iniezioni di boiacca di cemento. Il lavoro poté così proseguire sino al quarto ordine di puntoni, in corrispondenza del quale il materiale era costituito da piccoli trovanti con interposto materiale limoso, compatto non facilmente dilavabile. Poiché l'infissione di palancole divenne allora impossibile, la cucitura fra diaframma e roccia fu eseguita con puntanzze forate, infisse mediante trivellazione e successivamente iniettate con boiacca di cemento. Esse avevano origine nel diaframma e si incastravano nella roccia dei fianchi. Tale provvedimento, attuato prima di procedere all'asportazione del materiale naturale si dimostrò successivamente del tutto efficace e non si ebbero più irruzioni di acqua e materiale tanto che ci si propose il dubbio sulla loro effettiva necessità.

Altre due sensibili venute d'acqua si verificarono in corrispondenza di due giunti non perfettamente saldati fra di loro per la non perfetta verticalità dei pannelli; esse ebbero inizio dopo qualche ora dalla scopertura, da quando cioè era stato asportato dallo stillicidio il materiale ricco di bentonite, adiacente al diaframma. Non si ebbero mai sifonamenti dal fondo dello scavo. Al fine tuttavia di diminuire il carico idrostatico gravante sul diaframma, più a titolo precauzionale che per effettiva necessità, furono trivellati a monte dello stesso tre pozzi del diametro di m 1 nei quali vennero installati tre gruppi elettropompa, il funzionamento dei quali consentì di abbattere la falda di circa 15 m. Numerose prove furono effettuate a questo proposito con gruppi elettropompa fermi o in movimento: in entrambi i casi non si verificarono danni al diaframma. Entrambi i diaframmi presentarono sul loro paramento alcune notevoli protuberanze do-

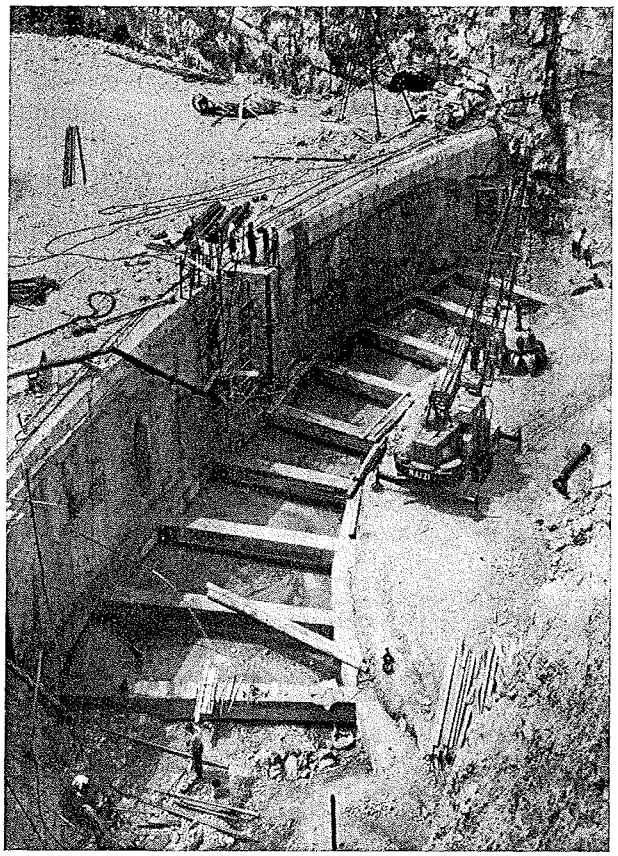


Fig. 8. - Scavo del tampone: 1° ordine di puntoni a quota 247.

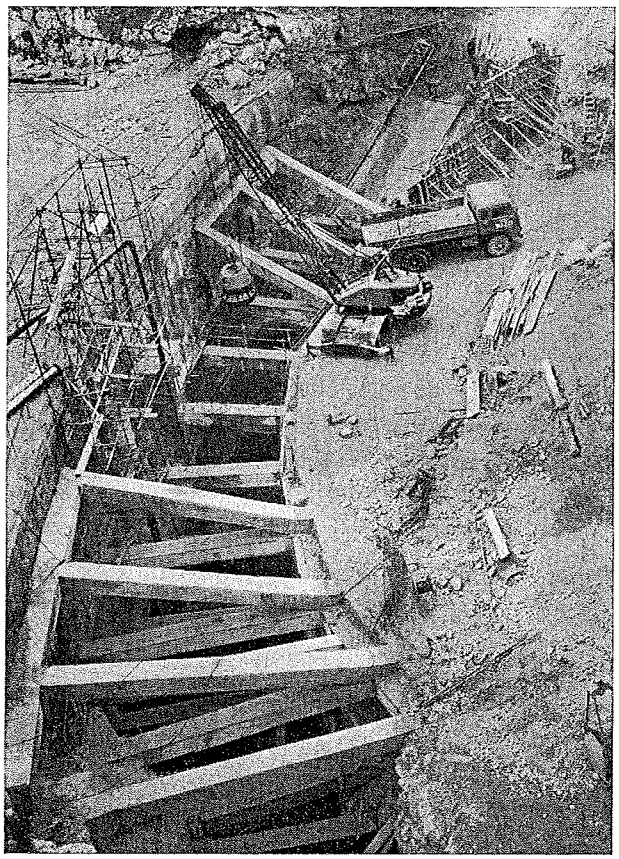


Fig. 9. - Scavo fra i due diaframmi.

vute a franamenti del terreno avvenuti durante la loro costruzione. Le corrispondenti cavità erano state riempite dal calcestruzzo. Risultò chiaro che queste protuberanze non erano dovute allo sparo delle mine ma a franamenti delle sponde dello scavo conseguenti a minor concentrazione dei fanghi bentonitici.

Anche lo scavo della roccia per le imposte laterali e di fondo del tampone, eseguito sempre mediante esplosivi senza particolari prudenziali accorgimenti, non si ripercosse sulla stabilità dei diaframmi e sulla loro tenuta.

Nessuna lesione fu notata nel calcestruzzo tranne che per la parte compresa fra quota 253 e quota 247 verificatasi longitudinalmente nel diaframma di monte: tale lesione peraltro capillare, era stata tuttavia prevista già in sede di progetto per le assai elevate sollecitazioni di trazione alle quali la struttura era sottoposta.

La costruzione dei cordoli longitudinali e dei puntoni avveniva con l'approfondirsi dello scavo, previa scalpellatura dei diaframmi ed infissione dei ferri di ancoraggio e sostegno. In numerosi punti, mediante martello demolitore fu accertato il reale spessore della struttura che risultò superiore a quelle di progetto.

Ancora prima di ultimare completamente lo scavo fu dato inizio al getto di due conci laterali; infine a quelli centrali separati da un giunto provvisto di lamierino di tenuta. Con il progredire del getto mediante martello demolitore venivano scalpellati i puntoni in prossimità dei paramenti, mentre essi vennero asportati dove andavano ad interessare la volta per non indurre nella stessa sforzi secondari sicuramente dannosi. Iniezioni di intasamento vennero eseguite dopo il getto in corrispondenza di ogni puntone.

4. Conclusioni.

Poiché non ci risulta che siano stati fino ad oggi scoperti altri diaframmi dell'altezza di circa 34 m, e poiché d'altra parte l'impiego di tali diaframmi trova sempre più frequenti applicazioni specialmente nelle dighe in materiali sciolti, ci sembra conveniente riassumere gli insegnamenti che abbiamo tratto da questa nostra esperienza. Essi sono:

a) *Sondaggi preliminari.* Scelta la sezione dove ubicare lo sbarramento, è indispensabile procedere ad una seconda serie di sondaggi di diametro suffi-

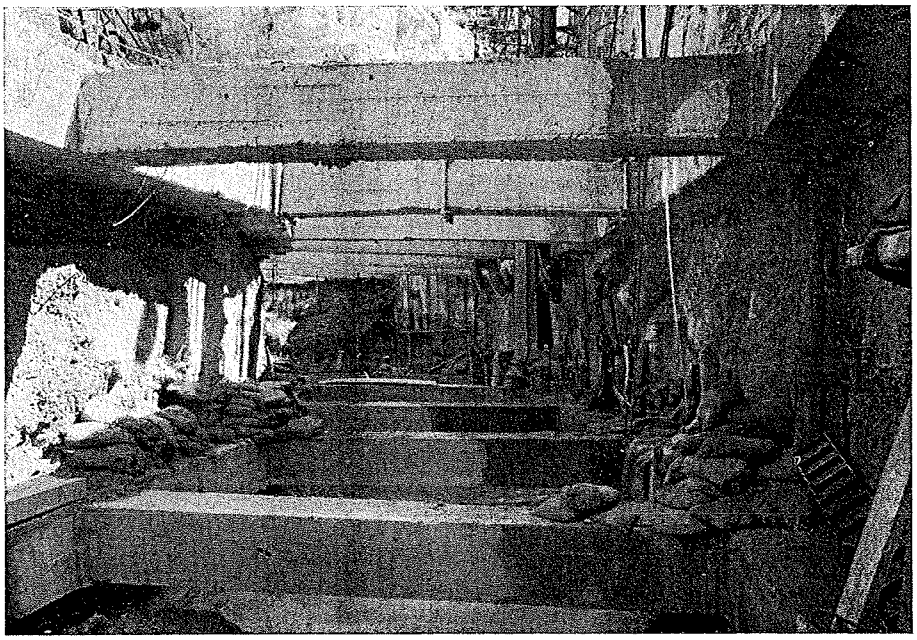


Fig. 10. - Scavo fra i due diaframmi: zona compresa fra il primo ed il secondo ordine di puntoni.

cientemente grande così da individuare con estrema esattezza l'andamento del suolo dove dovrà essere incastrato il diaframma. I sondaggi dovranno essere particolarmente avvicinati in corrispondenza delle spalle, dove l'andamento della roccia deve accuratamente essere individuato. Essi dovranno essere fra loro distanti non più di 0,50 m. Se la forma della valle è ad *U* essi potranno essere maggiormente distanziati (ma non più di m 1,50), procedendo dalle spalle verso il centro. Se la forma della valle da sbarrare è a *V* essi dovranno essere sempre molto vicini.

b) *Bonifica preliminare.* Gli stessi sondaggi è conveniente siano utilizzati per una preventiva bonifica del materiale, facendo esplodere in essi opportune cariche per la distruzione di eventuali grossi trovanti. Possono essere inoltre utilmente impiegati per praticare una serie di iniezioni cementizie nella roccia di appoggio del diaframma, così da chiudere eventuali fessure della stessa.

c) *Progetto del diaframma.* Una volta individuato con la massima esattezza l'andamento della roccia d'appoggio del diaframma, si determinerà il metodo più conveniente per la esecuzione di quest'ultimo, che sarà effettuata con pannelli della maggiore larghezza possibile (per diminuire il numero dei giunti e per celerità di lavoro) dove la valle è più larga ed il fondo pressochè piano (valle ad U), per procedere con dimensioni planimetriche minori in prossimità dei fianchi per giungere anche all'infissione di pali, in prossimità della roccia. Il diametro di questi pali, può essere anche inferiore allo spessore del diaframma e diminuire ulteriormente al contatto della roccia: se il terreno non è infatti costituito da sola sabbia sono sufficienti piccoli spessori per contenere senza permeazioni anche forti spinte idrostatiche. Se la presenza di sabbia è ragguardevole è conveniente procedere con iniezioni di silicato di sodio estese per tutta la superficie di contatto. Ultimato il diaframma è bene eseguire delle iniezioni di cucitura fra roccia e diaframma ed a tal fine introdurre nel calcestruzzo, a conveniente distanza, delle tubazioni estendentesi dalla sommità al fondo per evitare di dover perforare il diaframma per tutta la sua lunghezza, con il pericolo, se esso è di limitato spessore, che la sonda esca dalla struttura. Non è indispensabile che il diaframma sia di grande spessore, ma è opportuno non scendere a dimensioni troppo piccole (sotto 0,50 metri) sopratutto per la necessità di introdurre nello scavo prima del getto le armature metalliche la presenza delle quali è sempre molto opportuna.

d) *Esecuzione del diaframma.* Nonostante la grande cura con la quale si è cercato di ottenere che il contatto diaframma-roccia dei fianchi fosse continuo ed impermeabile, si è visto nei nostri lavori che è molto difficile impedire passaggi di acqua. Questi però si sono verificati un certo tempo dopo la scopertura, quando era stato tolto il terre-

no impregnato di fango bentonitico e mai per sifonamenti dal fondo. Se ne può dedurre che ove lo scavo venga effettuato con una miscela bentonitica assai ricca e vengano adottate le precauzioni sopra indicate, si può contare su una buona impermeabilità, sopratutto quando anche la roccia d'imposta sia stata trattata con iniezioni. L'impiego di mine durante lo scavo non ne danneggia le pareti e nemmeno il calcestruzzo adiacente.

La formazione dei vari pannelli può procedere per lunghezza di anche 6 m lasciando interposto fra l'uno e l'altro un setto di circa almeno 2 m, cosicché durante l'asportazione di questa ultima porzione di materiale naturale è possibile incidere più facilmente il calcestruzzo adiacente e conseguire un giunto migliore ed un minor numero di giunti. Questi infatti rappresentano il secondo punto debole di tutti i diaframmi, con qualsiasi sistema essi vengano realizzati sopratutto quando non sia possibile un successivo controllo. Grandi timori non debbono però affacciarsi al progettista per la loro tenuta: vale per essi quanto affermato per il controllo diaframma-roccia, quando il terreno sia rimasto impregnato di fanghi bentonitici.

Un sistema per realizzare un efficace incastro fra due pannelli successivi può essere quello di introdurre nello scavo, in corrispondenza della superficie di contatto, una tubazione (preferibilmente a sezione rettangolare), costituita in materiale fragile che, servendo anche da guida ai denti della benna, provochi, con la sua rottura, una cavità di sufficiente ampiezza dove possa successivamente penetrare il calcestruzzo del pannello successivo.

Sono state avanzate da alcuni costruttori alcune perplessità circa l'opportunità di inserire questo tipo di diaframma nelle dighe in materiali sciolti per il timore che gli assestamenti di questi ultimi provochino fessurazioni od anche rotture del calcestruzzo. Dall'esperienza acquisita possiamo affermare che tali timori sono infondati, sopratutto se si adottano buoni spessori con armature in ferro.

Infatti eventuali fessurazioni conseguenti a naturali sollecitazioni di trazione non danno luogo a passaggio di acqua.

SUMMARY

Observations following the excavation of a 30 m deep trench between two concrete diaphragms.

During the construction of the S. Colombano arch dam on the lower Leno di Vallarsa it has been necessary to dig a trench to bedrock through an alluvial mantle filling the rocky gorge with a thickness of 30 m.

The following procedure has been adopted: two reinforced concrete arched diaphragms have been constructed through the alluvial mantle down to the bedrock; then the excavation was conducted in between, strutting the diaphragms one against the other as the trench was deepened. The reinforced concrete struts were built in longitudinal heavily reinforced beams.

The A. reports the details of the procedure. The techniques involved are not new, but the present case is rather unusual since the diaphragms have been excavated to a depth of more than 30 m, allowing a thorough verification of the successfullness of the work. Particular attention is given in the paper to such details as the joints between the panels and the connexions between the concrete diaphragms and the rock on the sides and on the bottom of the gorge, that have revealed perfectly watertight under a water pressure of 3,5 kg/cm^2.

It is believed that experiences gained could be valuable for judging the effectiveness and reliability of this type of structure in similar conditions.