

ENTE NAZIONALE PER L'ENERGIA ELETTRICA
ENEL

CENTRO PROGETTAZIONE E COSTRUZIONE IDRAULICA ED ELETTRICA
con Sede in
VENEZIA

Dott. Ing. ENRICO MANTOVANI

L'IMPIANTO IDROELETTRICO DI GENERAZIONE E POMPAGGIO
LAGO D'ARNO - S. FIORANO

Estratto dal fascicolo n. 11 - Volume XLIX - 1972
della Rivista mensile « L'ENERGIA ELETTRICA »

ENRICO MANTOVANI (*)

L'impianto idroelettrico di generazione e pompaggio Lago d'Arno - San Fiorano

Sommario

Dopo una breve illustrazione dei criteri informativi del progetto, si descrivono le opere idrauliche e civili e le caratteristiche principali del macchinario dell'impianto idroelettrico di generazione e pompaggio Lago d'Arno - San Fiorano, in corso di avanzata realizzazione.

L'impianto utilizza su un salto di circa 1 400 m, i deflussi di un bacino imbrifero di 68,2 km², regolati dal serbatoio del Lago d'Arno e da altri quattro serbatoi a monte di quest'ultimo, aventi una capacità complessiva di 70,5 hm³.

Nella centrale sono installati due gruppi turbina-alternatore e due gruppi pompa-turbina-alternatore/motore, per una potenza totale di 560 MW in generazione e di 210 MW in pompaggio.

Le portate utilizzate vengono scaricate in parte nel sottostante impianto Cedegolo-Civitate ed in parte in una vasca di accumulazione dalla quale, nelle ore di basso carico, sono riportate mediante pompaggio al Lago d'Arno.

1. - CENNI INTRODUTTIVI.

1.1. - I criteri informativi del progetto.

Nelle valli dei torrenti Remulo e Poggia, affluenti di sinistra del fiume Oglio, sono stati costruiti negli anni tra il 1910 e il 1930, ed a quote comprese tra i 2 281,50 ed i 1 780,00 m s.m., cinque serbatoi di accumulo stagionale, aventi una capacità utile complessiva di 70,5 hm³. Il serbatoio inferiore (Lago d'Arno), riceve attraverso la centrale di Campellio le acque degli altri quattro serbatoi ed alimenta i due impianti in serie di Isola e di Cedegolo I, aventi rispettivamente un salto medio lordo di concessione di 915,80 m e 478,31 m ed una potenza efficiente di 40 MW e 28 MW.

Queste potenze non consentono una adeguata utilizzazione dell'energia accumulabile nei cinque serbatoi; d'altra parte la vetustà e le caratteristiche dei due impianti rendono troppo onerosa la loro trasformazione per adattarli alle esigenze di un moderno sistema di generazione dell'energia elettrica.

L'Enel ha perciò deciso di costruire un nuovo impianto, denominato di San Fiorano, che, partendo dal Lago d'Arno,

sottende completamente la centrale di Isola e parzialmente quella di Cedegolo I, con restituzione poco a valle di quest'ultima (figg. 1 e 2).

La potenza da installare nella centrale di San Fiorano, adottando i consueti criteri di dimensionamento (svaso dei serbatoi in circa 900 ore), sarebbe di 280 MW.

Tuttavia, le condizioni morfologiche e topografiche favorevoli, rispecchiate anche dal rapporto tra lo sviluppo delle opere di derivazione ed il salto, che è pari a 4,6, consentono di aumentare la potenza, a costi incrementali vantaggiosi. Poichè gli apporti meteorici non sono sufficienti per garantire una conveniente utilizzazione della maggior potenza, la centrale è dotata di pompe che, nelle ore di basso carico, possono ritrasferire al Lago d'Arno una parte delle acque turbinate nelle ore di punta, trattenute da un'apposita vasca di accumulazione.

Il limite all'incremento della potenza è dato dalla quantità di energia che può essere messa in ciclo tra il serbatoio inferiore e quello superiore, e cioè, nel caso dell'impianto di San Fiorano, dalla capacità della vasca, il cui valore massimo è determinato dalle condizioni locali.

L'incremento della potenza installata così realizzabile è di altri 280 MW, previsti per una utilizzazione di circa 4 ore/giorno.

L'impianto può quindi svolgere i seguenti servizi:

- generazione, mediante l'utilizzazione dei deflussi di un bacino imbrifero di 68,2 km²: la producibilità media annua è di 317,6 GWh e può essere concentrata per la maggior parte nel periodo invernale; la producibilità sottesa degli impianti di Isola e Cedegolo è di 250 GWh;
- riqualificazione dell'energia, con ciclo giornaliero: supponendo che l'utilizzazione della potenza alimentata con l'energia accumulata mediante pompaggio sia di 1 000 ore all'anno, la produzione è di 257,4 GWh all'anno;
- riserva, fredda o rotante: l'energia accumulata nei cinque serbatoi, con il livello massimo di esercizio normale, è di 230 GWh;
- regolazione della frequenza della rete.

1.2. - Caratteristiche principali.

L'impianto è costituito dalle seguenti opere (fig. 3):

- serbatoio del Lago d'Arno, avente una capacità utile di 36,6 hm³;

(*) DOTT. ING. ENRICO MANTOVANI, Vice Direttore del Centro Progettazione e Costruzione Idraulica ed Elettrica dell'Enel, con sede in Venezia.

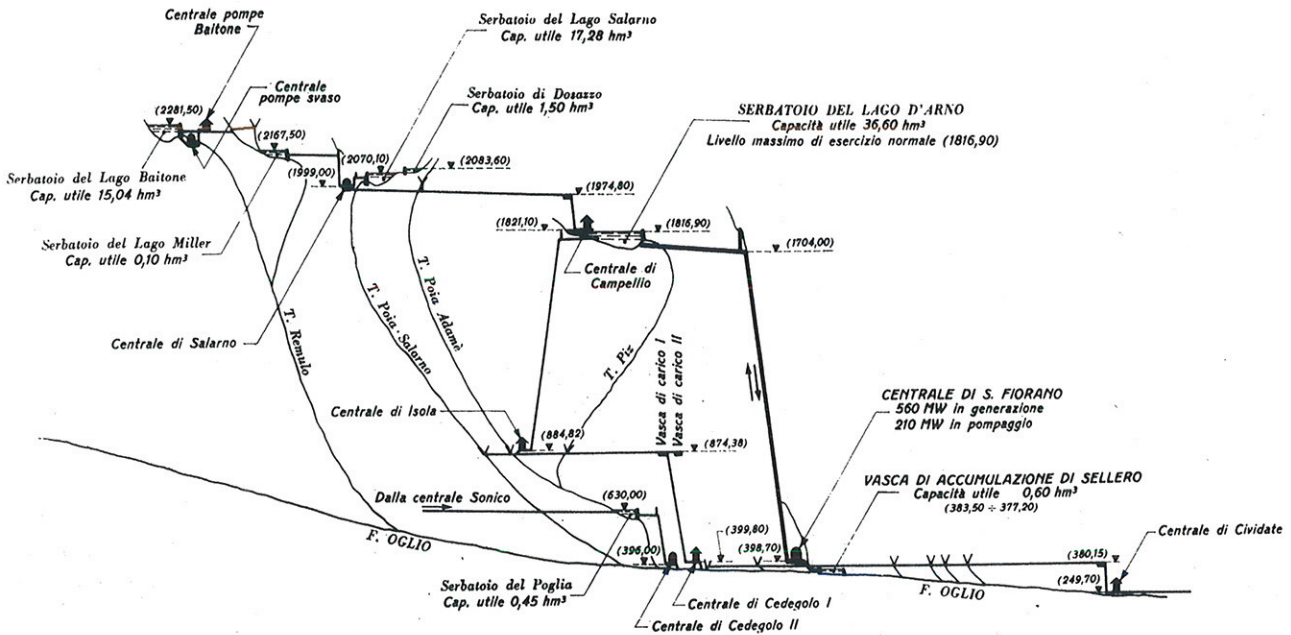


Fig. 2. - PROFILO SCHEMATICO DELLE UTILIZZAZIONI SUI TORRENTI REMULO E POGLIA. La capacità utile complessiva dei cinque serbatoi è di 70,5 hm³. La producibilità dell'impianto di S. Fiorano è di 318 GWh, alla quale va aggiunta una produzione di 257 GWh ottenibile mediante accumulo per pompaggio.

— centrale ausiliaria: vi sono installati otto gruppi binari reversibili (alternatore/motore e turbina/pompa) i quali durante il servizio di generazione utilizzano, sul dislivello esistente tra il canale di scarico e la vasca di accumulazione, le portate che non possono essere recepite dal canale di Cividate e durante il servizio di pompaggio sollevano le stesse acque dalla vasca al canale di scarico e di aspirazione.

Le caratteristiche dell'impianto sono:

- differenza di livello tra il serbatoio e la vasca di accumulazione:

massima	1 439,70 m
minima	1 361,50 m
- portata massima derivabile:

in generazione	45,00 m ³ /s
in pompaggio	13,50 m ³ /s
- potenza installata nella centrale di S. Fiorano:

pompe	210 MW
turbine	560 MW
alternatori/motori	620 MVA

Il rendimento del ciclo di pompaggio e generazione, inteso come rapporto tra le energie misurate all'uscita e all'entrata dei trasformatori e calcolato per la prevalenza media delle pompe ed il salto medio e la portata pari agli 8/10 della portata massima delle turbine, è di 0,74.

1.3. - Morfologia.

Il serbatoio del Lago d'Arno è stato ottenuto sovralzando, mediante una diga di ritenuta, il livello di un lago naturale che occupava il fondo di una conca di origine glaciale, di forma alquanto allungata, circondata da cime di quota superiore ai 2 500 m s.m., tra le quali spicca il Re di Castello (2 891 m s.m.).

Il torrente Piz, emissario del lago, si apre la via verso l'Oglio in una valle stretta e ripida. La galleria di derivazio-

ne è scavata nel versante sinistro della valle, all'incirca al disotto del lungo e accidentato crinale che segna lo spartiacque tra i bacini del Piz e del Tredenus; essa sbocca al limite superiore dei boschi che coprono le pendici del monte Colombè. Il tracciato delle condotte forzate si svolge lungo queste pendici, ripidissime e interrotte da alcuni salti rocciosi nella parte superiore, più dolci nel tratto inferiore. In corrispondenza di un pianoro, che interrompe il pendio, le condotte entrano in galleria, per raggiungere la centrale, che è in caverna.

L'imbocco della galleria di accesso alla centrale si trova in sponda sinistra dell'Oglio, mentre la vasca di accumulazione è situata nella vasta piana alluvionale in destra del fiume.

1.4. - Geologia.

Il serbatoio ha la sponda sinistra e parte della sponda destra costituite dalla caratteristica formazione rocciosa del massiccio dell'Adamello nota come « tonalite »; in sponda destra compaiono anche altre formazioni (dioriti, scisti e arenarie). La diga è impostata sulla tonalite; sui fianchi, e sulle arenarie del Verrucano, nella parte più profonda.

Il tracciato della galleria interessa diverse formazioni litologiche (fig. 3); le estremità sono situate nelle arenarie appartenenti alle formazioni del Verrucano e del Servino, tra le quali si è incuneata la massa intrusiva delle tonaliti e granodioriti dell'Adamello, interrotta a sua volta, da una zolla sedimentaria di calcari saccaroidi a grana grossa, talvolta farinosi e cariati.

La varietà dei tipi litologici, ed il loro assetto strutturale, con la presenza di numerose fratture che in qualche punto hanno provocato la formazione di ammassi caotici di grossi blocchi, hanno dato luogo a notevoli difficoltà di costruzione.

Il tracciato delle condotte forzate si svolge, nella parte più alta e più ripida, sulle arenarie del Servino e del Ver-

rucano, e, nel tratto inferiore, sui depositi detritici e morrenici che coprono il basamento cristallino costituito da micascisti e gneiss minuti della serie degli scisti di Edolo.

Le altre opere in sotterraneo (tronchi inferiori delle condotte forzate, centrale, galleria di accesso e canale di scarico) sono situate in questa formazione.

La vasca di accumulazione, infine, è ubicata in un'area di sedimenti alluvionali ghiaiosi e ciottolosi, con intercalazioni di sabbia più o meno fini.

1.5. - Idrologia.

Il bacino imbrifero utilizzato dall'impianto di San Fiorano è di 68,2 km², così suddivisi:

— bacini imbriferi afferenti ai serbatoi superiori	31,2 km ²
— bacino imbrifero del torrente Adamè (allacciato al Lago d'Arno attraverso la centrale di Campellio)	22,5 km ²
— bacino imbrifero del Lago d'Arno	14,5 km ²
totale	68,2 km ²

I contributi medi unitari, dedotti da uno studio pubblicato su questa Rivista (¹), sono:

— inverno (novembre-aprile)	13,5 l/s km ²
— estate (maggio-ottobre)	78,4 l/s km ²
— anno	46,2 l/s km ²

Poichè lo svasso dei serbatoi avviene nel periodo invernale, i volumi utilizzabili sono di 84,7 hm³ in inverno e 12,8 hm³ in estate.

(¹) Direzione Costruzioni Impianti Idroelettrici del Gruppo Edison: *Elaborazione dei dati idrologici del bacino dell'Oglio a monte del Lago d'Iseo*. «L'E. E.» n. 5, 1953.

Il volume d'acqua sollevato dalle pompe in un anno, con l'ipotesi di una utilizzazione annua di 1 000 ore delle turbine accoppiate alle pompe, è di circa 81 hm³.

2. - LE OPERE.

2.1. - Serbatoio del Lago d'Arno.

Il Lago d'Arno fu trasformato in serbatoio artificiale negli anni a cavallo della prima guerra mondiale, mediante la costruzione al suo incile di una diga di ritenuta: il livello d'invaso fu portato così dalla quota 1 789,40 del lago naturale alla quota 1 816,90 e la sua capacità lorda aumentata da 19 a 38 hm³. Poichè la presa del canale di derivazione per la centrale di Isola si trova a quota 1 764,40 la capacità utilizzabile, prima della costruzione del nuovo impianto, era soltanto di circa 30 hm³: un modesto impianto di pompe, ormai in disuso da molti anni, permetteva di utilizzare anche un'altra piccola porzione dell'invaso naturale del lago, sollevando le acque, per pochi metri, fino all'imbocco del canale di Isola.

La diga è del tipo a gravità massiccia, in muratura di pietrame con malta di cemento; l'altezza massima sul punto più depresso delle fondazioni è di 40,40 m e lo sviluppo del coronamento è di 159 m. L'andamento planimetrico è leggermente arcuato (fig. 4).

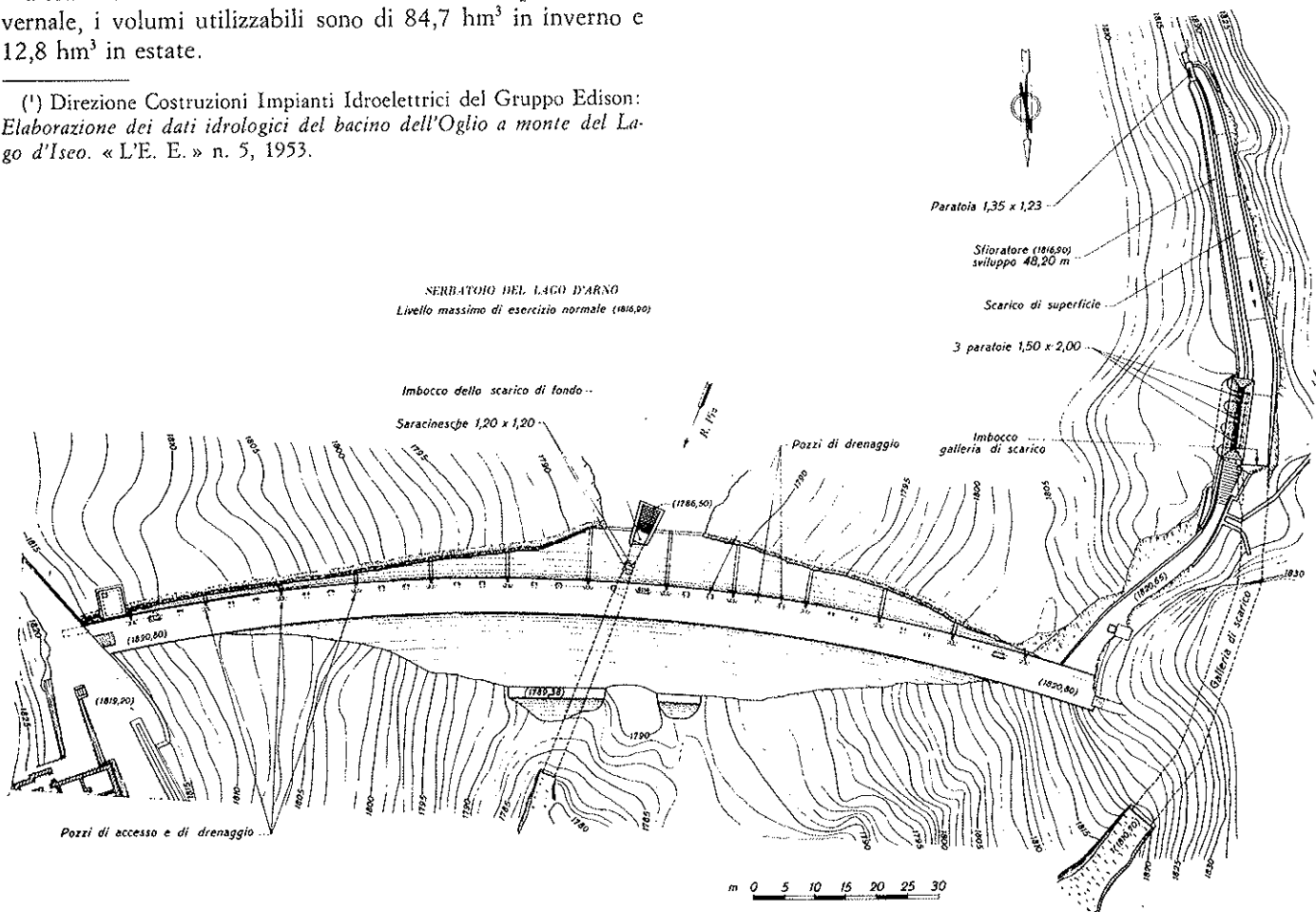


Fig. 4. - DIGA DEL LAGO D'ARNO. PLANIMETRIA. La diga, ultimata nel 1927, è del tipo a gravità massiccia in muratura di pietrame con malta di cemento; ha uno sviluppo del coronamento di 159 m ed una altezza massima di 40,40 m.

Questi spessori, piuttosto rilevanti, sono stati adottati per soddisfare le condizioni di stabilità della struttura risultante dalla sovrapposizione del nuovo paramento all'esistente corpo della diga, mettendo in conto le sottopressioni, a norma del vigente regolamento. La struttura originaria, invece, era stata calcolata senza tener conto delle sottopressioni, perchè si riteneva che queste fossero completamente eliminate dalla presenza del manto Lévy.

Il manto è armato con maglia quadra di tendi d'acciaio Ø 12 mm di 0,60 m di lato, e ancorato con barre di acciaio alla struttura retrostante, la cui superficie era stata opportunamente ravvivata prima del getto della nuova struttura. Il sistema di drenaggio è addossato a questa superficie ed è studiato in modo da evitare la formazione di pressioni tra la nuova e la vecchia struttura. Esso è costituito da tubi sub-orizzontali del diametro di 0,40 m, comunicanti alle estremità con pozzi verticali a sezione semicircolare con diametro di 1,20 m e interasse di 4,00 m che sboccano in un cunicolo di raccolta al piede del manto.

In occasione del rifacimento del paramento si è anche costruito un nuovo scarico di fondo; si è utilizzato a tale scopo l'esistente cunicolo di eduazione dei drenaggi, che attraversa il corpo della diga in corrispondenza della sezione di massima altezza. Il cunicolo è stato leggermente ampliato, rivestito in calcestruzzo e prolungato verso monte, fino a sboccare nel serbatoio. Lo scarico è munito di due saracinesche in serie, delle dimensioni di 1,20 m x 1,20 m, collocate in una camera di manovra, ricavata nel corpo diga, alla quale si accede attraverso un pozzo verticale: la portata massima è di 36,30 m³/s.

Poichè lo scarico di superficie esistente ha una portata di 68,40 m³/s, la portata massima che può essere smaltita dagli organi di scarico è complessivamente di 104,70 m³/s, corrispondente ad un contributo unitario di piena di 7,20 m³/s km² per il bacino imbriferò di 14,5 km² direttamente afferente al serbatoio.

Allo scopo di aumentare la capacità di regolazione, la soglia dell'opera di presa della nuova derivazione è stata posta a quota 1 744,00, cioè poco al disopra del fondo del lago naturale; è quindi possibile abbassare il livello d'invaso fino a quota 1 750,50, in condizioni di esercizio normale, e fino a quota 1 745,00 con alcune limitazioni alla portata massima derivata, realizzando un aumento complessivo della capacità utile di 6,6 hm³. Per lo svuotamento del lago, necessario per la costruzione della nuova presa, era stata installata una batteria di 10 pompe, aventi una portata totale di 2 m³/s, le quali immettevano le acque nella presa della vecchia derivazione.

La nuova presa ha una forma compatta (fig. 6), dovuta alle particolari modalità che si sono dovute seguire durante la costruzione. L'opera è situata infatti al piede di un pendio di materiale morenico e detritico, la cui stabilità avrebbe potuto essere compromessa dall'esecuzione di scavi di sbancamento di notevole entità. Perciò si è scavato, partendo dalla superficie del pendio, un pozzo del diametro di 17 m, profondo 13 m, le cui pareti sono state sostenute con centine metalliche e calcestruzzo spruzzato: l'opera di presa è stata costruita dentro il pozzo. Tra il ciglio di quest'ultimo ed il livello a cui il lago veniva normalmente mantenuto dalle pompe era disponibile una capacità sufficiente a contenere

eventuali piene di portata superiore a quella delle pompe. Dopo aver tombato i vani rimasti tra il terreno e la presa, in modo che questa facesse da sostegno alla scarpata sovrastante, si è demolita la parete del pozzo verso il lago, e si è eseguito lo scavo di un breve canale, con muri d'ala in calcestruzzo, per il collegamento col serbatoio.

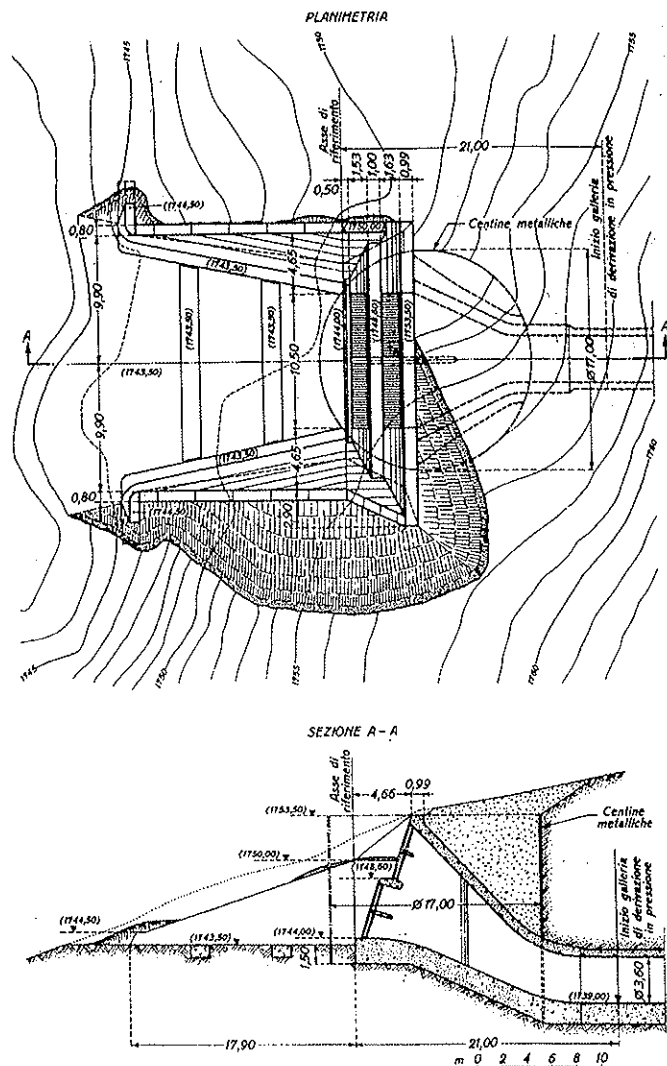


Fig. 6. - OPERE DI PRESA E DI RESTITUZIONE AL LAGO D'ARNO. La presa è situata sul fondo della conca naturale del lago, circa 20 m al disotto della presa dell'impianto di Isola. Si è così aumentata di 6,6 hm³ la capacità utile del serbatoio. Per ragioni di sicurezza, l'opera è stata costruita dentro un pozzo, la cui parete verso il lago è stata abbattuta a lavoro ultimato.

2.2. - Galleria di derivazione.

Circa 200 m a valle dell'opera di presa è situata la camera di manovra delle paratoie (fig. 7), alla quale si accede attraverso una galleria, lunga 625 m, il cui imbocco si trova a quota 1 723, sul versante destro della valle del rio Piz. Le paratoie sono piane a strisciamento con comando oleodinamico: una, delle dimensioni di 2,50 m x 3,25 m, intercetta la stessa galleria di derivazione: due, poste in serie, delle dimensioni di 0,70 m x 1,00 m ciascuna, mettono in comunicazione la galleria di derivazione con quella d'accesso; quest'ultima è munita, al disotto del piano di camminamento, di una ampia cunetta, dimensionata per una portata mas-

Le caratteristiche della roccia sono state determinate, oltre che con l'esame visivo e l'analisi petrografica, anche con misure geosismiche e con prove di deformabilità.

Le misure geosismiche sono state eseguite, a cura dell'ISMES (Istituto Sperimentale di Modelli e Strutture di Bergamo), in due fasi; la prima consisteva in misure speditive della velocità sismica, eseguite lungo tutta la galleria, con geofoni distanziati di 20 m; la seconda era costituita da misure di dettaglio, eseguite su 19 brevi tronchi di galleria, con ricevitori posti a distanza di $2 \div 5$ m aventi lo scopo di determinare gli spessori della roccia rilasciata per effetto dello scavo.

Le misure di deformabilità sono state eseguite, pure a cura dell'ISMES, mediante martinetti idraulici. Le postazioni sono state ubicate individuando alcune situazioni ti-

piche, le quali potevano avere valore di campione per tratti abbastanza lunghi della galleria.

I risultati dei diversi metodi di indagine sono stati confrontati e correlati tra loro, e si sono così ricavati i valori del modulo elastico della roccia da introdurre nelle verifiche di stabilità del rivestimento, che sono state eseguite tenendo conto della collaborazione degli anelli concentrici di roccia e di calcestruzzo.

I tipi di rivestimento adottati nei diversi tronchi di galleria sono indicati nella tabella I: come si noterà, per le zone in cui il modulo elastico della roccia può essere ritenuto superiore a $90\,000\text{ kg/cm}^2$, è stato sufficiente adottare il rivestimento in calcestruzzo semplice dello spessore di $0,30 \div 0,40$ m: per le zone con modulo elastico più basso si è adottato un rivestimento in calcestruzzo armato, o addirittura

TABELLA I.

Da progr. a progr.	Lunghez. tronco m	Press. max. eserc. kg/cm^2	Formazione rocciosa	Modulo elastico della roccia kg/cm^2	Tipo del rivestimento
0 \div 16,50	16,50	7,60	Morene e detriti di falda	—	Calcestruzzo armato (opera di presa)
16,50 \div 182,40	165,90	7,80	Arenarie del Servino	$0 \div 50\,000$	Calcestruzzo armato $s = 0,40$ m
182,40 \div 211,00	28,60	7,85	Arenarie del Servino e arenarie e puddinghe del Verrucano	—	Lamiera d'acciaio Φ , 3 600 mm = 14,60 m Lamiera d'acciaio raccordo = 14,00 m
211,00 \div 648,343	437,343	8,35	Arenarie e puddinghe del Verrucano	$100\,000 \div 150\,000$	Calcestruzzo semplice $s = 0,30$ m
648,343 \div 879,776	231,433	8,60	Arenarie e puddinghe del Verrucano e tonaliti e granodioriti dell'Adamello	—	Lamiera d'acciaio Φ , 3 600 mm
879,776 \div 2245,00	1365,224	10,15	Tonaliti e granodioriti dell'Adamello	$100\,000 \div 200\,000$	Calcestruzzo semplice $s = 0,30$ m
2245,00 \div 2295,00	50,00	10,20	Tonaliti e granodioriti dell'Adamello	—	Lamiera d'acciaio Φ , 3 025 mm
2295,00 \div 3130,00	835,00	11,25	Calcari saccaroidi metamorfici	100 000 100 000 50 000 50 000	Calcestruzzo semplice 40 m $s = 0,30$ m Calcestruzzo semplice 405 m $s = 0,40$ m Calcestruzzo armato 145 m $s = 0,40$ m Calcestruzzo armato 245 m $s = 0,50$ m
3130,00 \div 3244,10	114,10	11,35	Tonaliti e granodioriti dell'Adamello	100 000 50 000 $30\,000 \div 50\,000$	Calcestruzzo semplice 65 m $s = 0,40$ m Calcestruzzo armato 15 m $s = 0,40$ m Calcestruzzo armato 34,10 m $s = 0,50$ m
3244,10 \div 3347,90	103,80	11,50	Tonaliti e granodioriti dell'Adamello	—	Lamiera d'acciaio Φ , 3 000 mm
3347,90 \div 3425,00	77,10	11,75	Tonaliti e granodioriti dell'Adamello	90 000 70 000	Calcestruzzo semplice 60 m $s = 0,40$ m Calcestruzzo armato 17,10 m $s = 0,50$ m
3425,00 \div 3924,80	499,80	12,25	Arenarie del Servino	100 000 70 000 $50\,000 \div 70\,000$	Calcestruzzo semplice 64 m $s = 0,40$ m Calcestruzzo armato 21 m $s = 0,40$ m Calcestruzzo armato 414,80 m $s = 0,50$ m
3924,80 \div 3999,80	75,00	12,30	Arenarie del Servino	—	Lamiera d'acciaio Φ , 3 170 mm
3999,80 \div 4014,20	14,40	12,30	Arenarie del Servino	—	Lamiera d'acciaio raccordo
4014,20 \div 4023,40	9,20	12,30	Arenarie del Servino	—	Lamiera d'acciaio Φ , 3 600 mm
4023,40 \div 4077,625	54,225	12,30	Arenarie del Servino	—	Calcestruzzo precompresso (camera di alimentazione)

ra, dove non si poteva fare alcun affidamento sulla collaborazione della roccia, in lamiera d'acciaio. Le percentuali dei tre tipi di rivestimento, nello sviluppo totale della galleria, sono rispettivamente del 59,7%, 27,7% e 12,6%.

Il rivestimento metallico ha lo stesso diametro interno di quello in calcestruzzo soltanto nel tratto sottopassante il rio Piz, che si trova a cavallo di una delle due finestre di attacco della galleria. In tutti gli altri tronchi, invece, il rivestimento, già formato a tubo, è stato trasportato a piè d'opera dopo il getto del rivestimento in calcestruzzo; ciò ha costretto a ridurre il diametro interno della tubazione metallica a 3,17 m in un tratto e a 3,00 m negli altri.

Questa soluzione, che ha comportato un modesto aumento delle perdite di carico, è stata scelta perchè, tra tutte quelle possibili, richiedeva il minor tempo per il completamento della galleria, che era determinante agli effetti dell'entrata in esercizio dell'impianto.

Sono state eseguite, come di consueto, iniezioni di intasamento a bassa pressione tra la roccia ed il calcestruzzo e, nei soli tratti senza rivestimento metallico, iniezioni ad alta pressione per ottenere il risanamento della roccia ed una limitata precompressione del rivestimento in calcestruzzo.

Per questa seconda operazione, la galleria è stata prima suddivisa in tratte di circa 15 m, mediante l'esecuzione di raggi di iniezioni perpendicolari all'asse della galleria stessa: nelle singole tratte si sono eseguiti dei fori in varie direzioni, che sono stati iniettati a gruppi di 2 o 3 contemporaneamente, dopo essere stati accuratamente lavati con acqua in pressione.

2.3. - Pozzo piezometrico.

E' del tipo differenziale (fig. 8) con una canna verticale del diametro di 8,20 m, un tubo metallico interno alla canna, del diametro di 2,60 m, una camera di alimentazione del-

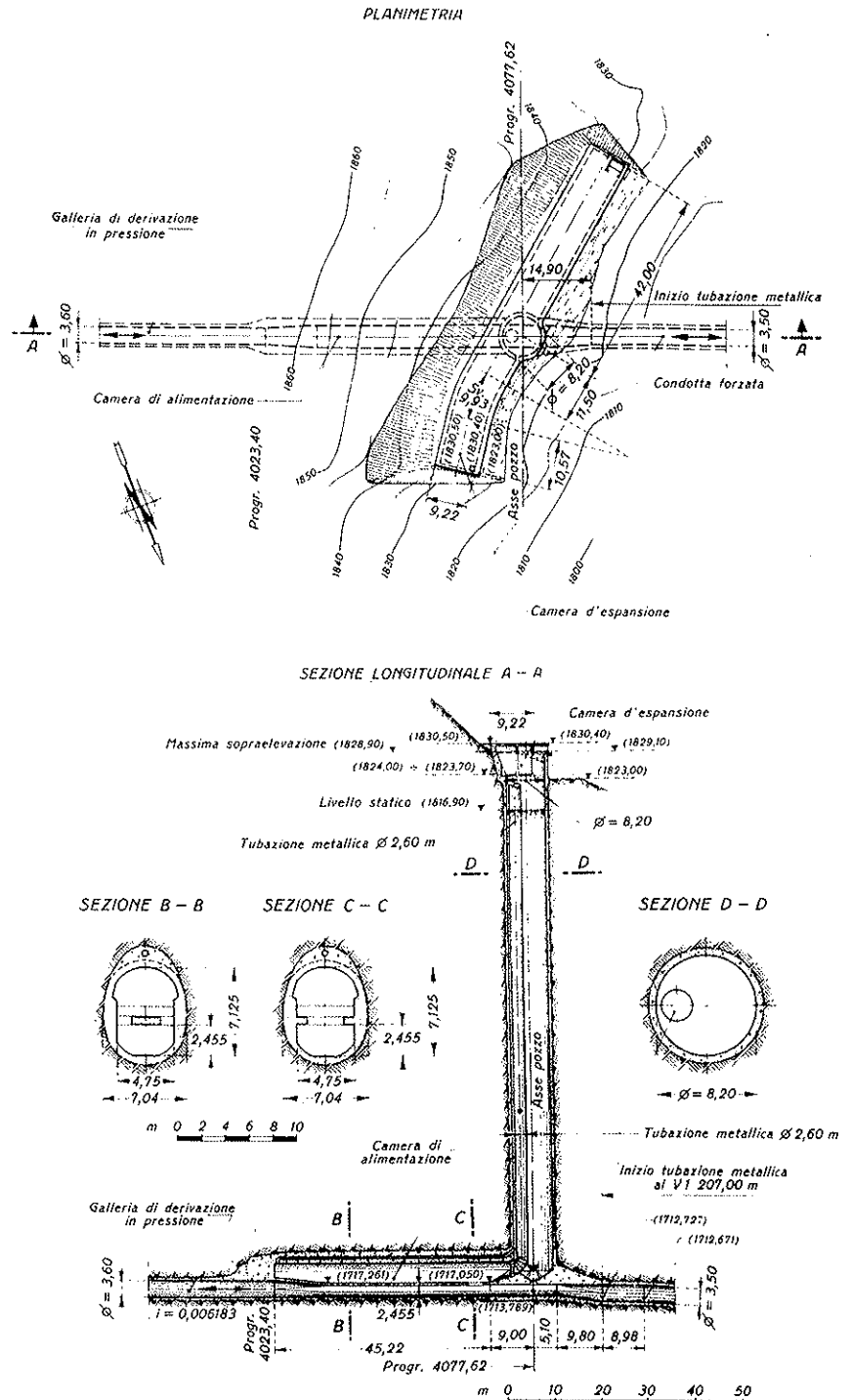


Fig. 8. - Pozzo PIEZOMETRICO. E' del tipo differenziale, con camera di alimentazione, della capacità di 720 m³, e vasca di espansione della capacità di 2270 m³: è dimensionato in modo da poter fronteggiare manovre ripetute di attacco e distacco totale del carico.

la capacità utile di 720 m³ ed una vasca di espansione della capacità di 2 270 m³.

Il tubo è collegato con la camera di alimentazione; la canna è munita alla base di una strozzatura, il cui coefficiente di perdita di carico $\left(K = \frac{\Delta b}{V^2/2g}\right)$ è stato determinato mediante prove su modello idraulico, eseguite presso l'Istituto di Idraulica dell'Università di Padova, ed è risultato pari a 0,0915, per il movimento dell'acqua verso l'alto, ed a 0,0488 per il movimento verso il basso.

Il pozzo è stato concepito in modo da realizzare lo smorzamento rapido delle oscillazioni prodotte dalle variazioni del carico e da consentire manovre, anche ripetute, di attacco e distacco totale del carico in generazione; nessun problema esiste invece per le manovre in pompaggio, essendo le portate in gioco relativamente modeste.

Il pozzo è situato in una formazione di arenarie del Servino molto fratturate: lo scavo ha quindi dovuto essere eseguito dall'alto; ciò ha determinato la scelta del diametro di 8,20 m che, oltre ad essere soddisfacente dal punto di vista idraulico, ha consentito l'impiego di wagon-drill per

la perforazione della roccia, di pale cariatrici per lo smarino e di benne da 3 m³ per il sollevamento del materiale di scavo.

Non potendo fare affidamento sulla collaborazione della roccia, si è previsto un rivestimento autoresistente. La soluzione in lamiera d'acciaio è stata scartata per il costo e, soprattutto, per il tempo di costruzione: si è invece scelto un rivestimento in calcestruzzo precompresso (fig. 9). La sollecitazione massima nel calcestruzzo all'atto della precompressione raggiunge i 130 kg/cm², con una sollecitazione di 11 400 kg/cm² nei cavi in acciaio armonico: con struttura in carico, a deformazioni lente avvenute, la sollecitazione nel calcestruzzo non scende mai al disotto dei 10 kg/cm².

Nella canna i cavi sono circolari in piani orizzontali, distanti 0,15 m in basso e 1,00 m in alto: nella camera di alimentazione e nel nodo di intersezione tra camera, canna e condotta forzata, invece, i cavi sono a forma di ferro di cavallo, in piani verticali.

Il setto in calcestruzzo tra la camera di alimentazione, o la canna, e la galleria di derivazione fa da contrasto all'azione esercitata dal tiro a cui sono sottoposti i cavi.

Il tubo del diametro di 2,60 m è in lamiera di acciaio saldata; esso è sostenuto da una struttura in calcestruzzo alla sua estremità inferiore, mentre le guide disposte lungo la canna gli consentono gli scorrimenti in senso verticale.

2.4. - Condotte forzate.

Dal pozzo piezometrico si diparte una tubazione del diametro di 3,50 m in galleria sub-orizzontale che dopo un percorso di 168 m si biforca in due tubazioni, ciascuna delle quali alimenta due gruppi nella centrale. Le condotte, protette a monte da valvole a farfalla del diametro di 2,30 m, hanno diametri di 2,30 - 2,15 - 2,05 - 1,95 m a partire dall'alto: i loro tracciati sono affiancati e paralleli dal vertice superiore fino al vertice V 10, a cominciare dal quale divergono per ritornare paralleli, e distanti 55,66 m, in corrispondenza del vertice V 11, dove entrano in galleria (fig. 10). Il tratto all'aperto presenta livellette aventi una pendenza minima del 29,3% e massima del 146,5%; il tratto in galleria ha una pendenza del 110% per la condotta n. 1 (in destra orografica) e del 104% per la condotta n. 2 (in sinistra orografica) (fig. 11).

Il distributore è costituito da una semplice biforcazione per la condotta n. 1 che alimenta i gruppi binari, e da una doppia biforcazione per la condotta n. 2 che alimenta i gruppi ternari.

La lunghezza delle due condotte dalla biforcazione superiore fino all'inizio del distributore, è di 2 198 m per la n. 1 (di cui 318 m in galleria) e di 2 189 m per la n. 2 (di cui 355 m in galleria).

Il tempo caratteristico $(\Sigma LV/gb)$ per l'intero sviluppo delle tubazioni dal pozzo piezometrico alle valvole di macchina, è di 1,14 s.

Il calcolo degli spessori delle tubazioni è stato fatto assumendo un coefficiente di sicurezza pari a 2,2 rispetto al carico di snervamento dell'acciaio; in corrispondenza dei pezzi speciali (curve, distributore, ecc.) il coefficiente è stato aumentato a 2,4. Questi coefficienti valgono anche per i tronchi di tubazione in galleria, che sono bloccati nel calcestruzzo: infatti, non si è voluto fare affidamento sulla collabo-

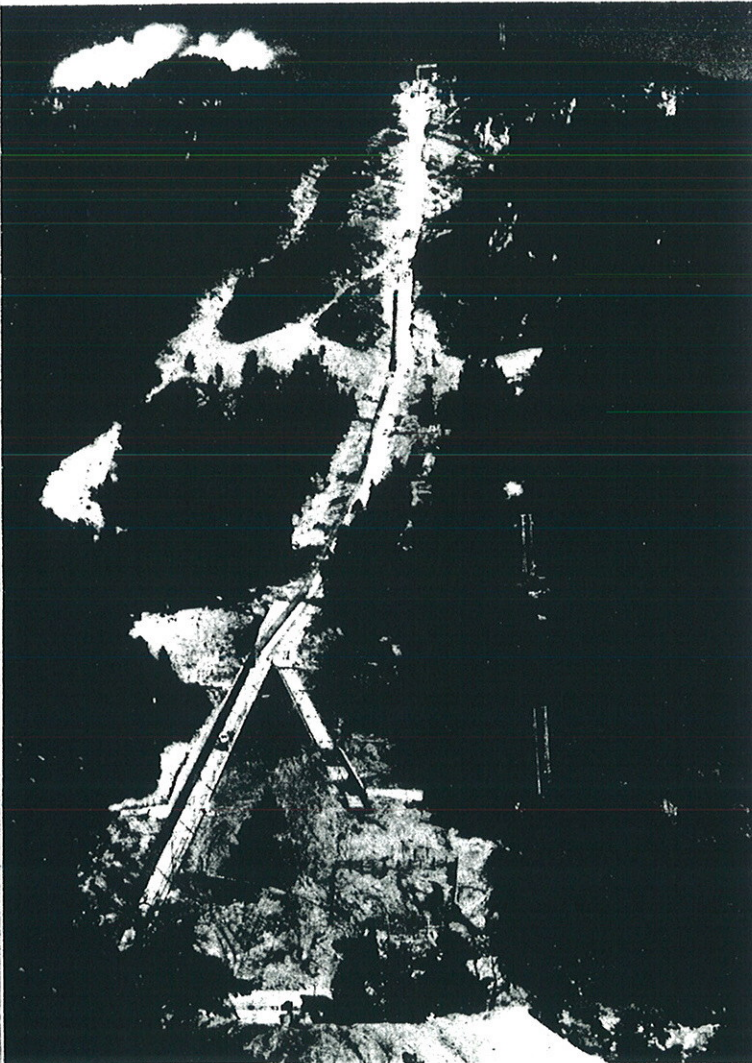


Fig. 10. - CONDOTTE FORZATE. Vista panoramica del tratto all'aperto delle condotte forzate. Il collegamento con la caverna della centrale avviene attraverso due gallerie inclinate distanti tra loro circa 56 m.

razione della roccia o per la modesta copertura, nella parte superiore delle condotte, o per la vicinanza della caverna della centrale, nella parte inferiore delle condotte.

I coefficienti di sicurezza sono stati riferiti alle condizioni più gravose di esercizio, e cioè alla massima pressione idrostatica, aumentata dalla sovrappressione di colpo d'ariete, che è pari al 10% della massima pressione idrostatica per la condotta n. 1 e al 18% per la condotta n. 2: le due sovrappressioni sono dovute rispettivamente al distacco delle turbine e a quello delle pompe.

Le tubazioni sono semplicemente saldate dal pozzo piezometrico fino ad una quota corrispondente ad una pressione massima di esercizio di 588,60 m. Per pressioni maggiori sono invece blindate con anelli riportati a caldo.

I distributori e le curve sono in lamiera saldata.

Le dimensioni della sezione di scavo del tronco in galleria inclinata consentono di accedere all'esterno della condotta durante il montaggio, per l'esecuzione ed i controlli delle saldature.

Le condotte, nel tratto all'aperto, sono ancorate a 13 blocchi, corrispondenti a 11 vertici: due blocchi, il n. 3 bis ed il n. 8 bis, hanno solo funzione di rompitratta.

Tra i blocchi n. 1 e n. 6, a partire dall'alto, la roccia è dovunque affiorante e perciò le fondazioni sono state ricavate a modesta profondità.

In un primo tempo si era previsto di fondare i blocchi a valle del V 6 sui depositi morenici che si presentano notevolmente compatti. I primi scavi eseguiti hanno però rilevato la presenza di lenti di limo argilloso che destavano qualche preoccupazione per la stabilità dei blocchi. Si è quindi deciso di spingere fino alla roccia anche le fondazioni di questi blocchi, eseguendo scavi profondi, in qualche caso, fino a 15 m. Soltanto il blocco n. 9, essendosi accertata con dei sondaggi l'assenza di lenti di limo, è fondato sui depositi morenici: per precauzione, però, si è ridotta al minimo la lunghezza di tubazione gravante su questo blocco installando il giunto di dilatazione del tratto di livelletta V 8 bis-V 9 all'estremità di valle della livelletta stessa anziché all'estremità di monte (fig. 12).

Questo provvedimento ha portato, naturalmente, ad un aumento del peso di tubazione gravante sul blocco n. 8 bis, che però, come si è detto, è fondato su roccia.

Per il montaggio delle tubazioni del tratto all'aperto è stato installato un piano inclinato: la portata massima del carrello è di 32,5 t ed il tiro massimo sulla fune è di circa 36 t.

La platea della sede è interamente rivestita con una soletta in calcestruzzo, armata con tondino di acciaio in corrispondenza del binario del piano inclinato. Il rivestimento è stato adottato per i seguenti motivi:

- garantire un efficace ancoraggio al binario, che può essere soggetto ad una forza frenante massima di circa 31 t, in caso di intervento dei freni automatici del carrello, susseguente a rottura della fune;
- aumentare la sicurezza durante il montaggio e l'esercizio della condotta, riducendo il pericolo di distacchi e cadute di pietre: a tale scopo sono state eseguite anche estese opere di consolidamento delle pareti laterali della sede e al di fuori della stessa, mediante muri in calcestruzzo, rivestimenti in calcestruzzo spruzzato, chiodature e tirantature della roccia, reti metalliche, ecc.

2.5. - Centrale.

2.5.1. - Scelta dell'ubicazione.

La centrale è in caverna e vi si accede per mezzo di una galleria sub-orizzontale lunga 660 m: la sua ubicazione è stata scelta col criterio di limitare la lunghezza del tratto delle condotte forzate in galleria, sia per ragioni idrauliche (colpo d'ariete e tempo caratteristico) che per ragioni economiche: l'asse longitudinale ha orientamento nord-sud (cioè parallelo all'andamento medio del corso dell'Oglio) in modo da risultare all'incirca perpendicolare ai piani di scistosità della roccia, che sono sub-verticali.

La quota della sala macchine è legata, ovviamente, a quella della restituzione, per la quale erano possibili due soluzioni:

1) restituzione nel canale di adduzione dell'impianto di Cedegolo-Cividate, con scarico nella vasca di accumulazione delle portate eccedenti quelle che possono essere recepite nel canale di Cividate;

2) restituzione nella vasca di accumulazione, e sollevamento mediante pompaggio al canale di Cividate delle portate che possono essere recepite da quest'ultimo.

E' stata scelta la prima soluzione per i seguenti motivi:

- i gruppi binari possono entrare in esercizio anche senza la vasca di accumulazione, la cui costruzione può essere dilazionata, in modo da farne coincidere il completamento con la messa in marcia dei gruppi ternari: si ha quindi una riduzione degli interessi passivi;
- la lunghezza dell'albero dei gruppi ternari, e quindi la profondità della fossa delle pompe, è la minima realizzabile, essendo praticamente costanti e coincidenti i livelli del pelo liquido allo scarico delle turbine ed alla aspirazione delle pompe. Con la seconda soluzione, la lunghezza dell'albero sarebbe stata superiore di circa 6 m corrispondenti all'oscillazione del livello di invaso nella vasca di accumulazione;
- la galleria di accesso alla centrale, il cui imbocco deve essere situato al disopra del livello della massima piena dell'Oglio, può essere realizzata con pendenza verso l'esterno, rendendo più agevole l'eduazione delle eventuali venute d'acqua durante lo scavo;
- anche il canale di scarico si trova al disopra dei livelli delle piene dell'Oglio, con eliminazione del pericolo di allagamento attraverso la finestra di attacco o, quanto meno, di infiltrazioni dell'acqua del fiume attraverso la roccia.

2.5.2. - Macchinario.

Nella sala macchine sono installati due gruppi binari turbina Pelton ed alternatore e due gruppi ternari pompa, turbina Pelton ed alternatore/motore, tutti ad asse verticale.

Le turbine dei gruppi binari sono munite ciascuna di una girante in acciaio inossidabile, a sbalzo, azionata da tre getti: la velocità di rotazione è di 500 giri/min. Le caratteristiche sono:

— salto netto	max 1 403,80 m	min 1 293,80 m
— portata	11,35 m ³ /s	10,98 m ³ /s
— potenza	140 000 kW	123 840 kW

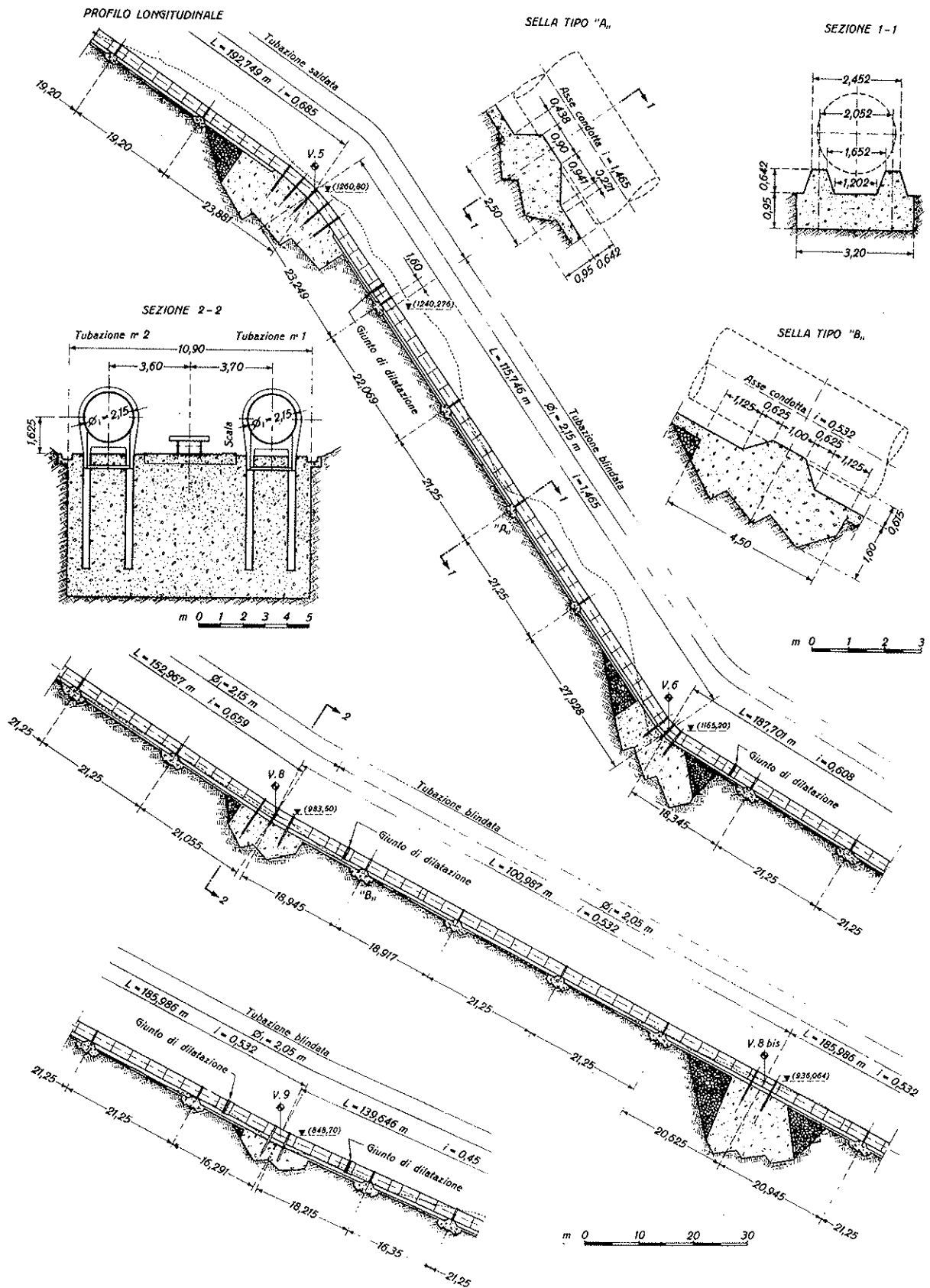


Fig. 12. - CONDOTTE FORZATE. PARTICOLARE DELLE SELLE E DEI BLOCCHI DI ANCORAGGIO. Il tronco superiore delle condotte, fino al vertice V 6 si svolge su pendii rocciosi, con pendenze delle livellette che raggiungono il 146,5%. Il tronco inferiore si svolge invece su depositi morrenici: a causa delle condizioni del terreno, le fondazioni di alcuni blocchi sono state spinte fino ad una profondità di 15 m.

Le turbine dei gruppi ternari hanno salto, portata e potenza eguali alle turbine dei gruppi binari; esse sono però azionate da quattro getti ed hanno una velocità di 600 giri/min.

Ogni turbina è collegata al distributore della condotta forzata tramite una valvola sferica a rotazione.

I regolatori delle turbine sono del tipo elettrico transistorizzato e possono essere asserviti a sistemi di teleregolazione, quale la regolazione frequenza-potenza, mediante l'applicazione di opportuni segnali esterni.

Le due pompe centrifughe hanno sei stadi, una valvola a farfalla sull'aspirazione e due valvole sferiche a rotazione sulla mandata (una di esercizio e l'altra di guardia). Le caratteristiche delle pompe sono:

— prevalenza manometrica	m	max 1 438,70	min 1 356,60
— portata	m ³ /s	6,91	6,25
— potenza	kW	106 120	101 100

Il battente minimo sull'aspirazione è di 28,40 m: il coefficiente σ della formula di Thoma è quindi 0,167.

Le pompe vengono accoppiate alle turbine a gruppo fermo, mediante giunti a corone dentate: la sequenza delle manovre di avviamento e di arresto, sia in generazione che in pompaggio, è indicata nella fig. 13.

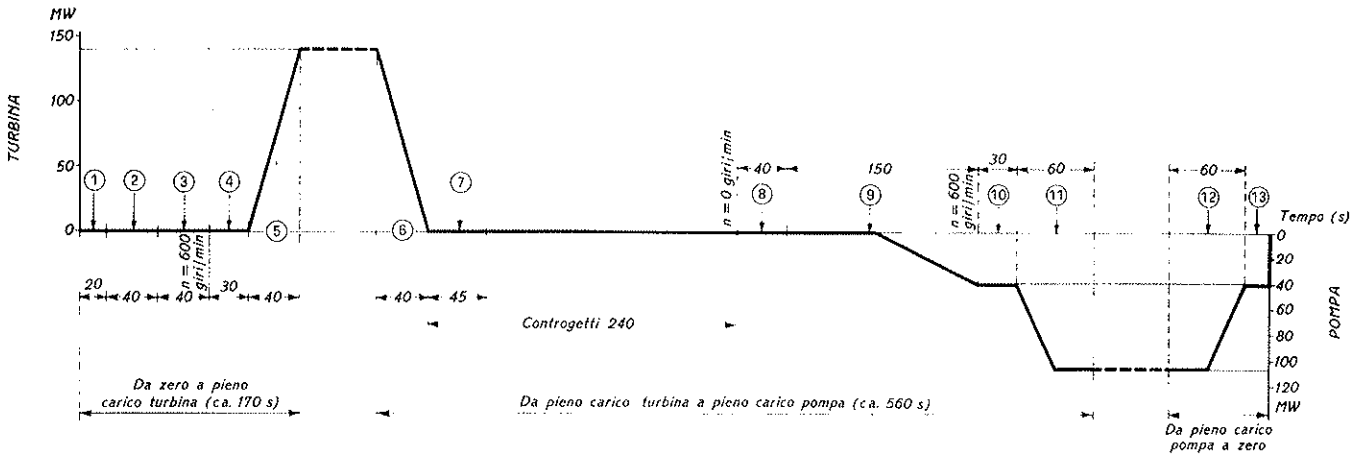


Fig. 13. - GRUPPO TERNARIO. Sequenza automatica delle fasi di funzionamento schematizzate in diagramma tempo/potenza rese o assorbite. 1) Apertura by-pass, riempimento spirale e apertura anello otturatore; 2) apertura corpo rotante valvola rotativa turbina; 3) spunto turbina e marcia a vuoto; 4) ricerca parallelo; 5) presa carico con programmatore di apertura; 6) chiusura spina con programmatore di apertura; 7) chiusura valvola rotativa turbina; 8) innesto giunto; 9) avviamento pompa mediante turbina con due spine; 10) ricerca parallelo; 11) apertura valvola rotativa di macchina; 12) chiusura valvola rotativa di macchina; 13) apertura interruttore di macchina.

L'arresto della turbina può avvenire anche con la frenatura elettrica, in alternativa a quella idraulica.

Gli alternatori dei gruppi binari hanno le seguenti caratteristiche:

— numero dei poli	12
— potenza nominale	155 000 kVA
— fattore di potenza nominale	0,9 in sovraeccitazione
— tensione nominale	17 kV
— rapporto di cortocircuito	1
— velocità nominale	500 giri/min
— velocità di fuga	850 giri/min
— PD ² delle masse rotanti	1 200 tm ²
— inerzia specifica	$5,3 \frac{Ws}{VA}$

Gli alternatori/motori dei gruppi ternari hanno potenza, tensione e fattore di potenza nominali, rapporto di cortocircuito ed inerzia specifica eguali agli alternatori dei gruppi binari, ma sono caratterizzati da:

— numero dei poli	10
— velocità nominale	600 giri/min
— velocità di fuga	1 020 giri/min
— velocità di fuga con senso invertito	755 giri/min
— PD ² delle masse rotanti	850 tm ²

L'albero dei gruppi ternari ha una lunghezza di 45 m ed è munito di 5 supporti di guida e 2 supporti combinati di guida e spinta.

Il gruppo ausiliario ha una potenza di 1 000 kW ed una tensione nominale di 380 V.

I trasformatori sono monofase con potenza unitaria di 103 000 kVA, e rapporto di trasformazione a vuoto: 17/17/420: $\sqrt{3}$ kV.

Il tipo monofase è stato scelto perchè può essere trasportato in centrale già montato, salvo gli accessori. Ci sono due terne di trasformatori più un'unità di riserva; ogni terna è connessa a due macchine sincrone attraverso interruttori da 6 000 A ad aria compressa; i condotti sbarre di macchina che realizzano la connessione sono del tipo a fasi segregate

con guaine di alluminio: lo schema unifilare è rappresentato nella fig. 14.

I trasformatori sono collegati alla stazione 380 kV annessa alla centrale mediante due terne di cavi ad olio fluido lunghe circa 665 m, ed un breve tratto di linea aerea a doppia terna.

I mezzi di sollevamento e trasporto delle parti del macchinario sono costituiti da:

- due gru a ponte accoppiabili, della portata di 125 t cadauna, per il montaggio dei trasformatori, degli alternatori, delle turbine, delle valvole e per il calaggio dei pezzi delle pompe sul piano di deposito a quota 372,00;
- una gru a ponte della portata di 100 t, per il montaggio delle pompe.

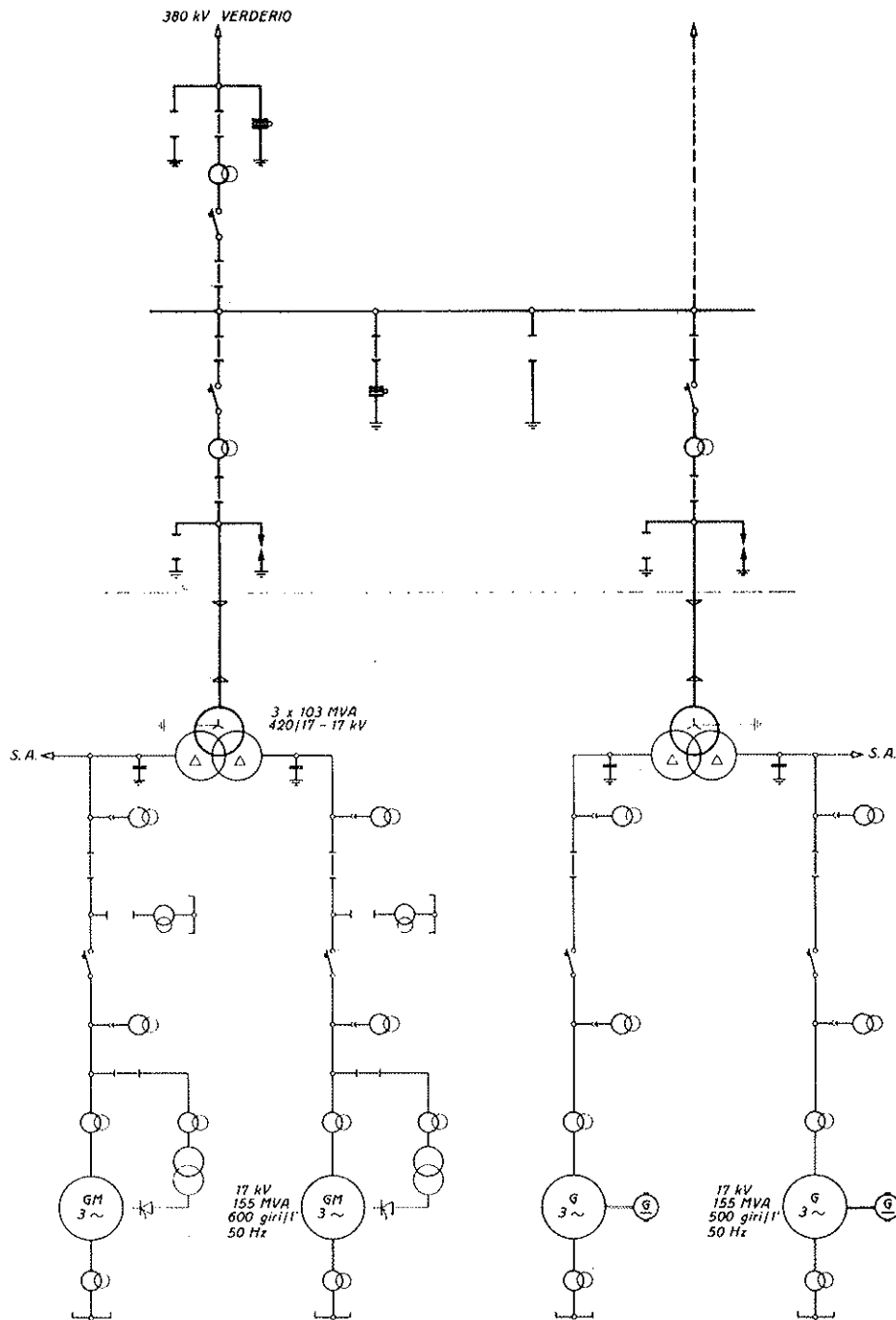


Fig. 14. - SCHEMA UNIFILARE. Ogni coppia di alternatori è collegata ad un banco di tre trasformatori monofase mediante sbarre del tipo a fasi segregate, con interposti interruttori ad aria compressa. Il collegamento dei trasformatori con la stazione di smistamento è realizzato con due terne di cavi in olio fluido, in galleria, e poi con due linee aeree ad una terna.

2.5.3. - Caverna dei gruppi.

La caverna è stata progettata tenendo conto dell'esperienza già acquisita dall'Enel nella realizzazione della centrale del Lago Delio ⁽²⁾ che, per alcuni aspetti, è simile a quella di San Fiorano: essa è divisa in due sezioni, una a nord e l'altra a sud dell'asse della galleria di accesso, nelle quali sono installati rispettivamente i gruppi binari e quelli ternari (figg. 15 e 16).

⁽²⁾ DOTT. ING. ENRICO MANTOVANI: *I concetti informativi del progetto dell'impianto idroelettrico con accumulo per pompaggio del Lago Delio* - « L'E. E. » n. 3, 1968.

Il piano generale della caverna al livello dell'ingresso è a quota 403,20 e corrisponde a quello della base degli alternatori: il piano delle turbine e delle valvole rotative è a quota 400,30. Per la sezione sud ci sono altri due piani principali, a quota 387,00 per i giunti di accoppiamento e a quota 372,00 per le pompe.

I piani sono collegati da scale e, per la sezione sud, anche da un ascensore.

L'altezza totale dello scavo è di 33,65 m per la sezione nord e 65,05 m per la sezione sud.

Tra la coppia dei gruppi ternari è situato un pozzo rettan-

golare, che permette di calare le parti delle pompe alla quota del piano di montaggio.

Il gruppo ausiliario è installato nella sezione nord: ogni sezione è dotata di pompe per l'aggottamento e per i servizi di raffreddamento e antincendi, e di una vasca di accumulo dell'acqua di refrigerazione dei gruppi.

In corrispondenza dell'ingresso nella sala macchine è disponibile un'area di circa 20 m x 15 m per il deposito dei pezzi delle macchine.

Le tubazioni ed i cavi sono raccolti, per la maggior parte, in un cunicolo che corre parallelo all'asse maggiore della caverna.

Sul lato ovest della caverna dietro i pilastri di sostegno della trave gru, sono ricavati dei locali per quadri, armadi, apparecchiature, ecc.

La volta è rivestita in calcestruzzo, mentre le pareti verticali sono sostenute da tiranti in acciaio. Lo spessore della volta, il numero, la posizione e la portata dei tiranti sono stati determinati con i criteri che si espongono qui di seguito.

Nella zona della caverna la roccia è caratterizzata dalla presenza di numerose discontinuità, nettamente configurate, dovute a fratture, scistosità e faglie: l'apertura della cavità provoca delle situazioni di instabilità dovute al dislocamento reciproco dei vari massi in cui la roccia risulta suddivisa.

Attraverso indagini condotte in situ ed in laboratorio, si sono determinate le caratteristiche geotecniche della roccia e l'orientamento dei sistemi di discontinuità: si sono quindi individuati i solidi di roccia suscettibili di staccarsi dall'ammasso per effetto dell'intersezione dei diversi piani di discontinuità. Infine, si sono calcolati lo spessore della volta e le caratteristiche dei tiranti necessari per impedire lo scivolamento di questi solidi: per la volta, lo spessore è risultato di 0,80 m in chiave e 1,40 m alle imposte. Per le pareti, si sono impiegati in totale 114 tiranti da 83 t, lunghi da 16 a 33 m (installati in prevalenza alle imposte della volta), 164 tiranti da 55 t, lunghi da 15 a 22 m, 84 tiranti da 27,5 t, lunghi 12 m, 49 tiranti da 15 ÷ 20 t, lunghi da 8 a 10 m, oltre ai consueti bulloni di roccia. La pressione media che essi esercitano è di 3,8 t/m² sulla parete ovest, di 2,4 t/m² sulla parete est e di 1,5 t/m² sulle testate.

I tiranti sono costituiti da tondini del diametro di 7 mm di acciaio ad alta resistenza, avente un limite di rottura di 170 kg/mm², posti in opera con una sollecitazione di circa 100 kg/mm².

Nella sezione sud della caverna, allo scopo di ridurre il numero dei tiranti, si sono impiegati anche due puntoni di calcestruzzo, delle dimensioni trasversali di 2,50 m x 4,63 m, gettati tra le due opposte pareti all'incirca a metà della loro altezza, prima di eseguire lo scavo della fossa delle pompe. I puntoni sono stati bloccati contro le pareti soltanto quando il piano generale di scavo ha raggiunto una profondità di circa 11 m sotto i puntoni stessi: in tal modo, si è consentita la deformazione elasto-plastica iniziale della roccia e si è ridotta la spinta sulle strutture di contrasto che, altrimenti, sarebbero state troppo sollecitate. I puntoni sono poi stati incorporati nelle strutture di sostegno dei gruppi ternari. Queste ultime sono solidali con il rivestimento in calcestruzzo delle pareti della fossa delle pompe, così da realizzare un complesso di notevole rigidità.

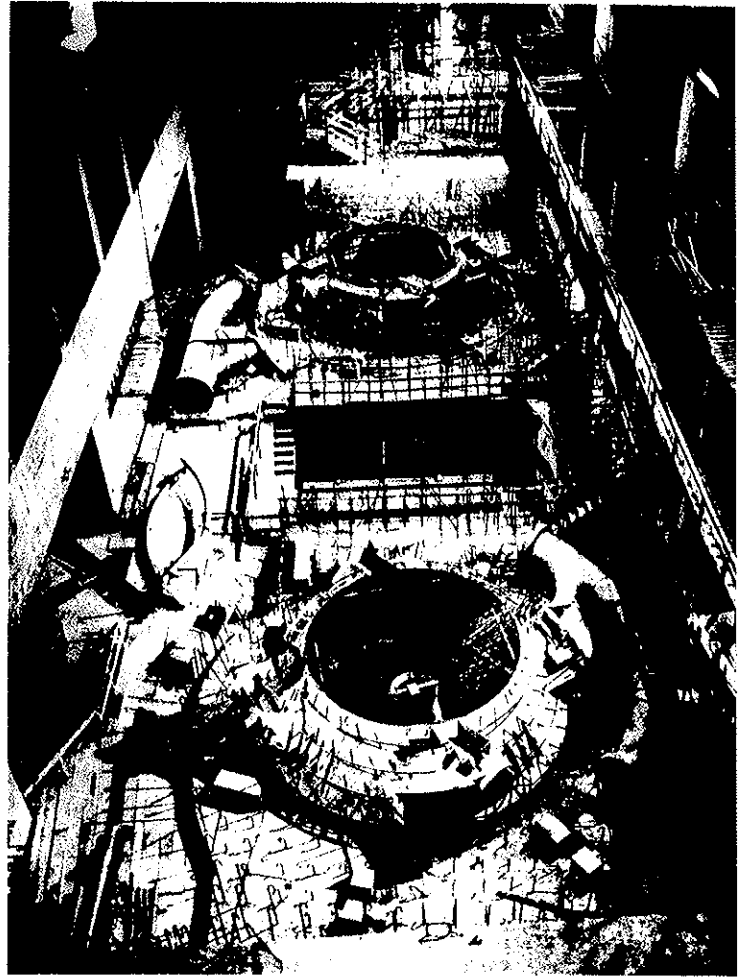


Fig. 15. - CENTRALE. SEZIONE SUD DELLA CAVERNA DEI GRUPPI TERNARI. Tra i due gruppi si nota l'imbocco del pozzo rettangolare che permette di calare le parti delle pompe al piano di montaggio. In secondo piano, in fase di montaggio, la spirale a quattro getti di una turbina. Sul lato ovest della caverna, a destra nella figura, dietro i pilastri di sostegno della trave gru, sono ricavati dei locali per quadri, armadi, apparecchiature, ecc.

Al disopra del piano degli alternatori le pareti sono rivestite in betoncino spruzzato, talvolta armato con rete metallica.

Da una fondazione continua in calcestruzzo, a quota 400,30 per la parete ovest e quota 403,20 per la parete est, spiccano i pilastri in cemento armato che sostengono le travi in acciaio sulle quali scorrono le gru principali. Controvolta e contropareti in pannelli metallici creano un'intercapedine che preserva la sala macchine da eventuali infiltrazioni d'acqua. Il necessario ricambio d'aria è garantito da batterie di ventilatori, i quali aspirano l'aria che giunge alla centrale attraverso la galleria di accesso e la espellono nel canale di scarico.

2.5.4. - Caverna dei trasformatori.

La caverna dei trasformatori è parallela a quella dei gruppi, dalla quale è separata da un diaframma di roccia, dello spessore di circa 20 m, che è stato consolidato per mezzo di tiranti passanti.

La caverna è divisa in due parti, collegate da un corridoio che interseca ad angolo retto la galleria di accesso: la parte

nord alloggia una terna di trasformatori e l'unità di riserva, quella sud la seconda terna.

2.5.5.- Galleria di accesso.

La galleria di accesso è lunga 660 m: ha una sezione policentrica, larga 5,20 m al piano viabile e alta 7,55 m. Forma e dimensioni della sezione (fig. 17) sono stati scelti con i seguenti criteri:

- ridurre al minimo l'impiego di armature di sostegno della roccia: quando queste fossero risultate indispensabili dovevano essere impiegate delle centine in profilati d'acciaio, eventualmente integrate con calcestruzzo spruzzato: ciò allo scopo di non subordinare l'esecuzione degli scavi a quella delle murature di rivestimento e di raggiungere, il più sollecitamente possibile, la zona degli scavi della centrale;
- consentire il passaggio del pezzo più ingombrante (spirale della pompa): le dimensioni che ne risultano permettono anche l'agevole incrocio dei mezzi di scavo e di trasporto del marino.

All'altezza delle imposte della calotta è stata posta in opera una soletta in calcestruzzo prefabbricata: nel vano al disopra della soletta corrono i sei cavi unipolari in olio fluido, i quali escono all'aperto attraverso un pozzo verticale, alto 20 m, situato a circa 50 m di distanza dall'imbocco della galleria: il pozzo sbocca in un piazzale, dal quale si dipartono due terne di linea aerea che raggiungono la stazione di smistamento e partenza linee sull'opposta sponda dell'Oglio.

Il collegamento tra la strada statale n. 42 e la galleria di accesso è realizzato per mezzo di un breve tronco stradale e di un ponte in calcestruzzo armato precompresso che scavalca il fiume Oglio con 4 campate della luce di 31 m ciascuna.

2.6. - Stazione di smistamento e di partenza linee.

La stazione è situata su un terrapieno della superficie di circa 18 000 m² (fig. 18): è realizzata con un unico sistema di sbarre e comprende i due montanti di collegamento alle terne provenienti dalla centrale e due montanti per linee in partenza: di queste, una costituisce il collegamento con la stazione di Verderio, mentre l'altra verrà costruita in futuro.

Gli interruttori installati sono del tipo ad aria compressa con 6 camere di interruzione in serie per ciascun polo e potere di interruzione di 16 GVA.

Tutto l'isolamento dell'apparecchiatura di stazione è coordinato per i seguenti valori:

- tenuta ad onde impulsive: 1 550 kV di cresta
- tenuta a 50 Hz per 1 min: 680 kV eff.

Nello stesso piazzale della stazione sono situati:

- il fabbricato comandi, dal quale è possibile telecomandare le manovre della centrale di San Fiorano e delle altre centrali Enel della Val Camonica;
- un trasformatore 130/15 kV, che consente di prelevare da una linea a 130 kV l'energia necessaria per l'alimentazione dei servizi della centrale, in caso di fuori servizio dei gruppi principali ed ausiliario.

2.7. - Canale di scarico e di aspirazione.

Il canale si sviluppa in galleria per una lunghezza complessiva di 623 m, con una sezione policentrica di circa 43 m², avente una larghezza in platea di 6,32 m ed un'altezza di 7,05 m; la pendenza del fondo è dello 0,5‰, salvo il tronco terminale che ha una pendenza dell'1‰; il franco tra il profilo liquido in regime permanente e la chiave è di 2,90 m, sufficiente ad evitare che il canale entri in pressione durante i transitori.

Durante il ciclo di generazione, il canale convoglia le portate turbinate in parte al canale derivatore dell'impianto Cedegolo-Cividate, ed in parte alla vasca di accumulazione.

Durante il pompaggio, i volumi immagazzinati nella vasca vengono sollevati al canale e da questo convogliati a gravità alle pompe dei gruppi ternari.

Non è previsto, nelle condizioni normali di esercizio, il prelevamento di portate per il pompaggio dal canale Cedegolo-Cividate.

La portata massima del canale Cedegolo-Cividate, che si svolge parte all'aperto e parte in galleria, è di 37 m³/s; di questi, circa 30 m³/s possono provenire, in certi periodi, dallo scarico delle due centrali di Cedegolo e dal bacino imbrifero afferente alla presa del canale. Si è quindi dovuto studiare un sistema di modulazione delle portate immesse dal canale di San Fiorano in quello di Cividate, atto ad evitare che in quest'ultimo si verificino inammissibili innalzamenti del pelo liquido durante il funzionamento delle turbine di San Fiorano, sia a regime che in transitorio.

Il problema, di notevole complessità, è stato risolto anche con l'ausilio di un modello idraulico, realizzato dall'Istituto di Costruzioni Idrauliche dell'Università di Bologna.

Le opere di modulazione e di scarico, tutte situate in prossimità dell'intersezione dei due canali, sono le seguenti (fig. 19):

- una paratoia piana a ruote con comando oleodinamico delle dimensioni di 4,50 m x 4,60 m, posta al termine del canale di scarico di San Fiorano;
- uno sfioratore laterale, con andamento planimetrico curvilineo, immediatamente a monte della paratoia: la soglia, che ha uno sviluppo di 85,60 m, si trova 0,34 m al disopra del livello massimo in moto uniforme del canale di Cividate;
- un collettore delle acque sfiorate: queste vengono convogliate, per mezzo di un condotto che sottopassa il fiume Oglio, alla vasca di accumulazione: nel caso che quest'ultima sia fuori esercizio, le portate possono essere scaricate nell'Oglio, attraverso una diramazione munita di dissipatore idraulico;
- un secondo condotto, parallelo al precedente, avente l'imbocco sul fondo del canale di scarico, e collegante quest'ultimo con la vasca di accumulazione attraverso la centrale ausiliaria, o anche direttamente, se quest'ultima è fuori esercizio.

Durante il funzionamento in generazione, una parte delle acque scaricate dalle turbine viene inviata alla vasca di ac-

Fig. 17. - GALLERIA DI ACCESSO. Ha una lunghezza di 660 m: in calotta, al disopra della soletta, corrono sei cavi unipolari in olio fluido, che, in prossimità dell'imbocco, escono all'aperto attraverso un pozzo verticale.

SEZIONE TIPO

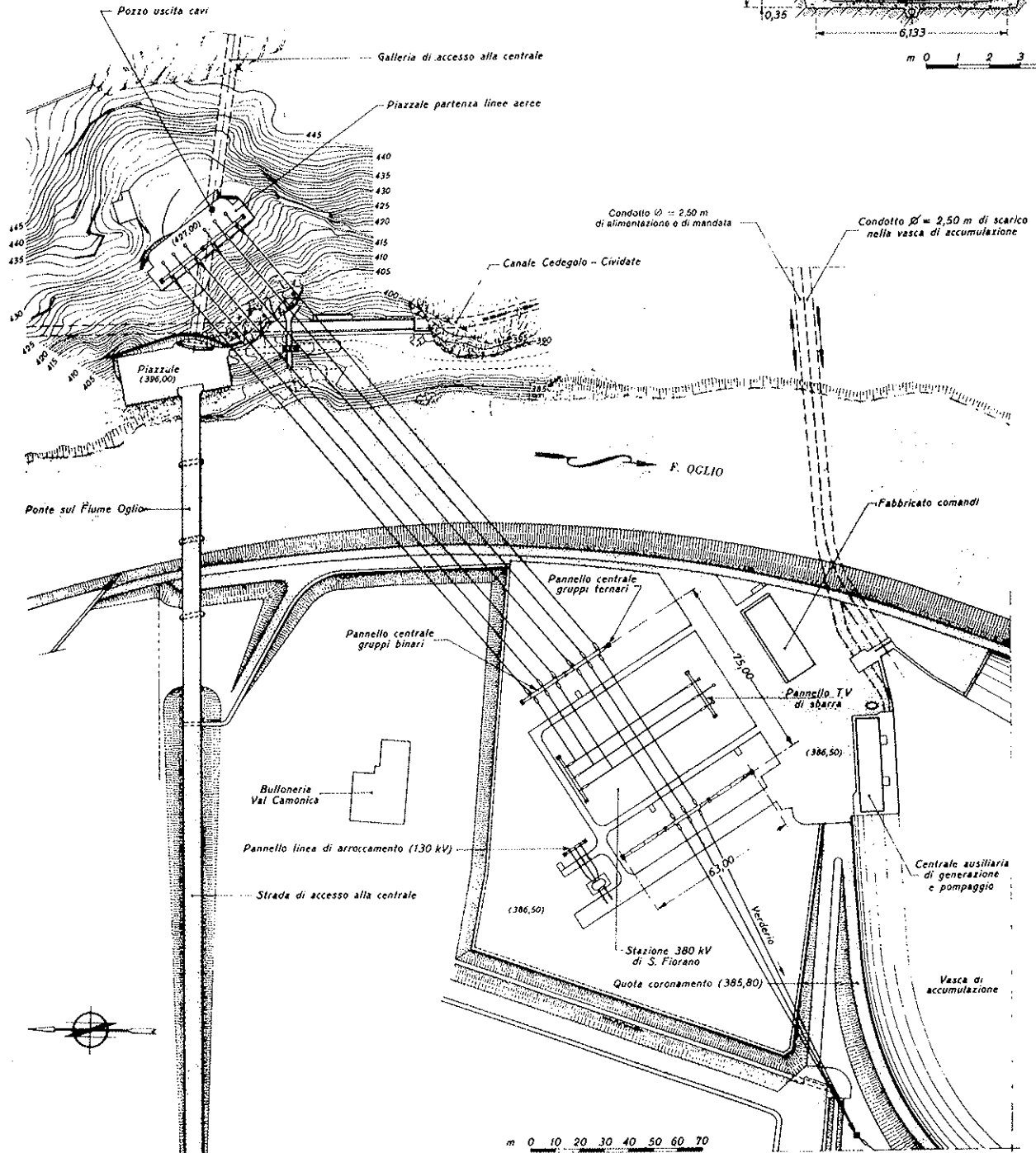
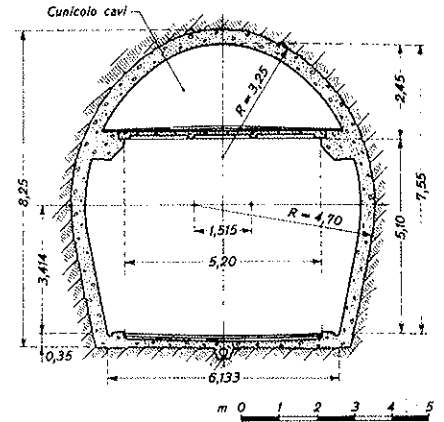


Fig. 18. - STAZIONE DI SMISTAMENTO E DI PARTENZA LINEE. Ha un unico sistema di sbarre, con due montanti di collegamento alle terne provenienti dalla centrale e due montanti per le linee in partenza; di queste, una raggiunge la stazione di Verderio e l'altra verrà realizzata in futuro.

cumulazione per mezzo di questo secondo condotto, in base al programma di invaso della vasca stessa. La portata residua viene regolata dalla paratoia a ruote, il cui grado di apertura è comandato da due galleggianti, uno a monte ed uno a valle della paratoia stessa: quello a monte controlla che il tirante nel canale di scarico di San Fiorano, si mantenga al livello del ciglio dello sfioratore laterale (allo scopo di consentire la decapitazione delle onde di traslazione, come si vedrà più avanti), mentre quello a valle controlla che il tirante nel canale di Cividate non superi il livello massimo consentito: il secondo comando prevale sul primo e può quindi provocare la tracimazione sullo sfioratore laterale delle portate non

utilizzate dalla centrale ausiliaria e dall'impianto di Cividate.

Durante i transitori, l'onda proveniente dalla centrale, giunta al termine del canale di scarico, si divide in due parti: una prosegue in linea retta lungo la finestra di accesso al canale, frangendosi sulla platea della finestra stessa che è in contropendenza; l'altra prosegue lungo il tratto in curva che precede l'intersezione con il canale di Cividate e viene decapitata dallo sfioratore laterale: la perturbazione che oltrepassa la paratoia è modesta e perfettamente tollerabile dal canale di Cividate.

Durante il pompaggio, infine, la paratoia resta chiusa:

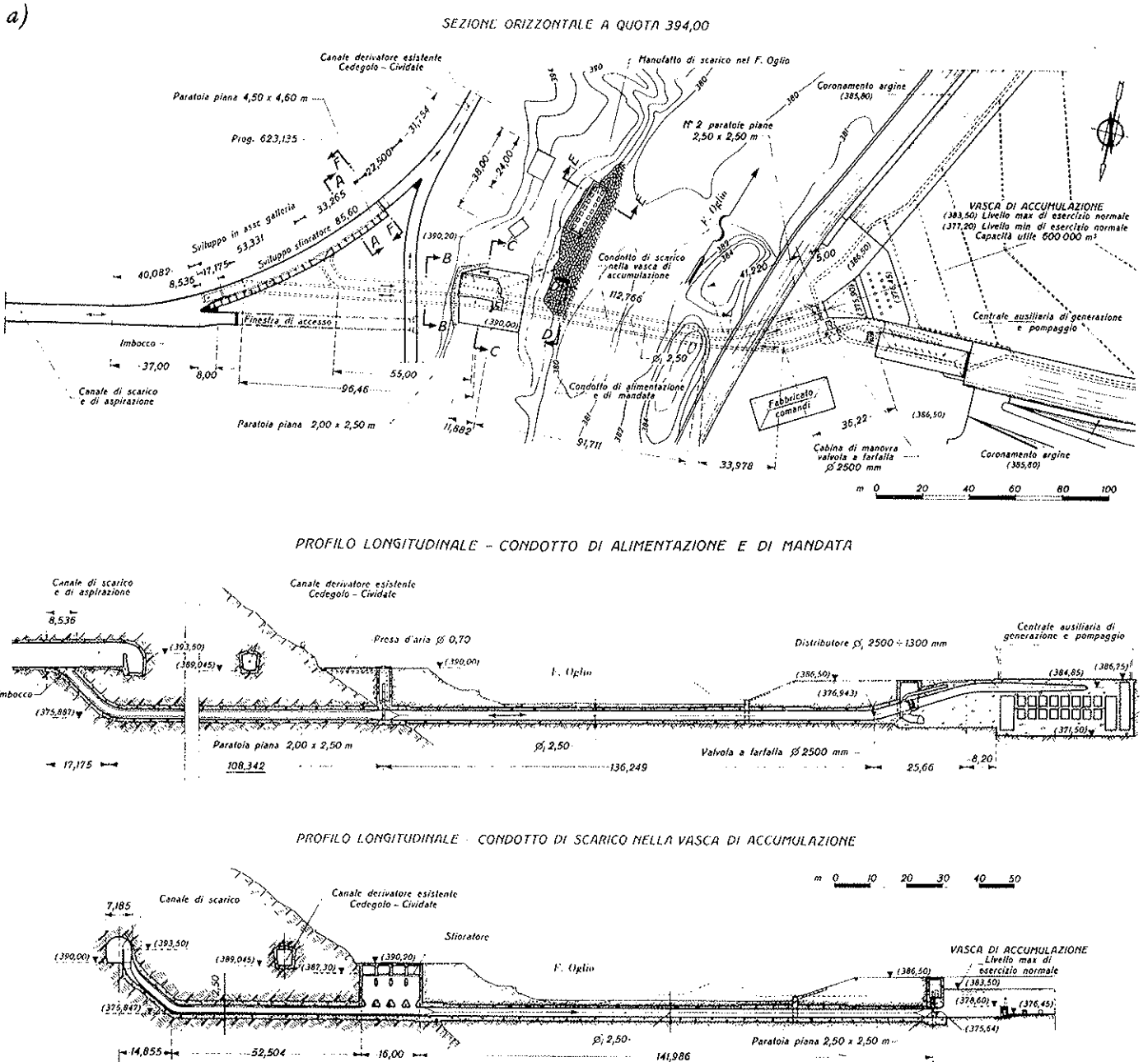


Fig. 19 a). - CANALE DI SCARICO E DI ASPIRAZIONE. E' lungo 623 m; sbocca nel canale di derivazione dell'impianto Cedegolo-Cividate e, attraverso due condotti che sottopassano il letto dell'Oglio, nella vasca di accumulazione. Due diramazioni dai condotti consentono la restituzione diretta nel fiume e l'alimentazione della centrale ausiliaria. All'estremità di valle del canale sono disposti una paratoia piana ed uno sfioratore laterale, che modulano le portate immesse nel canale di Cividate, in modo che il pelo liquido in quest'ultimo non superi il livello massimo consentito.

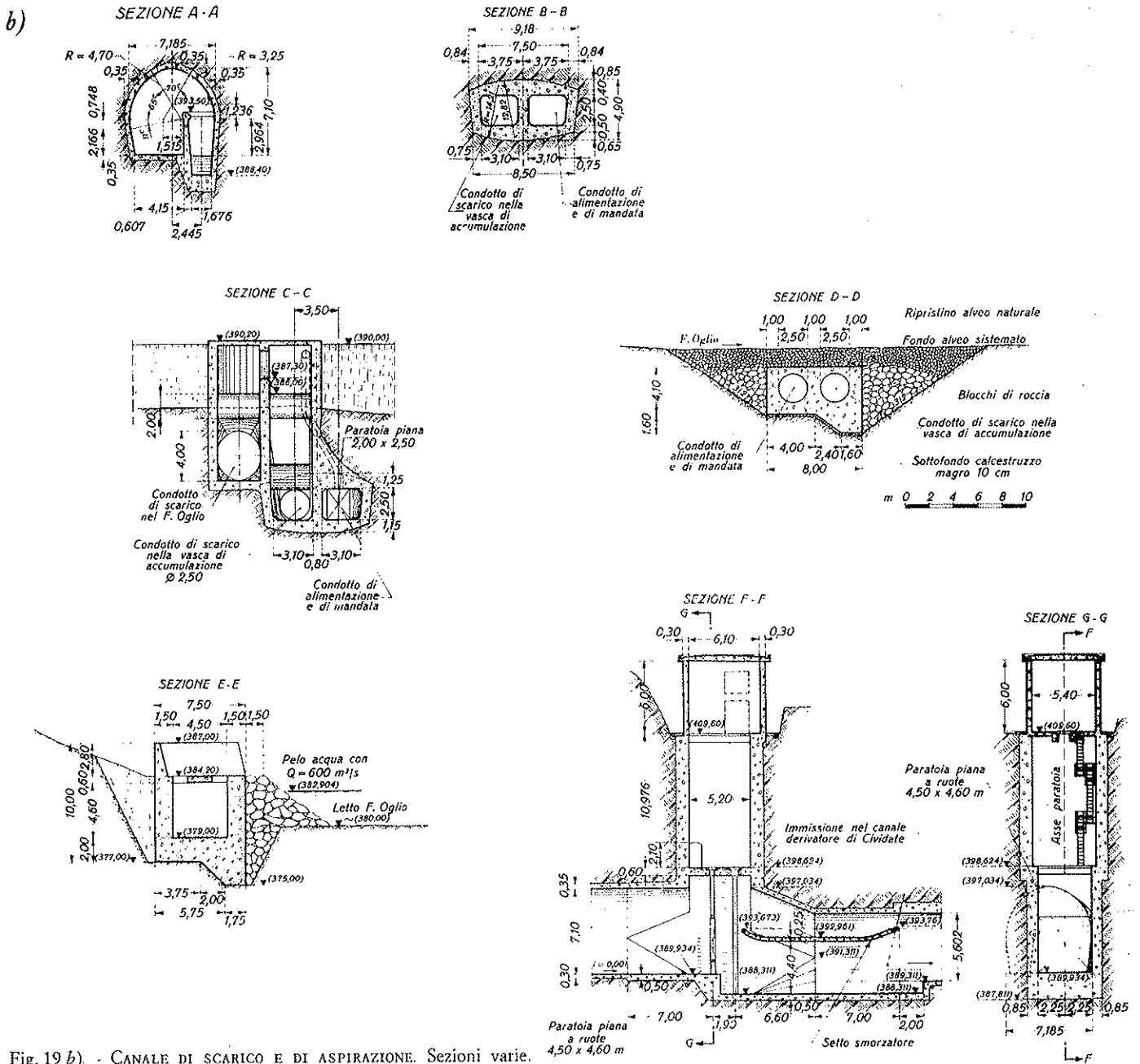


Fig. 19 b) - CANALE DI SCARICO E DI ASPIRAZIONE. Sezioni varie.

poichè la portata, in questo caso, è circa il 30% di quella massima del canale, e può quindi essere convogliata con tiranti d'acqua limitati, il volume che resta disponibile nel canale serve come capacità di compensazione dell'eventuale differenza tra la portata sollevata dalla centrale ausiliaria e quella utilizzata dalle pompe dei gruppi ternari.

In aggiunta ai dispositivi sopra descritti, sono state realizzate le seguenti opere sul canale di Cividate, nei tratti all'aperto più prossimi al tratto in galleria in cui avviene l'immissione del canale di scarico di San Fiorano:

- uno sfioratore laterale lungo 60,00 m, a valle dell'immissione, e modifica di uno sfioratore laterale e di una batteria di sifoni già esistenti, immediatamente a monte dell'immissione, allo scopo di eliminare eventuali sovralti del pelo liquido, derivanti da imperfetto funzionamento della paratoia posta al termine del canale di San Fiorano;

- uno sfioratore laterale, lungo 55,80 m, a monte della batteria di sifoni, avente lo scopo di decapitare le onde di traslazione dovute a prese di carico delle centrali di Cedegolo, effettuate quando il tirante d'acqua nel canale è già alto per effetto dell'immissione delle portate scaricate dalla centrale di San Fiorano.

2.8. - Centrale ausiliaria.

La centrale ausiliaria è ubicata in fregio alla vasca di accumulazione (fig. 20): vi sono installati otto gruppi reversibili ad asse verticale, con una potenza complessiva di circa 3 500 kW. Ogni gruppo è costituito da una pompa-turbina reversibile del tipo elico-centrifugo, a doppia velocità e a pale fisse, e da un motore-generatore del tipo asincrono, con doppio avvolgimento: il numero elevato dei gruppi è dovuto alla necessità di effettuare una regolazione delle portate, al-

meno a gradini, impiegando macchine semplici, relativamente poco costose e capaci di funzionare anche con modesti battenti sull'aspirazione, in modo da contenere la spesa per le opere civili.

In totale i gruppi possono utilizzare in generazione una portata di 21 m³/s, e sollevare in pompaggio una portata di 23 m³/s con la prevalenza minima e di 18 m³/s con la prevalenza massima, sempre superiore alla massima richiesta dalle pompe dei gruppi ternari: queste possono quindi essere alimentate anche se uno degli otto gruppi è in avaria.

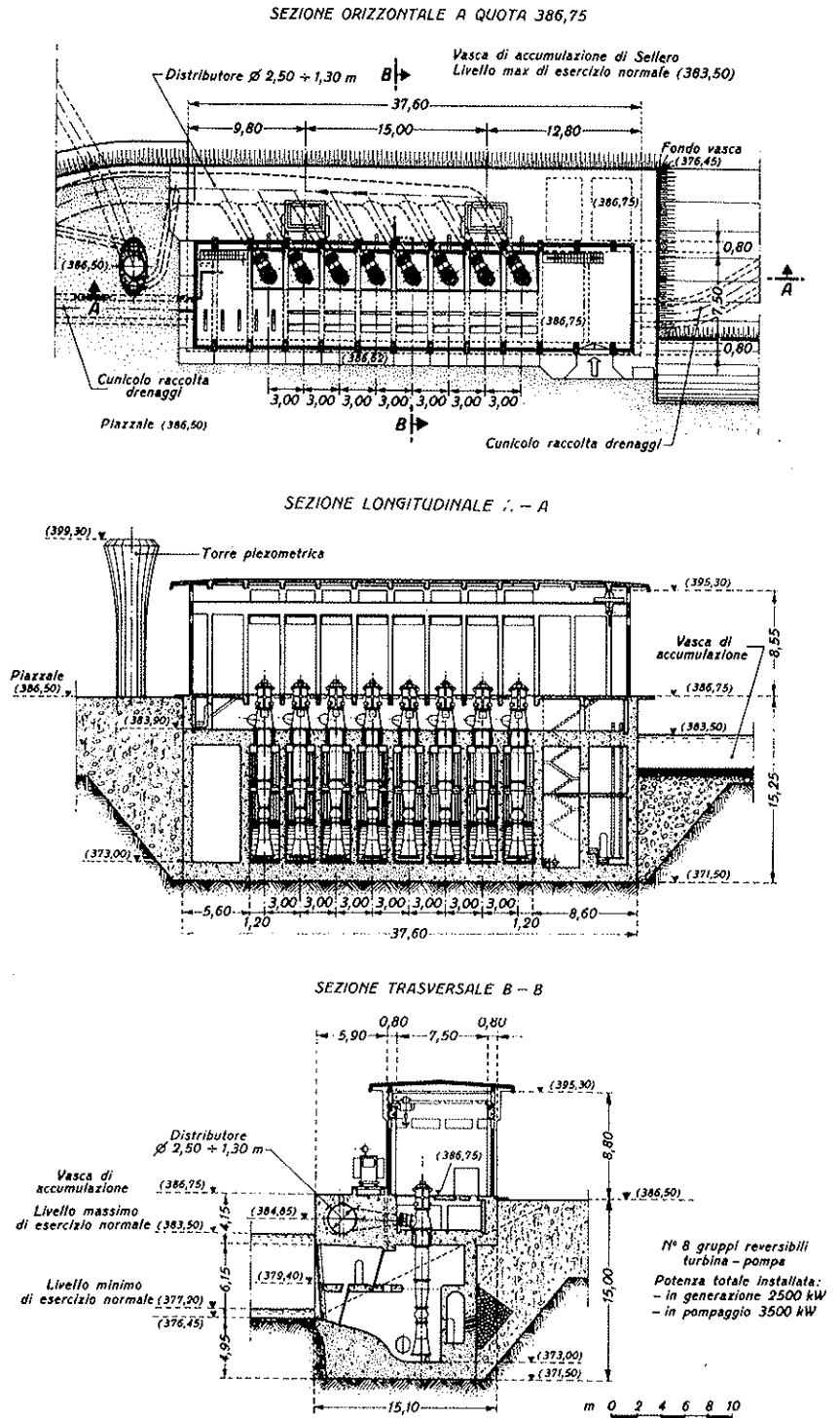


Fig. 20. - CENTRALE AUSILIARIA DI GENERAZIONE E DI POMPAGGIO. Sono installati otto gruppi binari reversibili. In generazione, i gruppi utilizzano, sul dislivello esistente tra il canale di scarico e la vasca di accumulazione, le portate che non vengono immesse nel canale di Cividate. In pompaggio, sollevano dalla vasca al canale di scarico e di aspirazione le portate destinate alle pompe della centrale di San Fiorano.

Le caratteristiche principali delle pompe-turbine sono:

	in pompaggio	in generazione
— velocità di rotazione	595	505 giri/min
— salto netto o prevalenza		
manometrica	max 17,40	16,30 m
	min 9,50	8,40 m
— portata	max 2,89	2,63 m ³ /s
	min 2,26	2,06 m ³ /s
— potenza massima	440	370 kW

Ogni macchina è munita di una valvola a farfalla di manovra.

I motori-generatori hanno una potenza di 500 kW ciascuno, e funzionano alla tensione di 3 kV: il sistema è collegato alle sbarre a 15 kV dei servizi ausiliari attraverso due trasformatori da 7 MVA.

Il condotto in pressione, del diametro di 2,50 m, tra il canale di scarico e la centrale ausiliaria termina con un collettore-distributore in lamiera d'acciaio; a monte del distributore è installata una valvola a farfalla di guardia del diametro di 2,50 m, la quale si chiude in caso di mancato intervento di una o più delle valvole di manovra o di scatto simultaneo dei gruppi.

In prossimità della centrale è situata una torre piezome-

trica in calcestruzzo leggermente armato, che contiene due tubi del diametro di 1,00 m ed un tubo centrale del diametro di 1,50 m.

I due tubi da 1,00 m sono collegati con il condotto in pressione, uno a monte e l'altro a valle della valvola di guardia mediante due tubazioni del diametro di 1,50 m: le oscillazioni del pelo liquido che in essi si verificano sono in concordanza di fase nei transitori che avvengono con il solo intervento delle valvole di manovra ed in opposizione di fase quando si effettua la chiusura della valvola di guardia.

Durante i moti oscillatori può avvenire sia lo scoprimiento dell'estremità inferiore dei due tubi, con immissione d'aria nel condotto, sia la tracimazione dell'estremità superiore, con restituzione delle portate sfiorate alla vasca di accumulazione, attraverso il terzo tubo contenuto nella torre piezometrica.

2.9. - Vasca di accumulazione.

2.9.1. - Caratteristiche principali.

In riva destra dell'Oglio, tra il fiume e la strada statale n. 42 esiste una vasta area pianeggiante, che si presta alla realizzazione di una vasca di accumulazione sia per la morfologia che per le caratteristiche geomeccaniche del terreno. L'area non è utilizzabile per intero, essendo in parte destinata allo sviluppo edilizio ed industriale del Comune di Sello: tuttavia, è possibile ricavare una vasca a pianta trapezia (fig. 21), con una larghezza media di 160 m ed una lunghezza media di 590 m. L'altezza dei rilevati che la delimitano è determinata dal volume dei materiali disponibili per la loro costruzione, che provengono per la maggior parte dagli scavi per la centrale, per la regolarizzazione del fondo della vasca e per la rettifica dell'alveo dell'Oglio. La capacità che ne risulta è di 600 000 m³, compresa tra le quote 383,50 e 377,20, corrispondenti rispettivamente ai livelli massimo e minimo di esercizio normale.

I lati est ed ovest della vasca sono costituiti dai rilevati in materiali sciolti, di cui si è detto sopra.

La testata nord è formata dal terrapieno del piazzale della stazione di smistamento e partenza linee, nel quale sono inseriti la centrale ausiliaria ed il manufatto che fa da sbocco ai due condotti provenienti dal canale di scarico. La testata sud, infine, è costituita da una traversa tracimabile in calcestruzzo nella quale sono ricavati gli scarichi per lo svuotamento della vasca.

Lo sviluppo complessivo del perimetro è di quasi 1 550 metri (fig. 22).

Il rilevato verso l'Oglio fa anche da argine al corso del fiume, che deve essere rettificato e sistemato per un tratto di circa 1 950 m, onde consentire la realizzazione della vasca. Questa è resa impermeabile da un rivestimento in conglomerato bituminoso che copre il fondo ed i paramenti interni del rilevato in materiali sciolti.

2.9.2. - Funzionamento.

Come si è detto, l'energia prodotta dall'impianto di San Fiorano è dovuta, in parte, a deflussi naturali, concentrati prevalentemente nel semestre invernale per effetto della regolazione dei serbatoi, ed in parte al volume utilizzato nel ciclo giornaliero di generazione e pompaggio, che è di circa 300 000 m³.

Pertanto, metà della capacità della vasca è impegnata per l'accumulo, nelle ore di punta, del volume d'acqua che deve essere rimandato al Lago d'Arno durante la notte. L'altra metà serve per contenere quella parte dei deflussi naturali che il canale Cedegolo-Cividate non è in grado di ricevere: infatti, come si è già detto nel par. 2.7., in questo canale confluiscono, in certi periodi, portate superiori alla massima che può convogliare; ciò avviene, di norma, nella stagione invernale, per circa otto ore al giorno.

Lo svuotamento della vasca avviene nei periodi di basso o medio carico, per mezzo della centrale ausiliaria, la quale nelle ore notturne alimenta le pompe dei gruppi ternari, mentre nelle ore intermedie restituisce le acque al canale Cedegolo-Cividate. Naturalmente, in relazione alle esigenze dell'esercizio, è possibile utilizzare anche più di 300 000 m³ per il ciclo di generazione e di pompaggio: in questo caso, la capacità della vasca può essere insufficiente per contenere tutte le portate eccedenti la portata massima del canale Cedegolo-Cividate: si hanno quindi degli sfioramenti che peraltro, essendo il salto dell'impianto di Cividate di soli 130 m, si traducono in perdite di energia relativamente modeste.

2.9.3. - Rilevati in materiale sciolto.

I due lati maggiori della vasca sono costituiti da un rilevato in materiale sciolto, avente entrambi i paramenti con pendenza di 1:2 ed un'altezza massima di circa 10 m misurata rispetto al fondo della vasca: la cubatura totale è di 270 000 m³. La scelta del tipo di rilevato è stata determinata dalla disponibilità del materiale proveniente dagli scavi della centrale e delle opere annesse (gallerie delle condotte forzate, gallerie di scarico e di accesso), e da quelli per la regolarizzazione del fondo della vasca e la sistemazione dell'alveo del fiume Oglio.

Sia il marino di galleria che il materiale alluvionale ottenuto dagli scavi all'aperto sono costituiti per circa il 60% da elementi con pezzatura compresa tra 2 e 60 mm e, per il resto, in parti poco diverse tra loro, da elementi di dimensioni minori (tipo sabbia) e maggiori (tipo ciottoli).

I valori ottimi del peso di volume secco e del grado di umidità, ottenuti nelle prove di costipamento eseguite in laboratorio, sono stati rispettivamente di circa 2 200 kg/m³ e del 6%; alla posa in opera si sono realizzate densità anche superiori. Poichè la permeabilità del rilevato è relativamente elevata ($K = \text{circa } 10^{-4} \text{ cm/s}$) i paramenti verso la vasca sono protetti da un rivestimento impermeabile, di cui si parlerà nel par. 2.9.5.

I paramenti esterni, invece, sono coperti da un manto erboso: la parte inferiore della scarpata verso l'Oglio, che può essere investita dalle acque del fiume in caso di piena, è protetta da un manto in gabbioni e da un taglione in calcestruzzo, spinto ad una profondità di circa 4 m sotto l'alveo.

Le verifiche di stabilità sono state eseguite, sia per i paramenti verso la vasca che per quelli esterni, adottando valori cautelativi delle caratteristiche geotecniche del materiale: in particolare, si è supposto che il materiale abbia una permeabilità molto bassa e che, pertanto, la zona inferiore del rilevato verso l'Oglio rimanga satura anche dopo l'esaurimento dell'onda di piena del fiume. Le verifiche hanno dimostrato che il coefficiente di sicurezza è sempre nettamente superiore al valore minimo richiesto dal vigente Regolamento.

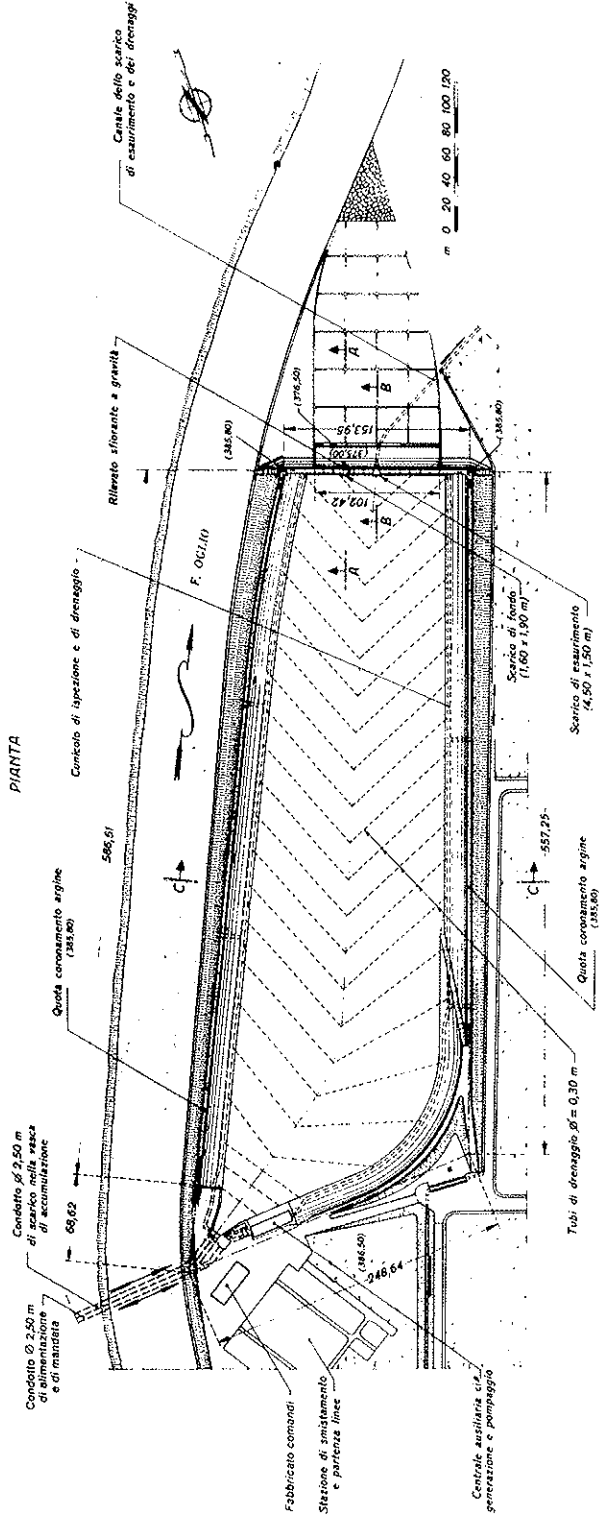


Fig. 21. - VASCA DI ACCUMULAZIONE. Ha una capacità di 600 000 m³; i rilevati, dell'altezza di circa 10 m, sono costruiti con i materiali di risulta degli scavi per la centrale e di quelli all'aperto: il manto impermeabile è in conglomerato bituminoso, dello spessore di 8 cm, ed è posato su uno strato drenante, con un sistema di raccolta sul fondo della vasca, costituito da tubi e cunicoli. Alla testata sud, vi è una traversa trascinabile in calcestruzzo, nella quale sono incorporati gli scarichi di fondo e di esaurimento.

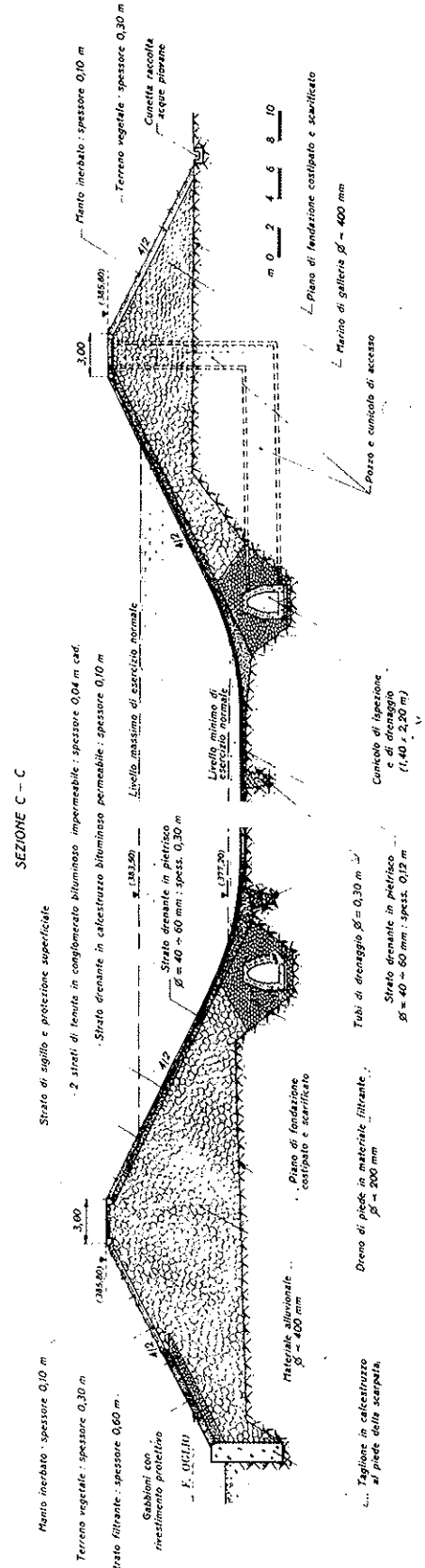
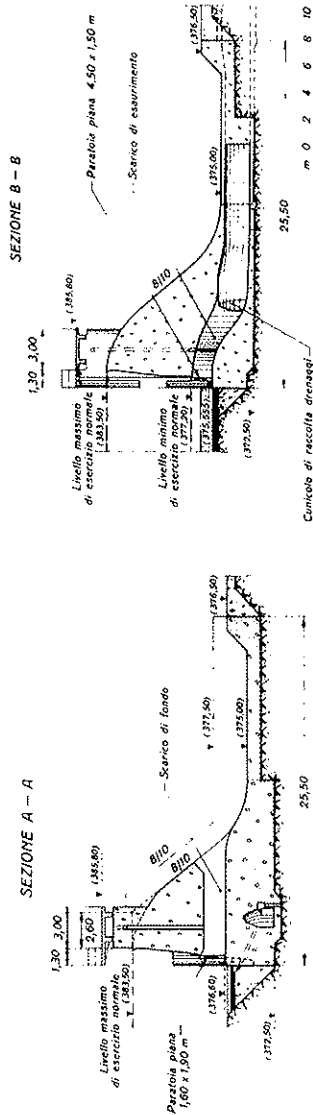




Fig. 22. - VASCA DI ACCUMULAZIONE. Vista panoramica dell'area della vasca; in primo piano, la traversa tracimabile in calcestruzzo nella quale sono ricavati gli scarichi profondi. Il rilevato verso Oglio, a destra della figura, fa anche da argine al corso del fiume che è stato rettificato e sistemato. In secondo piano sono visibili il ponte di accesso alla caverna della centrale, il piazzale dal quale partono le due terne di linea aerea, la stazione di smistamento e partenza linee, il fabbricato comandi e la centrale ausiliaria.

2.9.4. - Traversa tracimabile.

Come si è detto nel par. 2.9.2., in certe condizioni di esercizio, possono essere convogliati alla vasca di accumulazione volumi d'acqua superiori alla sua capacità. Questi volumi potrebbero essere intercettati e restituiti direttamente all'Oglio, chiudendo la centrale ausiliaria e le paratoie poste sui due condotti che collegano il canale di scarico e di aspirazione con la vasca.

Ciò comporterebbe, però, la perdita dell'energia producibile dalla centrale ausiliaria: pertanto si è previsto che, di norma, vengano immessi nella vasca anche i volumi eccedenti la sua capacità, per restituirli poi al fiume attraverso un apposito organo di scarico. Tale organo è realizzato da una traversa tracimabile a gravità, in calcestruzzo, costituente il lato meridionale della vasca: la sua lunghezza è di 153,95 m, l'altezza massima sul punto più basso delle fondazioni è di 13,30 m. La maggior parte del coronamento, per una lunghezza di 92,82 m, è tracimabile, con vasca dissipatrice al piede: l'inclinazione dei paramenti è di 0,1 a monte e 0,8 a valle: la cubatura dell'opera, compresa la vasca dissipatrice, è di 27 000 m³

Con un innalzamento del pelo liquido di 0,40 m sopra il livello di massimo esercizio normale è possibile scaricare una portata pari alla massima erogata dalla centrale di San Fiora-

no. Il corpo della traversa è suddiviso in conci, mediante giunti intervallati di 14,63 m, muniti dei consueti dispositivi di tenuta e di drenaggio.

Nella traversa sono ricavati anche due condotti che servono da organi di scarico di profondità, e precisamente:

- uno scarico di fondo, chiuso a monte da una paratoia piana a strisciamento delle dimensioni di 1,60 m x 1,90 m: esso consente di svuotare la vasca in circa 30 ore, con una portata massima di 20 m³/s;
- uno scarico di esaurimento, avente la soglia circa un metro più bassa di quella dello scarico di fondo: la paratoia di chiusura ha le dimensioni di 4,50 m x 1,50 m e viene aperta alla fine dello svuotamento della vasca, per consentire l'esaurimento del volume residuo e, se necessario, lo spurgo delle acque di lavaggio per l'asportazione degli eventuali materiali depositati sul fondo.

2.9.5. - Dispositivi di impermeabilizzazione e di drenaggio.

Le sponde ed il fondo della vasca sono rivestiti con un manto in conglomerato bituminoso: tra le varie alternative prese in esame questa è la meno costosa, e possiede entrambi i requisiti richiesti per un rivestimento di questo genere: l'impermeabilità e l'attitudine a sopportare senza deteriorarsi le rapide e frequenti variazioni del livello di invaso.

Il manto è in due strati, dello spessore di 4 cm ciascuno: la dimensione massima degli inerti è di 8 ÷ 15 mm.

Al disotto del rivestimento bituminoso è disposto un sistema di drenaggio, che ha i seguenti scopi:

- raccogliere le eventuali perdite del manto impermeabile e consentire di individuare da quale zona esse provengono;
- evitare la formazione di sottopressioni, dovute sia alle perdite che alla falda freatica. Il livello di quest'ultima, rilevato a mezzo di piezometri a cominciare dal 1969, si è sempre mantenuto al disotto del fondo della vasca: tuttavia, il drenaggio è stato dimensionato tenendo presente la possibilità di un sensibile innalzamento della falda per effetto di piene dell'Oglio di eccezionale entità.

I dispositivi adottati sono i seguenti:

- un drenaggio continuo, formato da uno strato di conglomerato bituminoso « aperto » dello spessore di 10 cm, posato su uno strato di pietrisco con pezzatura compresa tra i 60 e i 40 mm trattato a semipenetrazione con bitume; lo spessore di questo strato è di 30 cm sulle sponde e 12 cm sul fondo;
- un sistema di raccolta delle acque drenate, così costituito: sul fondo della vasca al disotto dello strato di pietrisco sono disposti, entro piccole trincee riempite di ghiaia, dei tubi forati in calcestruzzo del diametro interno di 30 cm: essi sono messi a spina di pesce, con pendenza verso i lati più lunghi della vasca, e sboccano in un cunicolo che corre lungo tutto il perimetro, al disotto del piede di monte dei rilevati e nella parte inferiore della traversa in calcestruzzo. Il terreno intorno al cunicolo è stato sostituito con materiale filtrante, in modo che esso possa raccogliere, oltre alle acque convogliate

dai tubi, anche le filtrazioni provenienti dai rilevati e dal terreno di fondazione. Le dimensioni del cunicolo (1,40 m x 2,20 m) sono dettate da esigenze di ispezionabilità (esso è infatti accessibile dal coronamento dei rilevati attraverso pozzi verticali): la portata che filtra dallo Oglio durante la massima piena, calcolata con ipotesi molto cautelative, può essere convogliata con un tirante d'acqua di circa un metro. Dopo la confluenza con lo scarico di esaurimento della vasca, il cunicolo continua in un canale coperto, che sbocca nell'Oglio circa 600 m a valle della traversa, dove il livello di massima piena del fiume è inferiore a quello del fondo della vasca.

3. - STATO ATTUALE DEI LAVORI.

I lavori dell'impianto sono stati iniziati alla fine del 1967 per la sede della condotta forzata, verso la metà del 1968 per la galleria e la centrale e nel dicembre 1970 per la vasca di accumulazione; attualmente sono in fase di avanzata realizzazione. Si prevede che alla fine del 1972 entrerà in esercizio il primo dei due gruppi binari; l'altro seguirà a breve distanza di tempo. I gruppi ternari, la condotta forzata che li alimenta e la centrale ausiliaria saranno pronti per il funzionamento nella seconda metà del 1973.

4. - RINGRAZIAMENTI.

Desidero ringraziare i colleghi e collaboratori del Centro Progettazione e Costruzione Idraulica ed Elettrica di Venezia dell'Enel, ed in particolare il geom. Angelo Argenton, che mi sono stati di valido aiuto nella redazione di queste note.

Manoscritto pervenuto il 15 giugno 1972.