

# SCelta E DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI GEOMECCANICI RELATIVI ALLO STUDIO DELLA STABILITA' DELL'AMMASSO ROCCIOSO INTERESSATO DAGLI SCAVI DELLA CENTRALE IN CAVERNA DELL'IMPIANTO IDROELETTRICO LAGO D'AVIO-EDOLO

G. FORZANO

Ingegnere - ENEL - C.P.C.I.E. - Venezia

T. MORO

Geologo - ENEL - C.P.C.I.E. - Venezia

G. VALLINO

Ingegnere - ENEL - C.P.C.I.E. - Venezia

A. FRASSONI

Ingegnere - ISMES - Bergamo

P.P. ROSSI

Ingegnere - ISMES - Bergamo

A. ZANINETTI

Ingegnere - ENEL - CRIS - Milano

## SOMMARIO

Lo studio della stabilita' degli scavi della centrale di Edolo, in corso di costruzione nell'Alta Val Camonica, si è sviluppato in piu' fasi. Gli autori espongono i criteri relativi alla scelta ed alla determinazione delle caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso necessari all'esame della stabilita' locale e di massa.

In particolare sono evidenziate le modalita' delle prove relative alla determinazione dei valori della coesione di picco e residua, mediante il metodo deduttivo basato su misure di convergenza, prove in parete con martinetti piatti e calcolo analitico mediante modello analitico geomeccanico semplificato secondo Amberg-Lombardi (1974).

## PREMESSA

Lo studio relativo alla stabilita' degli scavi della centrale in caverna di Edolo, attualmente in costruzione nell'Alta Val Camonica nei pressi del Comune omonimo, si è sviluppato, sinteticamente, in cinque fasi:

- il rilevamento geologico della zona;
- la scelta e la determinazione delle caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso;
- l'esame della stabilita' locale e di massa degli scavi mediante modelli numerici;
- la determinazione dell'eventuale sostegno delle pareti dello scavo;
- la verifica, nel corso dei lavori, delle caratteristiche geomeccaniche assunte, mediante il confronto fra i risultati del calcolo e le misure ricavate in sede di scavo per mezzo di un'apposita strumentazione.

La prima fase (geologica) è stata illustrata nella precedente nota del dott. Moro, la seconda fase, relativa alle caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso, verrà descritta nel presente intervento mentre la terza fase (modelli numerici) e la quinta fase (verifica nel corso dei lavori) verranno illustrate nella successiva nota dell'ing. Borsetto. La quarta fase, relativa all'eventuale sostegno delle pareti dello scavo, non viene trattata in quanto non rientra nel tema di questa Sessione Speciale.

Nella presente nota vengono illustrati i criteri e le metodologie utilizzate per la individuazione dei parametri geomeccanici necessari per l'analisi di stabilita' locale e di massa delle cavita' costituenti la centrale di Edolo.

## 2 - SCELTA DEI PARAMETRI GEOMECCANICI

La caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso roccioso è stata eseguita sia in laboratorio, con prove su campioni, sia in situ con prove ed osservazioni sul comportamento dello scavo di piccoli cunicoli, allo scopo di determinare i parametri tensionali e deformativi relativi all'ammasso stesso.

I parametri geomeccanici si possono infatti suddividere in due gruppi:

- a) parametri necessari a caratterizzare la roccia costituente l'ammasso roccioso (ricavabili da prove in laboratorio);
- b) parametri relativi al comportamento dell'ammasso roccioso nel suo complesso (ricavabili da prove in situ e da misurazioni interessanti comunque significative porzioni dell'ammasso stesso).

Tra i parametri del secondo gruppo, necessari per il calcolo mediante modello numerico, meritano un discorso particolare i parametri coesivi (di picco e residui) in quanto questi parametri, non essendo a tutt'oggi determinabili con misure dirette, hanno richiesto la messa a punto e l'utilizzo di un metodo di

determinazione basato su misure di convergenza ed interpretazione delle stesse mediante un modello analitico semplificato.

3 - PROVE GEOMECCANICHE DI LABORATORIO

Sui campioni prelevati dai cunicoli appositamente scavati, sono state eseguite prove di laboratorio sui due litotipi riscontrati per determinare i seguenti parametri:

- peso di volume secco, peso specifico e porosità;
- velocità sonica, ricavata da prove sui campioni cilindrici utilizzati successivamente per le prove di compressione monoassiali e triassiali;
- resistenza alla compressione eseguite su provini cilindrici del diametro di 61 mm ed 85 mm, rispettivamente per i due litotipi esistenti nella centrale di Edolo;
- modulo di deformazione lineare "E" e coefficiente di Poisson "ν" determinati mediante misure su provini cilindrici sottoposti a compressione triassiale (fig. 1); sono stati utilizzati i valori medi secanti nell'intervallo 0 ÷ 200 kg/cm<sup>2</sup>;

IMPIANTO DI EDOLO  
LITOTIPO 1  
PROVE DI COMPRESSIONE TRIASSIALE

RELAZIONE TRA MODULO ELASTICO E CARICO DI CONTENIMENTO

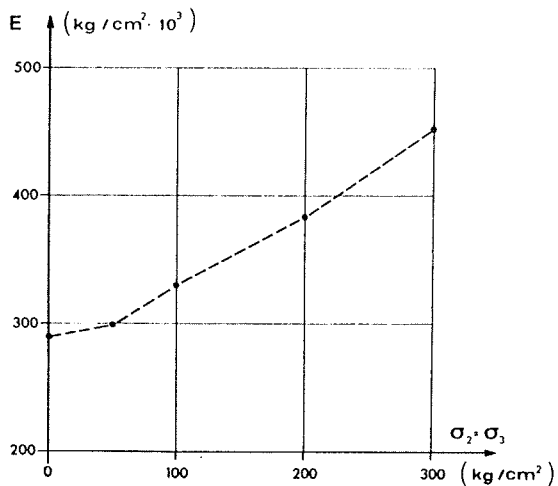


Fig. 1

- resistenza a trazione "σ<sub>t</sub>" ricavata dalla prova "brasiliiana" eseguita su provini cilindrici;
- coesione di picco "c<sub>p</sub>" ricavata da prove di compressione triassiale (fig. 2), eseguite su provini cilindrici; il valore della coesione di picco è stato ricavato estrapolando una curva intrinseca media

di tipo parabolico, involupante i cerchi di Mohr;

IMPIANTO DI EDOLO  
PROVE TRIASSIALI SUL LITOTIPO 1

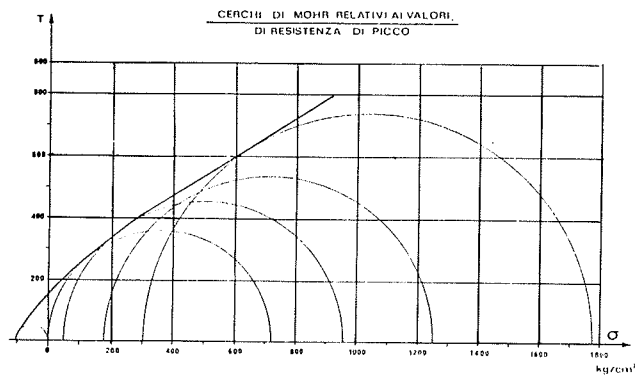


Fig. 2

- angolo d'attrito di picco "φ<sub>p</sub>" ricavato dalle prove triassiali di cui al punto precedente e misurato in corrispondenza del contenimento pari a 200 kg/cm<sup>2</sup>;
- coesione residua "c" ed angolo d'attrito residuo "φ<sub>r</sub>" (fig. 3), ricavati da prove di compressione triassiale eseguite con pressa oleodinamica dotata di servocontrollo del carico e delle deformazioni.

IMPIANTO DI EDOLO  
PROVE TRIASSIALI SUL LITOTIPO 2

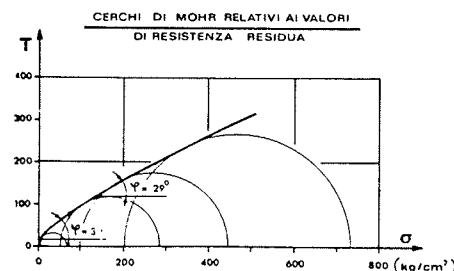
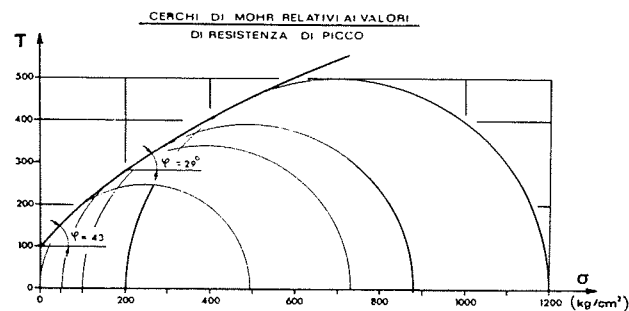


Fig. 3

In particolare (fig. 4) i valori residui di resistenza sono stati ricavati non con riferimento alla resistenza ultima del materiale ma alla resistenza corrispondente ad un determinato tasso di deformazione;

IMPIANTO DI EDOLO  
PROVE TRIASSIALI SUL LITOTIPO 2

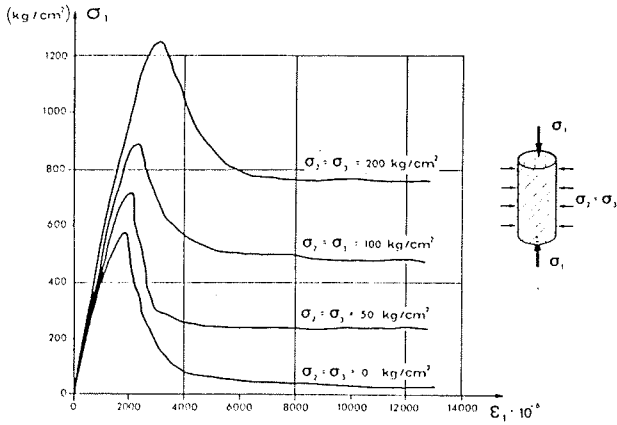


Fig. 4

coesione di picco ed angolo d'attrito di picco, ricavati da prove di taglio (fig. 5) eseguite su provini ottenuti da carote di diametro pari a 123 mm e con pressione di contenimento compresa tra 25 e 200 kg/cm<sup>2</sup>; i valori residui della coesione e dell'angolo d'attrito, relativi ad un definito piano di scorrimento (fig. 6), sono state ricavate da una pressa oleodinamica dotata di servocontrollo del carico e delle deformazioni.

IMPIANTO DI EDOLO  
Registrazione tipica di una prova di taglio su campione di litotipo 1  
Pressione di contenimento  $\sigma_3 = 200 \text{ kg/cm}^2$

Fig. 5

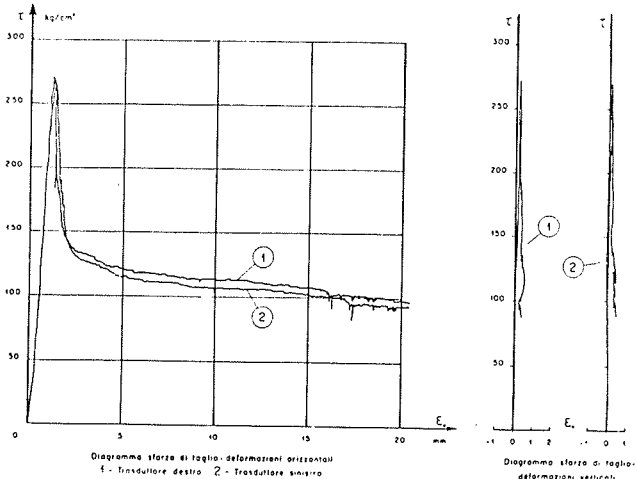
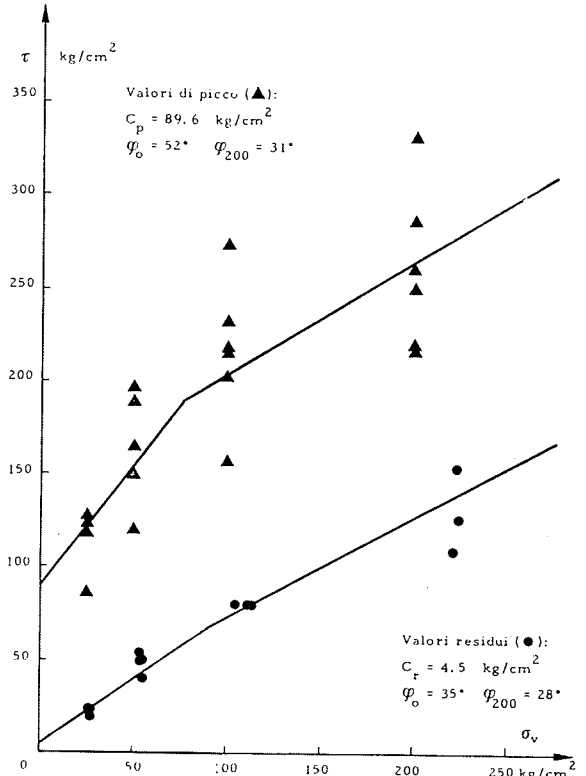


Diagramma sforzo di taglio - deformazioni orizzontali  
1 - trasduttore destro 2 - trasduttore sinistro

Diagramma sforzo di taglio - deformazioni verticali

IMPIANTO DI EDOLO  
Prove di taglio su campioni di roccia tipo 1



Rappresentazione del legame sforzo normale - resistenza al taglio

Fig. 6

4 - PROVE E MISURE GEOMECCANICHE IN SITU

Sono state eseguite, in cunicoli appositamente scavati (fig. 7), prove e misure per determinare i seguenti parametri:

- velocità sismica "v" ricavata da misure di sismica a rifrazione lungo la galleria d'accesso su basi distanti fra di loro 10 m;
- caratteristiche di fratturazione "RQD" e indice di fratturazione "i" ricavati dal campionamento con doppio carotiere eseguito negli stessi fori nei quali sono state eseguite le misure dello stato di sollecitazione originario;
- stato di sollecitazione originario mediante la tecnica "door stopper";
- modulo di deformazione lineare "E in situ" (fig. 8) valutato mediante l'esame globale dei risultati delle prove di carico su piastra, eseguite con tecnica che consenta di escludere l'effetto della fascia superficiale allentata e di valutare quindi il valore medio della deformabilità dell'ammasso roccioso indisturbato; il carico è stato applicato mediante organi di spinta altamente

IMPIANTO DI EDOLO  
Ubicazione cunicoli prove

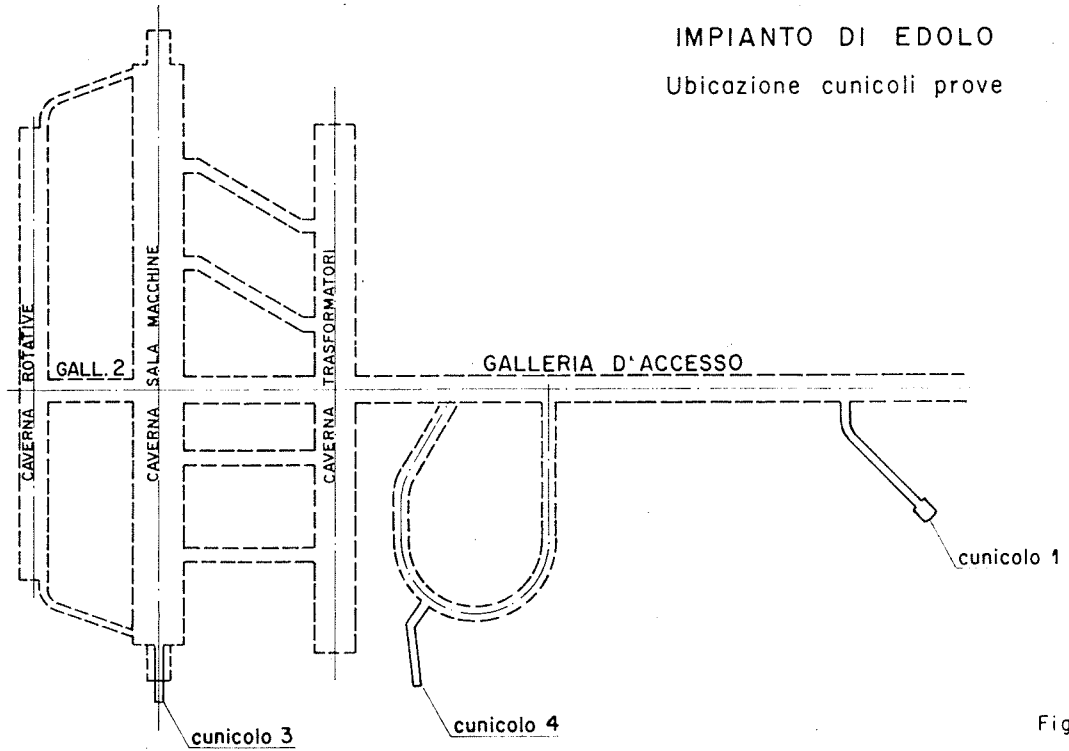


Fig. 7

deformabili direttamente a contatto con la superficie rocciosa preventivamente spianata (fig. 9);

- tensione tangenziale " $\sigma_{tang}$ " nella roccia plasticizzata misurata (fig. 10) mediante martinetti piatti inseriti in un taglio di direzione radiale (fig. 11);
- misure di convergenza su cunicoli di sezione circolare o a ferro di cavallo, disponendo le basi di misura a ridosso del fronte di scavo e misurando poi la

deformazione della sezione di scavo con la prosecuzione dello scavo stesso e misura della deformazione rocciosa "ante" fronte di scavo, mediante estensimetri a due basi preventivamente installati.

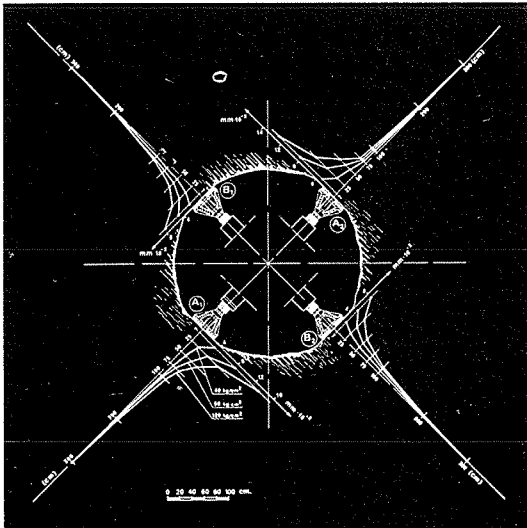


Fig. 8

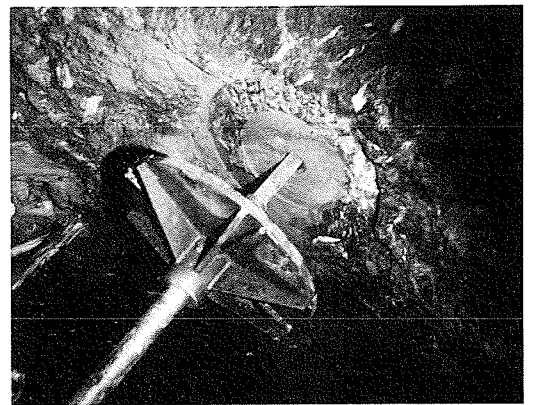


Fig. 9

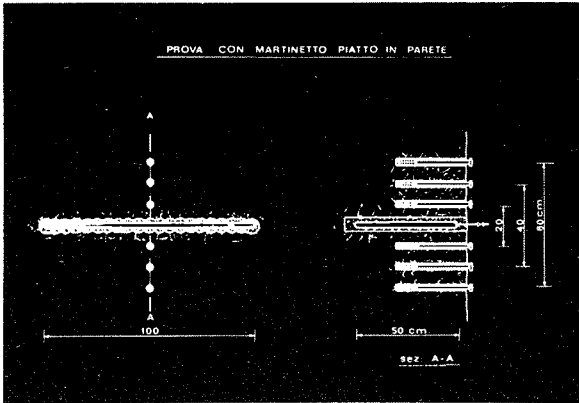


Fig. 10

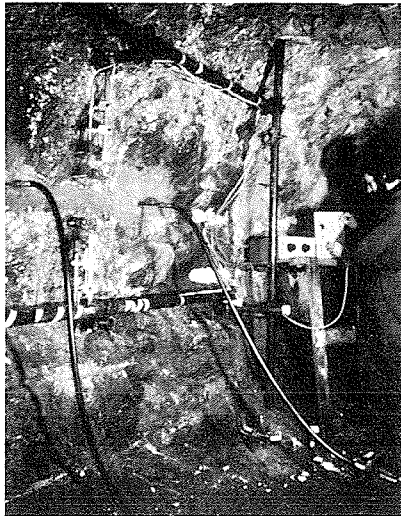


Fig. 11

5 - DETERMINAZIONE DEI VALORI DELLA COESIONE DI PICCO E RESIDUA DELL'AMMASSO ROCCIOSO

Come si è detto, non esiste a tutt'oggi la possibilità di una determinazione diretta, mediante prove in situ, dei valori dei parametri coesivi di un ammasso roccioso. Per la individuazione dei detti parametri, si è utilizzato il metodo deduttivo basato su prove in situ, su misure di convergenza e sul calcolo mediante un modello geomeccanico analitico semplificato basato sulla teoria delle linee caratteristiche secondo la formulazione Amberg-Lombardi (1974). In particolare si è adottata una schematizzazione geometrica bidimensionale di forma circolare assialsimmetrica. Lo stato di sollecitazione, dato l'alto coefficiente di isotropia rilevato (0,70), è stato assunto di tipo idrostatico. L'ammasso roccioso è stato considerato isotropo ed

omogeneo con comportamento alla Mohr-Coulomb elastico-plastico-fragile non dilatante. La verifica analitica delle deformazioni rilevate per mezzo delle misure di convergenza ha consentito di ricavare, definiti tutti i rimanenti parametri mediante i valori medi forniti dalle prove in situ ed in parte di laboratorio, le possibili coppie dei valori della coesione di picco e residua (fig. 12) compatibili con la deformazione stessa.

Curve parametriche  $C_p=f(C_r)$

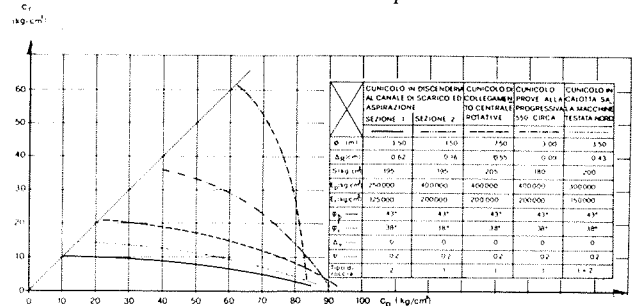


fig. 12

Le misurazioni della tensione tangenziale, eseguite nella zona di roccia plasticizzata, hanno consentito, come già detto, di calcolare i valori della coesione residua e di determinare quindi anche il corrispondente valore della coesione di picco (fig. 13).

Tensioni tangenziali  $\sigma_\theta = f(C_r)$

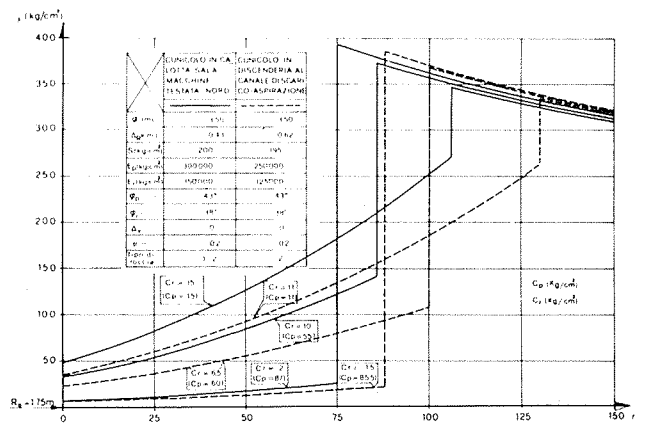


Fig. 13

I valori dei parametri geomeccanici utilizzati sono riassunti nella tabella di figura 14, rispettivamente per i due litotipi presenti nell'ammasso roccioso della centrale di Edolo.

IMPIANTO DI EDOLO

roccia tipo 1: mica scisto  
roccia tipo 2: scisto laminato

PROVE DI LABORATORIO

ROCCIA TIPO	PROVE MONOASSIALI			FRATTURAZIONE	PROVE TRIASSIALI			PROVE DI TAGLIO				VELOCITA' ULTRASONICA	
	$\sigma_c$ Kg/cm <sup>2</sup>	$E_{lab}$ Kg/cm <sup>2</sup> $\times 10^3$	$\nu$		$\sigma_1$ Kg/cm <sup>2</sup>	$\sigma_2$ Kg/cm <sup>2</sup>	$\varphi$	$\sigma_p$	$\varphi_p$	$\sigma_r$	$\varphi_r$	$v$ m/s	$E_{din}$ Kg/cm <sup>2</sup> $\times 10^3$
1	640	290	0,2	95	150	39°	90	31°	4,5	28°	3800	350	
2	450		0,2		100	39°							

PROVE IN SITU

ROCCIA TIPO	FRATTURAZIONE			SISM. A RIFR.	MISURE CONVERGENZA					
	RQD %	$l$ fratt/m	$v$ m/s		$E_{situ}$ piccolo Kg/cm <sup>2</sup> $\times 10^3$	$E_{situ}$	$\nu$	$\varphi_p$	$\varphi_r$	$\sigma_p$ Kg/cm <sup>2</sup>
1	78	6,8	5060	400	200	0,2	43°	38°	30	15
2				250	125	0,2	43°	38°	15	11

\* valori stimati

Fig. 14

6 - CONCLUSIONI

Per concludere, è opportuno rilevare che mentre oggi il progettista ha a sua disposizione modelli numerici di soddisfacente attendibilità per la simulazione del comportamento deformativo delle cavità in ammassi rocciosi, non altrettanto avviene per le tecniche di prova per la determinazione di alcuni dei parametri geomeccanici dell'ammasso roccioso. In particolare le tecnologie di prova in situ non consentono ancora di rilevare direttamente i valori dei parametri coesivi e di attrito. Questa carenza ha comportato la necessità, nel caso della centrale di Edolo, di ricorrere ad un metodo in parte basato su prove in situ ed in parte basato su elaborazioni analitiche eseguite con modelli matematici approssimativi, per dedurre i valori numerici da attribuire alla coesione di picco e residua. Sarebbe auspicabile per il futuro indirizzare gli sviluppi delle tecnologie di prova verso l'obiettivo di colmare le suddette lacune. E' stato inoltre confermato come sia estremamente utile per un progettista, prima di iniziare i lavori di scavo di opere di dimensioni importanti, verificare l'attendibilità globale dei valori numerici dei parametri geomeccanici mediante il controllo del comportamento deformativo dell'ammasso roccioso sia pure a piccola scala, con misure di convergenza in cunicoli appositamente scavati. A tale proposito sarebbe opportuno approfondire la conoscenza della struttura dell'ammasso roccioso per una più corretta interpretazione delle misure di convergenza in funzione dello stato di fratturazione dell'ammasso stesso. Ci sembra infine di notevole interesse l'esecu-

zione delle prove di compressione triassiale spinte fino alla resistenza ultima del materiale, le quali forniscono, sia pure con riferimento al solo materiale roccioso, preziose indicazioni sul rapporto tra la resistenza di picco e residua (coesione ed angolo d'attrito), data la già citata attuale carenza di attendibilità di prove in situ per la determinazione di detti parametri.

BIBLIOGRAFIA

- W.A. AMBERG - G. LOMBARDI - (1974) - Une méthode de calcul élasto-plastique de l'état de tension et de deformation autour d'une cavité souterraine - Denver.
- F. CAPOZZA - (1970) - Schema di programma di indagini in situ ed in laboratorio per definire le caratteristiche di un ammasso roccioso in vista della progettazione di grandi opere in sotterraneo - Relazione interna ENEL - Roma.
- G. LOMBARDI - (1975) - Nuovi concetti sulla statica delle gallerie - Ingegneria ferroviaria.
- G. LOMBARDI - (1975) - Qualche aspetto particolare della statica delle cavità sotterranee - Rivista Italiana di Geotecnica - n. 11.
- G. LOMBARDI - (1970) - The influence of rock characteristics on the stability of rock cavities - Tunnels and Tunneling, Genn - Marzo.
- G. MANEV - E. AVRAMOVA - TACHEVA - (1970) - On the valuation of strenght and resistance condition of the rocks natural rock massif - Beograd.
- R. RIBACCHI - R. RICCIONI - Stato di sforzo e di deformazione intorno ad una galleria circolare - Gallerie e grandi opere sotterranee, n. 4.
- R. RIBACCHI - (1978) - L'influenza delle forze di volume sullo stato di sollecitazione intorno ad una galleria circolare - Rivista Italiana di Geotecnica - n. 1.
- G. MANFREDINI, S. MARTINETTI, P.P. ROSSI, A. SAMPAOLO - (1974) - Observation on the procedure and on the interpretation of the plate bearing test, III Congr. Int. Soc. Rock Mech., Denver Colorado (U.S.A.) Settembre vol. II.

## SUMMARY

The design for a generation and pumping storage plant to be built by ENEL's Hydraulic and Electrical Design and Construction Centre of Venice at Edolo in the Camonica valley, near Brescia, is now at an advanced stage.

Near the village of Edolo the excavation is in progress for the underground power station which will consist of three side by side caverns with parallel longitudinal axis. These caverns will respectively lodge the rotary valves, the hydraulic and electric equipment and the transformers.

The three caverns main size (width, length and height) are: 9,50 x 134 x 15 m for the rotary valves room, 16 x 175 x 47 m for the machine hall and 14 x 164 x 20 m for the transformer hall.

The three caverns are located in the valley left side and can be reached through a sloping tunnel about 700 m in length.

The stability design of the rock formation in which the three caverns are excavated, has developed in five stages:

- the geological investigations;
- the choice and the determination of the geomechanical parameters of the rock mass;
- the study of the local and mass stability of the rock formation by means of mathematical models;
- the design of the possible reinforcement of the excavation walls;
- the verification of the chosen geomechanical parameters, during the works, through the comparison between the calculation results and the measures obtained during the excavation by means of a proper equipment.

The writers describe the design principles of the choice and of the determination of the geomechanical rock mass parameters, which are necessary for the study of the local and mass stability of the caverns by means of mathematical models.

The geomechanical parameters have been divided into two groups:

- 1) Characteristic parameters of the rock, composing the rock formation, by means of laboratory tests and in particular: unit volume weight of dry rock, unit rock weight, porosity; longitudinal wave velocity; tensile and compression strength, modulus of elasticity and Poisson's ratio; peak and residual cohesion and friction angle obtained through triaxial compressive and shear tests carried out by means of an oil press with servo-control of the load and of the deformations.
- 2) Characteristic parameters of the rock mass behaviour, obtained through field tests and measurements on important portions of the rock mass and carried in test tunnels; in particular: longitudinal wave velocity, fracture characteristics and index, in situ state of stress modulus of elasticity by means of plate bearing tests on a beforehand levelled rock surface; convergence measurements "on" and "beyond" the tunnel face; peak and residual cohesion.

The values of the peak and residual cohesion, not directly obtainable, have been got by means of an original procedure which is based on convergence measurements, field tests and calculation through a simplified analytic model based on the theory of characteristic lines according to the Amberg-Lombardi formula (1974).

In particular a bidimensional geometric schematization which is circular-shaped has been chosen. The in situ state of stress has been fixed as of the hydrostatic type because of the determined high isotropy coefficient (0,7). The rock formation has been considered as an isotropic and homogeneous mass with a Mohr-Coulomb non-expanding fragile elasto-plastic behaviour.

The analytical verification of the deformations, surveyed through convergence measurements, has allowed to obtain the possible couples of values of peak and residual cohesion, when the remaining parameters were known through field test.

The measurement of the tangential tensile stress in the plasticized rock band by means of flatjacks permitted to get the value of the residual cohesion and to determine the value of the peak cohesion too.

The chosen values of the geomechanical parameters are summed up in the table of fig. 14, respectively for the two lithotypes, Edolo schists (rock type 1) and laminar schists (rock type 2), composing the rock formation of the underground power station of Edolo.

At the end, the writers point out the great usefulness of the aforesaid method that allowed the designer to verify, before the beginning of the excavation of great size works, the total validity of the numerical values of geomechanical parameters through the control of the rock mass deformation, also even on little scale, with convergence measurements tunnels excavated to this purpose.

