

CARLO SEMENZA

---

IL PROBLEMA GENERALE  
E LE MODALITÀ DI COSTRUZIONE  
DELLE CENTRALI IN CAVERNA

---

*(Con quattro tavole)*


---



PADOVA  
SOCIETÀ COOPERATIVA TIPOGRAFICA  
1951

*Memorie degli Istituti di Geologia e Mineralogia dell'Università di Padova*

*Volume XVII*





Le brevi schematiche note che seguono non hanno nessuna pretesa di costituire una completa trattazione del problema delle centrali in caverna, ma intendono soltanto mettere in evidenza, soprattutto dal punto di vista pratico, quale risulta da una esperienza di parecchi anni di lavoro direttivo, gli elementi fondamentali del problema e qualche concetto personale in merito al problema stesso.

Nel mio lavoro in questo campo, come in tutte le costruzioni da me dirette o seguite, ho avuto da molti decenni la consulenza e la collaborazione, decisive ed appassionate, del Prof. Giorgio DAL PIAZ.

Desidero qui esprimere la mia devota gratitudine, sia per il costante prezioso consiglio nel lavoro, sia per i suggerimenti datimi nella redazione della presente memoria. A lui sono dovute in particolare le note illustrative delle tavole.

1) *Premesse.* — Il problema della costruzione delle centrali in caverna ha cominciato a essere estesamente, vorrei dire generalmente, studiato ed affrontato in Italia nel quinquennio 1935-1940.

E' bensì vero che già da molti anni era stata in alcuni casi studiata ed adottata la disposizione in caverna ispirandosi alle soluzioni norvegese del Möckfiard e svedese del Porjus. I maggiori esempi italiani del periodo che si potrebbe dire dei precursori sono quelli delle centrali del Coghinas e dell'Alto Flumendosa I° e III° salto in Sardegna. Il secondo di questi impianti tuttavia è stato poi attuato soltanto in questi ultimi anni, mentre la costruzione del Coghinas risale al 1926.

Occorre riconoscere, a giusto e notevole merito dei tecnici che le hanno ideate, in particolare gli ingegneri DOLCETTA ed OMODEO, che l'impostazione di queste prime centrali in caverna è dovuta principalmente a un concetto tecnico e non di difesa. Invece nel periodo precedente la seconda guerra mondiale ci si è incamminati decisamente verso la soluzione in caverna essenzialmente per ragioni di ordine bellico. Ben presto però a queste ragioni sono subentrate, o per meglio dire si sono accompagnate, altre ragioni di carattere economico e tecnico in base alle quali è stata anche valutata la convenienza della soluzione in caverna.

---

*Il testo della presente memoria riproduce, con alcuni completamenti e aggiornamenti e con l'aggiunta di ulteriore materiale illustrativo, una comunicazione per la riunione del 13-14 giugno 1949 del Landesverband Bayern des Deutschen Wasserwirtschafts und Wasserkraftverbandes e. V. Monaco di Baviera, pubblicata in lingua tedesca nella rivista « Die Wasserwirtschaft » 40<sup>a</sup> annata 1949-50, Sonderheft, pagine 13-19. La pubblicazione in queste « Memorie » è stata gentilmente concessa dal Verband e dal « Die Wasserwirtschaft », ai quali vengono qui espressi vivi ringraziamenti.*



Le centrali in caverna in Italia, fra costruite e in costruzione, sono oggi una ventina.

Nella mia qualità di Direttore del Servizio Costruzioni Idrauliche della Società Adriatica di Elettricità in Venezia, ho la maggior parte della responsabilità della progettazione statica generale e della costruzione di 7 grandi centrali in caverna, mentre molte altre sono in progetto. Ho tuttavia progettato e costruito anche molte centrali all'aperto, e posso assicurare che la soluzione in caverna è stata in generale da me intravista, più che come elemento di difesa, soprattutto per ragioni tecniche.

Desidero però precisare che la mia competenza, e quindi le note seguenti, riguardano soltanto la parte statica e costruttiva. Infatti il mio Servizio si occupa soltanto di questa, mentre della parte meccanico-elettrotecnica — progettazione, disposizione, costruzione, esercizio — si occupa un altro Servizio dell'Adriatica, parallelo al mio, il Servizio Costruzioni Elettromeccaniche, col quale il lavoro viene svolto in armonica collaborazione.

Il Direttore di tale servizio, Prof. Dott. Ing. Mario MAINARDIS, ha recentemente pubblicato oltre a diverse memorie sull'argomento un trattato sulle Centrali Elettriche, nel quale è svolto anche il tema delle centrali in caverna.

2) Il *punto fondamentale*, secondo me, che occorre considerare è quello dello schema generale dell'impianto. Il problema della centrale non si può cioè separare da quello di tutto l'impianto, insieme col quale va studiato e risolto. Ora, da questo punto di vista, la soluzione in caverna consente, entro certi limiti e senza mai dimenticare le esigenze pratiche, di collocare la centrale esattamente o quasi dove la sua posizione risulta più conveniente per lo schema, e cioè per la distribuzione e la suddivisione dei salti di una serie di impianti lungo una data vallata, o più generalmente ancora in uno schema generale di utilizzazione.

Questo equivale a dire che, sempre entro i limiti pratici, colla soluzione in caverna noi possiamo prescindere dalle caratteristiche morfologiche del terreno il quale in definitiva dovrebbe sempre consigliare le soluzioni costruttive. Teniamo infatti sempre ben presente che nei nostri lavori chi comanda è la natura, e alle sue esigenze dobbiamo cercare di uniformarci.

Se l'andamento superficiale del terreno è poco favorevole per la costruzione della centrale e delle opere ad essa connesse, come i pozzi piezometrici, le tubazioni forzate, il canale di scarico, e se le caratteristiche della roccia sono sufficientemente buone, colla soluzione in caverna siamo in grado di estendere lo spazio disponibile per collocare le opere se non indefinitamente, praticamente con una notevole ampiezza.

Se la roccia è appena non del tutto sfavorevole, abbiamo quindi a disposizione un campo di lavoro molto più esteso e di limiti molto più elastici, cosicchè possiamo interrompere un salto nel punto che più ci conviene, o prolungare le canalizzazioni fino a trovare un salto di massima utilizzazione, o anche riunire in una sola centrale derivazioni provenienti da bacini diversi con salti diversi; il tutto non dirò senza badare al terreno, ma in un certo senso con una relativa indipendenza dallo stesso.

Ripeto che questo, per mio conto, è l'elemento fondamentale che non tutti tengono presente nella progettazione e costruzione delle centrali in caverna; occorre svin-



colarsi da condizioni locali e concepire l'impianto spazialmente. Desidero però anche ripetere, a scanso di conclusioni affrettate, che tutto questo naturalmente vale non in senso assoluto, ma con adeguata relatività, perchè, come già detto, sono in definitiva le condizioni naturali, tanto quelle dell'andamento esterno del terreno, quanto quelle del sottosuolo, che obbligano spesso le soluzioni.

3) *L'elemento difesa* è naturalmente anche essenziale. Non saremo noi (uomini che hanno attraversato due guerre mondiali e che, pur desiderosi con tutta la nostra anima di italiani, di europei, di tecnici, che venga risparmiato all'umanità un altro disastro spaventoso, siamo penserosi sempre di fare tutto il possibile per conservare in ogni caso i beni dei nostri paesi) a ritenere secondario un concetto che in molti casi può essere coefficiente di salvezza per uno degli elementi base dell'economia di una nazione.

Sappiamo troppo bene in Italia quanto abbia contribuito a rendere difficile la ripresa nel recente dopoguerra il fatto che molti impianti idroelettrici erano stati distrutti. La deficienza di energia di cui soffriamo in Italia è stata infatti aggravata notevolmente nel 1945 e negli anni seguenti dalle gravi distruzioni operate nell'Italia centrale dagli eserciti in ritirata. Le opere idrauliche degli impianti hanno subito in generale pochi danni, ma il macchinario delle centrali era stato in gran parte distrutto. La potenza nell'Italia centrale era ridotta al 15 % della disponibilità anteguerra.

Dal punto di vista della sicurezza posso ricordare che dieci anni fa, secondo giudizi autorevoli, uno spessore di 9 ÷ 10 m di buona roccia era ritenuto più che sufficiente a proteggere da ogni e qualsiasi offesa normale di guerra. Non posso nulla dire circa gli effetti delle bombe atomiche perchè mi mancano elementi: ritengo però che uno spessore uguale o poco superiore di roccia compatta possa essere un coefficiente sostanziale.

La tendenza attuale in Italia è quella di mettere in caverna anche i trasformatori, mentre in quella che chiamerò la prima fase si tendeva a collocare i trasformatori all'aperto o semiinterrati. I maggiori esempî di questo tipo di sistemazione sono oltre alle centrali di Doblari, Cencenighe, Agordo, Stanga e Lumiei dell'Adriatica, quelli delle grandi centrali della Montecatini nelle Valli dell'Isarco e dell'Adige.

Abbiamo cominciato a collocare i trasformatori in caverna colla centrale di Plava sull'Isonzo, e ora per la grande centrale di Soverzene abbiamo adottato in pieno tale sistema, disponendoli in una seconda grande caverna parallela a quella dei gruppi turbina - alternatore.

Non c'è dubbio che tale sistemazione sia la più razionale. Richiede però un confronto economico particolare perchè, se i cavi di trasporto ad altissima tensione sono più costosi delle sbarre alla tensione di macchina dell'ordine di 10 mila V, sussistono anche dei coefficienti favorevoli: le perdite di energia nel trasporto sono minori, e si può risparmiare un carro ponte per il sollevamento utilizzando quello della sala generatori.

4) *Il confronto economico fra soluzione all'aperto e soluzione in caverna* va svolto caso per caso, naturalmente con criteri obiettivi.



La soluzione in caverna, secondo me, è sovente più costosa di quella all'aperto, per diversi motivi:

a) Lo scavo, pur non avendo una grande importanza percentuale sul costo, costituisce di solito un'aggiunta netta alle altre lavorazioni indispensabili per la costruzione della centrale, e quindi una spesa in più.

b) I volumi delle murature in elevazione in pratica sono poco diversi nelle due soluzioni; in quella in caverna, si ha molte volte il doppio rivestimento, verso la roccia e verso l'interno, e la volta contro roccia è nettamente più onerosa di una copertura all'esterno.

L'economia sulle fondazioni del macchinario può essere invece notevole se la soluzione all'esterno comporta fondazioni su terreno sciolto anzichè in roccia. In generale però occorre guardarsi dalla tendenza, che può rivelarsi illusoria anche dal punto di vista economico, a lasciare in posto per economia blocchi di roccia compresi fra murature. Anche se la roccia è solida, la discontinuità nei piani di posa può dar luogo a piccoli assestamenti e lesioni che sono nettamente sconsigliabili per le fondazioni dei gruppi turbina-generatore. Se invece la fondazione è in roccia anche per la soluzione all'esterno, è evidente come il costo in caverna risulti in generale superiore, perchè sarà sempre più oneroso di quello all'esterno, sia per il più alto costo specifico dello scavo in sotterraneo, sia per le distanze di trasporto, sia perchè ad esempio in Italia la mercede operaia per lavori in sotterraneo è più elevata.

A vantaggio però della soluzione in caverna sta per il costo degli scavi la maggiore costanza di rendimento dovuta alla possibilità di lavorare in qualunque stagione senza eccezioni, e il fatto che lo scavo resta limitato a quello strettamente indispensabile: è tutto scavo utile.

c) Gli elementi costruttivi e i servizi accessori della centrale risultano costosi mentre nella soluzione all'aperto o mancano del tutto o hanno limitata importanza: galleria di accesso, galleria di scarico, galleria per le sbarre o per i cavi, l'eventuale condizionamento dell'aria, i trasporti ecc.

Questi, secondo il mio parere, sono gli elementi che realmente possono avere una influenza sul costo anche più considerevole di quella della caverna per sè stessa.

Se ripenso a quello che è stata la prima grande centrale in caverna da me costruita per l'Adriatica, quella di Doblari sull'Isonzo, dove alle complicazioni della sistemazione in caverna si aggiungevano quelle dovute al fatto delle grandi oscillazioni del pelo liquido del fiume in caso di piena — oscillazioni dell'ordine di 20 m — alla mia mente si presenta una serie di cunicoli e di accessi da costituire un vero labirinto. Col progredire della tecnica abbiamo notevolmente semplificato le soluzioni e oggi fra la superficie esterna e le nostre centrali in caverna abbiamo sostanzialmente due o al più tre condotti: una galleria di accesso, una di scarico e un cunicolo di sicurezza che dà adito alla calotta.

L'esercizio delle centrali in caverna è praticamente di eguale costo di quello delle centrali all'aperto; occorre naturalmente provvedere ad assicurare adeguate condizioni igieniche e di sicurezza per il personale.



Fin qui ho parlato sostanzialmente degli svantaggi economici della soluzione in caverna. Tuttavia, di fronte alle maggiori spese di cui sopra relative alla centrale per sè stessa stanno, oltre ai vantaggi di ordine generale dei quali ho parlato nei precedenti paragrafi, anche e spesso dei vantaggi pure di ordine economico sulle opere adiacenti, che devono essere attentamente valutati, con un esame globale del problema.

In primo luogo ricordo la possibilità di ridurre le condotte forzate alla loro lunghezza minima, perchè la centrale si può collocare quasi esattamente sulla verticale dei pozzi piezometrici.

I tecnici delle turbine saprebbero meglio di me mettere in evidenza il vantaggio che può risultare da questa disposizione nella stabilità di funzionamento dal punto di vista idrodinamico. Specialmente negli impianti moderni dove si fa assegnamento sulla utilizzazione di notevoli oscillazioni di livello di grandi serbatoi, la riduzione al minimo della lunghezza della condotta forzata può rendere possibili delle regolazioni che altrimenti risulterebbero difficili.

A Soverzene, grande centrale dell'impianto Piave-Boite-Vajont, abbiamo con questa disposizione nello stesso tempo potuto imporre condizioni molto severe per lo stacco e il riattacco dei gruppi ed eliminare gli scarichi sincroni che su turbine aventi portata di  $22 \text{ m}^3/\text{sec}$  su un salto variabile fra 285 e 225 m sarebbero stati molto costosi; da qui un notevole risparmio, senza contare l'altro risparmio ottenuto nelle tubazioni stesse, e il fatto che col collocamento in caverna è possibile, per le condotte forzate, utilizzare al massimo grado la resistenza della roccia per la quale, come è noto, con criterio di ordine pratico si suole in condizioni di roccia buona mantenersi all'interno della montagna almeno a una distanza dal punto più vicino della superficie esterna pari alla pressione idrostatica.

Nei paesi poveri di ferro come l'Italia, l'incidenza del costo delle condotte forzate su quello globale di un impianto assume notevole importanza: si tende in tutti i modi a ridurre la spesa abbandonando le soluzioni, sicure ma costose, delle tubazioni esclusivamente metalliche. Comunque, anche adottando questo tipo, la possibilità di ridurre la lunghezza ai minimi termini può avere un singolare interesse.

Lo stesso vantaggio si ha naturalmente sui pozzi piezometrici, per i quali, potendo essere collocati all'interno a notevole profondità in relazione alla posizione della centrale in caverna, si possono utilizzare condizioni statiche dal punto di vista del contributo di resistenza della roccia molto migliori di quelle che si avrebbero se fossero collocati in vicinanza della superficie.

Si tratta quindi di un complesso di elementi di costo che devono essere valutati, come al solito e come ho detto inizialmente, caso per caso, perchè non possono esistere regole assolute, ma deve soltanto esistere un bilancio obiettivo di ragioni tecniche ed economiche; la miglior soluzione resta perciò affidata sia al confronto per raggiungere la economia, sia anche all'intuito personale che deve sempre sorreggere la nostra opera di costruttori.

Questi brevi accenni sulle opere accessorie non rientrano forse strettamente nel campo delle centrali in caverna, ma mi sembrano essenziali per lo studio generale del problema.



5) *Posizione della centrale in caverna.* — In generale, quando la distanza tra presa e restituzione è sensibile, preferisco nettamente collocare la centrale in prossimità della restituzione.

La soluzione di collocarla immediatamente a valle della presa o della diga con un pozzo a pressione e una lunga galleria di scarico a valle della centrale, che sostituisce la galleria di carico della stessa lunghezza, è indubbiamente seducente e ha in qualche caso dei grandi vantaggi: ma secondo me la scelta definitiva deve farsi soltanto dopo matura riflessione, per ragioni di ordine pratico e costruttivo.

Per esperienza personale so cosa significhi il lavoro in lunghe gallerie sottoposte a forti filtrazioni di acqua e quanto elevato possa risultare il loro costo nonostante ogni più prudente preventivo. Perchè si possa realizzare effettivamente una economia colla disposizione di cui sopra, occorrono diversi elementi favorevoli, e principalmente:

a) La centrale deve giacere in roccia di caratteristiche molto favorevoli e soggetta a scarse filtrazioni di acqua; occorre quindi controllare bene la permeabilità della roccia, l'andamento degli strati, le possibilità varie di filtrazioni dal costruendo serbatoio o dal fiume vicino alla centrale. Se poi la centrale, come è stato eccezionalmente previsto in alcuni casi in Italia, è in terreno alluvionale, è tanto più necessario accertarsi che alla quota dello scarico le alluvioni abbiano caratteristiche tali da permettere la costruzione.

b) Occorre comunque che il vano della centrale sia drenabile e che l'accesso non ne sia intollerabilmente lungo e malcomodo.

c) E' opportuno che il canale di scarico sia a pelo libero, specialmente se di grande lunghezza, perchè, se non lo fosse, il pozzo piezometrico che occorrerebbe inserire a valle della centrale avrebbe un costo tale da eliminare in parte i vantaggi derivanti dalla riduzione a lunghezza minima del condotto di carico. Se quindi lo scarico avviene in profondità in un serbatoio o in un fiume con forti oscillazioni di livello la disposizione può diventare molto costosa.

d) Occorre poi, come ho detto, esaminare bene le condizioni dello scarico e quelle nelle quali si dovrebbe svolgere la costruzione della relativa galleria perchè può darsi che le difficoltà di lavoro siano tali da annullare praticamente il vantaggio di sostituire una galleria di scarico, per lo più a pelo libero e che quindi richiede minori cure di lavoro, senza iniezioni ecc., ad una galleria di carico in generale sotto una pressione più o meno notevole.

Un altro svantaggio della sistemazione è quello di dover subire costantemente la perdita di carico corrispondente alla portata massima, perchè naturalmente la galleria di scarico a pelo libero dovrà avere la pendenza relativa alla stessa portata massima, mentre in una galleria in pressione si ha in ogni momento la perdita di carico corrispondente alla portata istantanea.

Il problema che ho esposto ha una certa analogia con quello che talvolta si pone lungo una vallata per la utilizzazione integrale dei salti successivi, con interposti serbatoi di regolazione: e cioè la scelta della miglior posizione per una centrale che deve scaricare in un serbatoio il cui livello abbia una notevole oscillazione. In tale caso la centrale, per ridurre la lunghezza della galleria di carico, dovrebbe essere collocata



alla radice del serbatoio, ma questo implica che la sua parte più profonda, per esempio la camera delle turbine, che per utilizzare la intera oscillazione del salto dovrebbe essere situata al di sotto del livello minimo del serbatoio, non possa avere scarico libero e quindi si trovi in condizioni di drenaggio assai difficili (con necessità di installazioni fisse di pompe ecc.). In questo caso io credo sia talvolta più conveniente, in ultima analisi, prolungare il canale di carico fino a collocare la centrale di fianco alla diga in modo che alla centrale stessa si possa accedere dalla zona a valle della diga con galleria orizzontale e che le acque possano defluire facilmente. In questo modo si evita anche l'adozione di lunghi alberi di trasmissione tra la turbina e l'alternatore dei gruppi verticali, che, oltre ad essere costosi, possono dare qualche inconveniente.

6) *Studio geognostico, dal punto di vista costruttivo, della centrale.* — La zona delle Alpi Venete dove io lavoro per la Società Adriatica di Elettricità è in generale molto favorevole per la impostazione di centrali in caverna perchè la roccia prevalente è il calcare, spesso in formazioni compatte. Tuttavia abbiamo dovuto costruire anche in rocce meno favorevoli come le arenarie del Werfen. Quanto dirò ora ha in ogni modo valore generale e riflette sia le peggiori nostre esperienze, sia altre ben più gravi incontrate in Italia.

Tutto considerato, non potrei mai raccomandare abbastanza un adeguato studio con sondaggi, meglio ancora con cunicoli di assaggio e pozzi, della zona interna dove si pensa di costruire la vera e propria centrale. Se appena appena si hanno dei dubbî sulla consistenza del terreno — e questi sono doverosi sempre, ma specialmente in rocce metamorfiche o sedimentarie (gneiss, micascisti, filladi, arenarie ecc.) — tale studio è indispensabile, deve essere condotto a fondo e può dare dei vantaggi considerevoli non solo dal punto di vista della spesa, ma da quello del risparmio di tempo. I mesi perduti negli assaggi verranno con ogni probabilità pienamente guadagnati in seguito.

L'ausilio di un geologo veramente competente e pratico è sempre opportuno: molto spesso risulta necessario e di estremo interesse. Ritengo anche molto utile che le ricerche vengano eseguite, in quanto possibile, colla collaborazione dello stesso direttore dei lavori destinato a costruire la centrale.

Occorre tener presente il fatto fondamentale che se in alcune rocce compatte i sondaggi possono talvolta dare sufficienti indicazioni, la stessa cosa non può dirsi per le rocce stratificate e metamorfiche dove i risultati dei sondaggi sono spesso insufficienti a dare un'idea esatta delle condizioni del lavoro che si deve affrontare.

Consiglio perciò l'esecuzione dei cunicoli di assaggio, di pozzi ecc., i quali danno per certo indicazioni più sicure e complete.

La stratificazione e le altre caratteristiche della roccia nel posto preciso della centrale (come le fratturazioni e le corrosioni, coincidenti o non con le fratturazioni) possono infatti, specialmente se ci si trova in zona piuttosto tormentata dal lato tettonico, essere alquanto diverse da quelle superficiali; le stesse caratteristiche d'altra parte hanno un'importanza notevole agli effetti costruttivi.



Ad esempio una disposizione longitudinale della caverna parallela a strati verticali potrebbe dare luogo a gravi inconvenienti al momento della esecuzione, mentre se disposta normalmente agli strati stessi la costruzione verrà a trovarsi in posizione di notevole sicurezza. Analogamente, se gli strati sono inclinati, sarà sempre opportuno orientare la caverna colla sua massima dimensione in un piano che tagli normalmente gli strati e non mai parallelo agli strati stessi, perchè in questo ultimo caso la volta potrebbe risultare soggetta a forze esterne inclinate dissimetriche e quindi piuttosto sfavorevoli.

Quando le condizioni della roccia non sono del tutto favorevoli, sarà bene evitare una eccessiva vicinanza di due scavi paralleli, e pertanto tenere ad adeguata distanza dalla caverna principale la caverna dei trasformatori, la eventuale galleria per il collettore della condotta forzata e quella di scarico (sempre se parallela allo scavo della centrale o sensibilmente tale).

Aggiungo che in rocce molto sospette per continue variazioni di consistenza, come è il caso di certe filladi, può essere opportuno estendere la esplorazione con qualche assaggio anche al di là della zona di scavo, per evitare di trovarsi di fronte a spinte derivanti da vicine parti decomposte.

Si tratta di considerazioni che possono avere un sapore elementare ma che non bisogna mai trascurare perchè, l'esperienza me lo insegna, molte volte hanno avuto importanza sostanziale.

Altro punto importante è quello della permeabilità. La presenza di filtrazioni abbondanti non impedisce in senso assoluto e in generale la costruzione della centrale, ma la rende più costosa e fastidiosa e può causare anche notevoli inconvenienti durante l'esercizio. Ho potuto diminuire le conseguenze di una situazione di questo genere in un caso importante, colla costruzione, anticipata di qualche anno, dei cunicoli di scarico e di accesso. In tal modo la massa della montagna nelle immediate vicinanze della caverna si è in parte drenata lasciando le pareti in condizioni molto migliori di quelle originali.

7) *Costruzione delle centrali in caverna.* — La costruzione delle centrali in caverna non differisce sostanzialmente dalle grandi opere del genere costruite per altri scopi.

Possiamo distinguere i casi fondamentali: roccia buona, roccia poco buona, o addirittura materiale sciolto.

E' evidente come quest'ultimo caso debba costituire una eccezione perchè se a tutti gli elementi di inevitabile maggior costo cui abbiamo accennato si accompagna anche una ragguardevole difficoltà di costruzione, la convenienza della centrale in caverna non può che diventare assai problematica.

In ogni caso, tanto se le condizioni della roccia sono favorevoli come se sono sfavorevoli, le prime operazioni da eseguire sono lo scavo e la muratura della volta di protezione. Da queste operazioni preliminari dipende in pratica tutta la costruzione.

Lo scavo e la costruzione della volta si svolge nel modo più comodo quando si abbia a disposizione una galleria di accesso (anche naturalmente un semplice cunicolo) arrivante sotto la volta e corrente, nel suo ultimo tratto, lungo l'asse della volta stessa.



Tale cunicolo, se pure non strettamente indispensabile, migliora evidentemente le condizioni di lavoro e poichè d'altra parte esso può anche essere utilizzato in via definitiva come uscita di sicurezza, passaggio di cavi ecc., la costruzione ne è quasi sempre consigliabile.

Quanto alla quota da assegnare al cunicolo, se esso deve servire per l'uscita del materiale di risulta converrà che sia al di sotto dello scavo da eseguire o almeno alla sua quota più bassa corrispondente alle imposte della volta. Se invece il materiale verrà smaltito attraverso pozzi collegati colla galleria di scarico, la quota potrà anche essere più alta di quella delle imposte.

Dal cunicolo la volta verrà attaccata con scavo frontale sull'intero sviluppo dell'arco se la roccia è buona, altrimenti con attacchi parziali da collegare poi con adeguata precauzione; allo scavo seguirà (meglio immediatamente, in ogni caso) il getto della volta. Se poi lo scavo è in roccia cattiva ogni singola progressiva fase di scavo dovrà assolutamente essere seguita subito dalla corrispondente muratura.

Nelle nostre centrali abbiamo in realtà avuto anche alcuni casi nei quali si è potuto completare lo scavo di tutta la volta senza costruire un solo anello di muratura; la fase di muratura è stata poi condotta tutta di seguito. In altri casi invece si è dovuto procedere gradualmente di mano in mano che lo scavo veniva affrontato.

In certe rocce metamorfiche, come le filladi, è abbastanza frequente il caso di cedimenti quasi plastici dovuti a deficienze locali per intercalazioni argillose; occorre quindi che la costruzione tenga conto di questa possibilità.

Ultimata la costruzione della volta, quella di tutta la centrale può seguire con maggior tranquillità.

Se la roccia è buona si potrà procedere allo scavo generale della caverna: se è meno buona, o cattiva, converrà eseguire i due piedritti (o fianchi longitudinali) scavando con scavo armato lungo le due pareti laterali e costruendo poi a brevi tratti e cioè « per campioni », le pareti laterali. In qualche caso importante, ad esempio Ponte Gardena e Glorenza, la muratura per campioni ha dovuto procedere addirittura dall'alto al basso, con sottomurazioni successive.

Il procedimento di sottomurazione della volta per campioni dovrà anche essere per lo più seguito quando, nel caso di roccia molto spingente, sia necessario adottare (v. sotto le osservazioni sulle strutture murarie) per l'intero rivestimento al di sopra delle fondazioni una sezione curva (ovoidale) continuando cioè coi piedritti la sagoma della volta.

Alle operazioni di rivestimento dei piedritti potrà seguire lo scavo di tutto il nucleo intermedio.

Per il trasporto a rifiuto del materiale è bene tener presente che la soluzione veramente ottima è quella di fare affluire per caduta tutto il materiale nella parte più profonda dello scavo e di là portarla all'aperto, in generale attraverso la galleria di accesso o meglio ancora attraverso quella del canale di scarico la cui costruzione (almeno lo scavo) dovrà precedere ogni altro lavoro relativo al complesso delle opere (ad eccezione della volta, naturalmente e anche questo sempre soltanto in linea generale). Questo risulta opportuno anche agli effetti dello scarico delle eventuali filtrazioni d'acqua. Partendo da dette gallerie si scaveranno nell'interno della massa da asportare



alcuni pozzi, opportunamente intervallati, che arrivino fino al piano dell'imposta della calotta; questi pozzi serviranno da imbuti per scaricare in basso il materiale, che verrà poi asportato attraverso le gallerie.

In qualche caso, per accelerare la costruzione, il lavoro di scavo e di muratura è stato attaccato in due piani contemporaneamente.

8) *Le murature delle centrali in caverna.* — Lo studio delle strutture murarie deve naturalmente tener conto delle condizioni della roccia.

Ci sarebbe da dire anzitutto qualche cosa sul dimensionamento della volta, della cui costruzione ho parlato, ma io mi dichiaro competente soltanto in modo molto relativo dal punto di vista teorico e ritengo perciò doveroso rimandare ai trattati in argomento, specialmente tedeschi, numerosi ed esaurienti. Mi si permetta tuttavia di esprimere un certo scetticismo di fronte a delle calcolazioni che devono per forza basarsi su ipotesi molto generiche sulla struttura della roccia. Anche qui, come concluderò in seguito, la competenza pratica degli uomini vale molte volte più del calcolo. È certo tuttavia che l'ipotesi più esatta è quella della formazione di un arco all'interno della montagna che, come avviene nelle strutture murarie, riduce enormemente o può addirittura annullare (se in roccia buona, con appropriata freccia e curvatura, e razionale esecuzione dello scavo) il valore effettivo della spinta verticale sulla struttura alla quale essa sovrasta.

Questo naturalmente non riguarda il materiale del tutto sciolto (alluvionale, morenico ecc.) per il quale, se in linea teorica il principio può ancora sussistere, occorrono ben altre considerazioni.

In generale, dove appena la roccia ha qualche consistenza, la volta sarà ribassata, cioè spingente contro il terreno e non sui piedritti. Il volto a pieno centro sarà limitato a casi del tutto particolari.

Ripeto che ritengo tuttavia inutile diffondermi su principî teorici sui quali non potrei dire certo una parola autorevole.

In linea pratica ritengo che lo spessore della volta in chiave, con roccia abbastanza buona, possa stabilirsi dell'ordine fra  $1/20$  e  $1/25$  della luce; all'imposta si potrà aumentare del 20 % circa. Per gli archi ribassati, la freccia può essere mediamente dell'ordine di  $1/5 \div 1/6$  della luce.

La volta potrà essere in calcestruzzo se la roccia non è, o è poco, spingente; se molto spingente converrà adottare i mattoni o, in casi eccezionali, anche bolognini di pietra di adeguata resistenza.

Per quanto riguarda le pareti, i tipi di struttura si possono sostanzialmente ridurre ai tre seguenti:

a) se la roccia è molto buona e non soltanto non è spingente ma (caso veramente raro) non presenta neppure la possibilità che delle scaglie di notevoli proporzioni si staccino dalle pareti e tendano a premere sulle pareti stesse (eventualità che, ripeto, secondo la mia esperienza è abbastanza frequente anche con roccia buona), è possibile studiare la muratura in modo del tutto indipendente dalle azioni esterne. In tal caso la struttura consisterà essenzialmente oltre che della volta, che si scarica direttamente sulla roccia, di due pareti laterali che è consigliabile costruire con pilastri



sostenenti le travi per il carro ponte, con interposti fra i pilastri stessi degli specchi o pannelli murati contro roccia o anche addirittura lasciando la roccia libera. Abbiamo poi le fondazioni che potranno essere studiate indipendentemente dalla statica generale della caverna.

b) Se invece la roccia, come avviene nella generalità dei casi, presenta anche soltanto le limitate tendenze di spinta o di distacchi alle quali ho accennato, converrà studiare la struttura come un telaio che abbia anche una resistenza nel senso trasversale per azioni dall'esterno inclinate o orizzontali. In tal caso è necessario che i piedritti siano collegati colla volta, per consentire appunto il funzionamento a telaio, e siano poi controventati in corrispondenza al piano più alto delle fondazioni, in modo da diminuire quanto più possibile la loro altezza libera. Le fondazioni quindi dovranno avere degli elementi continui in corrispondenza ai pilastri o, se questo non si può fare, intelaiati nel piano orizzontale in modo da costituire una struttura atta a funzionare da puntone orizzontale alla base dei pilastri stessi.

c) Altro sistema, in genere più aderente alle esigenze statiche e che dovrà scegliersi rispetto al precedente a seconda delle caratteristiche della massa rocciosa, è quello della struttura ovoidale, che può continuarsi anche nelle fondazioni con funzione di arco rovescio. Non è sempre facile tuttavia che l'arco rovescio possa essere continuo e completo, data la complessità delle strutture di fondazione dei gruppi turbina-alternatore. Anche con questo ultimo sistema quindi può essere conveniente la controventatura orizzontale al piano più alto delle fondazioni, che avrà funzione di puntone sia durante le fasi intermedie di lavoro sia per la struttura completa.

La struttura curva dà grandi vantaggi anche nei singoli elementi della costruzione, ad esempio per le pareti di testata e, nel caso b) di cui sopra, per gli specchi tra pilastro e pilastro. Bastano volte di piccolo spessore ( $20 \div 40$  cm.) per sostenere spinte di notevole importanza; perciò in quasi tutte le nostre centrali in caverna, dove appena le condizioni della roccia lasciavano qualche piccolo dubbio, ho costruito le pareti di testata o gli specchi con sagoma arcuata.

Circa le murature verso l'interno, la mia esperienza porta a stabilire che, nonostante una roccia possa apparire assolutamente asciutta e impermeabile, le filtrazioni possono sempre intervenire anche in seguito, e questo anche per il solo fatto che pur essendo la caverna asciutta noi creiamo nelle sue vicinanze degli spazi (gallerie, pozzi ecc.) contenenti acqua in pressione e che, per quanto perfetta possa essere la costruzione, possono sempre dar luogo a qualche perdita.

È quindi opportuno realizzare con molta cura un sistema di impermeabilizzazione e a questo scopo è preferibile che lo strato di tenuta sia contro la roccia. Infatti una protezione alla superficie interna delle pareti è atta a dare notevoli inconvenienti.

In linea generale in tutte le nostre centrali noi abbiamo adottato l'intercapedine costituita dal vuoto che rimane tra la muratura di rivestimento contro roccia e la struttura, del tutto separata, costituita da pilastri e dalle pareti fra questi, portanti la trave gru e una controvolta, la quale dovrà stare ad una distanza dalla volta controroccia tale che un uomo possa percorrere il vano senza eccessive difficoltà.



La separazione di tale struttura interna dalle pareti deve essere curata con molta attenzione, coll'uso di cartoni o feltri bitumati, così come è sempre prudente provvedere una protezione a base di bitumi sopra la controvolta. Al piede dell'intercapedine si deve costruire con cura, previo attento esame delle possibilità, una canaletta di scolo delle acque che devono facilmente essere smaltite verso il canale di scarico. Per mantenere sempre pulito tale canale è opportuno che l'intercapedine sia facilmente raggiungibile ed ispezionabile.

Questi sono i principali accorgimenti che l'esperienza mi ha insegnato. Posso aggiungere che entro certi limiti è sempre possibile rimediare ad una insufficiente previsione delle condizioni della roccia. In certi casi infatti gli stessi pozzi e cunicoli di assaggio non riescono a dare un'idea esauriente delle condizioni complessive. Noi abbiamo avuto ad esempio il caso della centrale del Lumiei, illustrata dall'ing. DI BRAI e da me nella « Energia Elettrica » e quello della centrale di Soverzene, testè ultimata, nei quali gli scavi d'assaggio e la stessa costruzione della calotta ci avevano dato la sensazione di trovarci di fronte a condizioni quasi sicure, mentre negli scavi dei piedritti si sono verificati scoscendimenti tali da mettere in pericolo la loro condizione statica.

Nella centrale del Lumiei, dopo aver già eseguita la volta senza che si rendessero necessari accorgimenti particolari abbiamo perciò dovuto provvedere non soltanto ad adottare pilastri in calcestruzzo armato per le pareti, ma a collegare i pilastri stessi colla volta mediante adeguati amarraggi nelle imposte di quest'ultima, incidendole profondamente con opportune scanalature.

Alla stessa centrale abbiamo notato il manifestarsi di lesioni all'attacco dei pilastri anche dopo tale lavoro di collegamento. Siamo riusciti a ristabilire completamente la situazione con delle nervature ad arco costruite al di sotto della volta, che hanno permesso di rinforzarla portando le nervature stesse ad impostarsi addirittura contro la roccia con voltine di scarico fra nervatura e nervatura.

Altri accorgimenti risultano dalle ordinarie pratiche costruttive, e da quella specie di intuito che io chiamo il « sentimento della roccia », sentimento che, più ancora che in noi ingegneri, è molte volte e in modo naturale sviluppato negli assistenti, nei capi operai e negli operai stessi, dai quali non dobbiamo mai vergognarci di imparare qualcosa.

*Venezia, aprile 1951.*



TAVOLA I.



## SPIEGAZIONE DELLA TAVOLA I.

(Note geologiche del Prof. Giorgio DAL PIAZ).

### FIG. 1 - CENTRALE DI DOBLARI (Impianti Medio Isonzo)

Periodo di costruzione 1937-1939

La roccia nella quale è scavata la caverna della centrale di Doblari, sulla destra dell'Isonzo, consta di un magnifico calcare ceruleo del Cretaceo medio-superiore, lastriforme, assai resistente, che si prestò in modo favorevole allo scavo.

La fotografia illustra la fase di lavoro susseguente alla costruzione della volta e al completamento dello scavo, che ha potuto essere eseguito senza rivestimenti delle pareti. Si stanno costruendo le fondazioni.

### FIGG. 2 - 3 - CENTRALE DI CENCENIGHE (Impianti Medio Cordevole)

Periodo di costruzione 1937-1939

(per gentile concessione del *Landesverband Bayern des Deutschen Wasserwirtschafts und Wasserkraftverbandes*).

Sulla sinistra del T. Cordevole, al piede del M. Civetta; scavata in arenarie grigie del Werfen in strati di media potenza ad andamento inclinato verso nord-ovest.

In entrambe le fotografie (figg. 2 e 3) si vede un distacco di notevoli proporzioni, di materiale più argilloso, da un banco arenaceo.

Nella fig. 3 è visibile chiaramente la dissimmetria assegnata alla volta, per collocare su uno dei due lati maggiori il vano per il quadro di manovra; nonchè si possono rilevare gli strati rocciosi sulla testata che per maggiore sicurezza (v. il testo) è stata rivestita con una struttura arcuata ad asse verticale.



C. SEMENZA - *Centrali in caverna.*

TAV. I.



FIG. 1



FIG. 2



FIG. 3







TAVOLA II.



## SPIEGAZIONE DELLA TAVOLA II.

(Note geologiche del Prof. Giorgio DAL PIAZ).

### FIGG. 1 - 2 - CENTRALE DI CENCENIGHE (Impianti Medio Cordevole)

Periodo di costruzione 1937-1939

(per gentile concessione del *Landesverband Bayern des Deutschen Wasserwirtschafts und Wasserkraftverbandes*).

La fig. 1 mostra la Centrale ultimata. La parete di testata è decorata con un grande grafito rappresentante il M. Civetta.

La fig. 2 riguarda la costruzione della volta della galleria di accesso alla stessa centrale, nelle arenarie grigie del Werfen superiore.

### FIGG. 3 - 4 - CENTRALE DELLA STANGA (Impianti Medio Cordevole)

Periodo di costruzione 1940-1943

(per gentile concessione del *Landesverband Bayern des Deutschen Wasserwirtschafts und Wasserkraftverbandes*).

Sulla sinistra del T. Cordevole, in dolomia del Trias superiore (Dolomia principale) in grossi banchi a stratificazione suborizzontale. Ugualmente dicasi per la galleria di accesso.

La fotografia in alto (fig. 3) mostra l'edificio esterno sotto la parete quasi verticale. Nell'edificio sono collocati i trasformatori.

L'altra fotografia (fig. 4) riguarda la grande galleria di accesso, nella identica formazione della Centrale, prima dei lavori di rivestimento. Risulta abbastanza visibile la stratificazione, specialmente nelle zone più basse.



C. SEMENZA - Centrali in caverna.

TAV. II.



FIG. 1



FIG. 3



FIG. 2



FIG. 4







TAVOLA III.



## SPIEGAZIONE DELLA TAVOLA III.

(Note geologiche del Prof. Giorgio DAL PIAZ).

### FIG. 1 - CENTRALE DI AMPEZZO (Impianto del Lumiei)

Periodo di costruzione 1941-1947

In località Plan del Sac, sulla destra del T. Lumiei presso Ampezzo Carnico.

Galleria di accesso, per la maggior parte in arenarie argillose finemente stratificate del Werfen.

Caverna della centrale in calcari a *Bellerophon* e dolomie cariate argillose poco resistenti del Permiano superiore, che si dovettero sostenere con rilevanti opere murarie ed archi di considerevole potenza.

Nelle operazioni di scavo vennero messe in evidenza frequenti superfici di scivolamento, spesso speculari, che attestano movimenti locali disarmonici subiti dal complesso roccioso.

Nella fotografia si vede l'attacco della volta alla parete e la trave gru; risultano evidenti in corrispondenza ai pilastri i rinforzi di collegamento e si rileva inoltre la costruzione dei piedritti prima che sia stato scavato il nucleo centrale.

### FIGG. 2-3 - CENTRALE DI SOVERZENE (Impianto Piave - Boite - Vajont)

Periodo di costruzione: accessi preliminari 1942-1943, costruzione vera e propria 1947-1950

Sulla sinistra del Piave nei pressi del paese di Soverzene. Tanto la galleria di accesso quanto la caverna per la centrale vennero scavate nei calcari dolomitici, neri o grigiastri, del Retico (livello più elevato del Trias superiore).

Gli strati sono molto evidenti, specialmente a distanza. Essi hanno un andamento verticale nella parte che interessa la centrale e la condotta forzata, ma, più in alto, piegano verso nord facendo parte dell'anticlinale che ha il suo vertice in corrispondenza a Spiz Gallina.

Il calcare dolomitico ingloba di sovente pezzi di selce nera frammentaria. Il colore grigio o nero della roccia deriva da leggera diffusione nel calcare dolomitico di sostanze bituminose, come si riscontra nei classici depositi ad *Avicula contorta* pure del Retico. Fra strato e strato, dove esiste qualche sottile intercalazione marnosa, il materiale è accompagnato da impregnazioni bituminose, dalle quali si è visto colare qualche goccia di olio minerale denso.

Nella galleria di accesso, a un centinaio di metri dalla centrale, tali lievi impregnazioni bituminose hanno provocato delle azioni aggressive sui calcestruzzi, conseguenti alla presenza di zolfo nella composizione chimica dei bitumi, il quale diede luogo alla formazione di solfati di calcio e di magnesio.

Qua e là nella roccia attraversata si è avvertita la presenza di qualche frattura conseguente alla dislocazione subita dalla serie stratigrafica. Una di queste fratture si è determinata sul lato nord della caverna ed è stata la causa di un piccolo franamento locale.

Il disegno (fig. 2) riproduce in sezione il rivestimento della caverna con l'indicazione di tale franamento, sul lato sinistro della figura. La parte superiore della frattura si trova in continuazione coll'intradosso della volta.

Il puntone di controventatura in calcestruzzo armato è indicato nella parte inferiore della sezione.

Nella fotografia (fig. 3) è visibile chiaramente l'andamento stratigrafico verticale, quasi parallelo al lato minore del vano (parete di fronte nella fotografia). E' pure visibile il controvento in calcestruzzo che farà poi parte delle fondazioni delle macchine, costruito preliminarmente per la maggiore sicurezza dei rivestimenti laterali.



C. SEMENZA - *Centrali in caverna.*

TAV. III.



FIG. 1

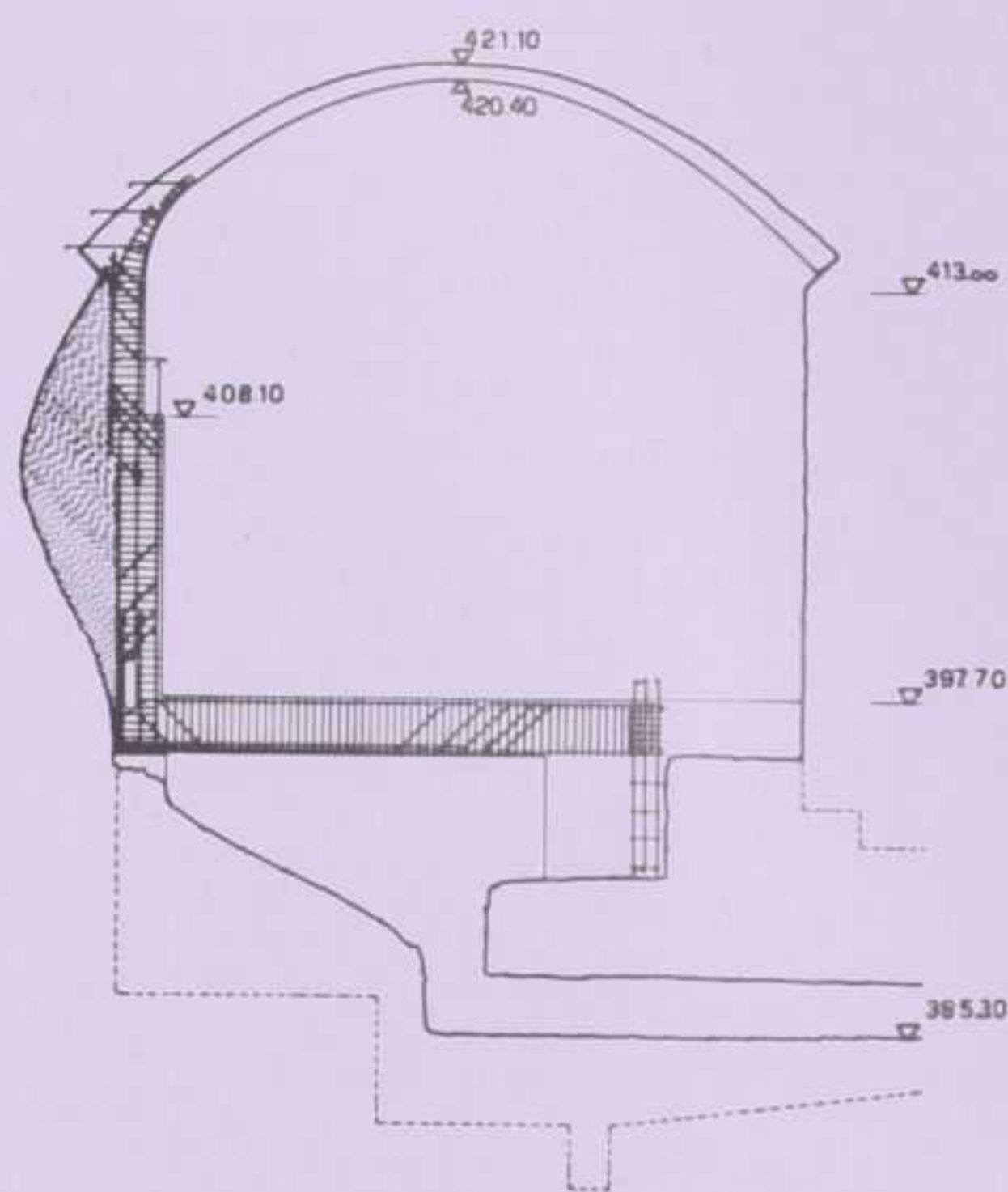


FIG. 2



FIG. 3



THE UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS

1900

THE UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS

THE UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS

1900

1900



TAVOLA IV.



## SPIEGAZIONE DELLA TAVOLA IV.

(Note geologiche del Prof. Giorgio DAL PIAZ).

FIGG. 1 - 2 - CENTRALE DI PLAVA (Impianti Medio Isonzo)

Periodo di costruzione 1938-1940

Il calcare cretaceo nel quale è scavata la centrale di Plava è risultato una delle rocce più favorevoli dal punto di vista della costruzione. La galleria di derivazione è scavata in parte nello stesso calcare, in qualche tratto invece in alternanze di arenarie calcarifere e marne, chiamate comunemente col nome di Flysch.

Date le notevoli dimensioni della galleria il lavoro di scavo e rivestimento presenta qualche analogia con quello che si deve eseguire per le grandi centrali in caverna: si è perciò ritenuto utile illustrarlo colle due fotografie allegate.



C. SEMENZA - *Centrali in caverna.*

TAV. IV.



FIG. 1



FIG. 2



