

STIMA DELLA CONDUCIBILITÀ IDRAULICA IN AMMASSI ROCCIOSI

ESTIMATES OF HYDRAULIC CONDUCTIVITY IN ROCK FORMATIONS

ALBERTO CLERICI(*) & FRANCESCO SFRATATO(**)

(*) Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio e Ambiente - Università degli Studi di Brescia

(**) Geologo, Domodossola - frasfra@tiscali.it

RIASSUNTO

La presente nota espone i risultati ottenuti nella stima della conducibilità idraulica in ammassi rocciosi a seguito dell'applicazione di alcuni dei metodi empirici e semi-empirici noti in bibliografia.

Considerato che l'esecuzione di misure dirette di conducibilità idraulica sugli ammassi rocciosi fratturati è di fatto impossibile in superficie e risulta complessa e costosa in profondità, l'analisi di alcuni ammassi rocciosi ubicati in Valtellina ha fornito lo spunto per una applicazione dei metodi empirici e per svolgere alcune considerazioni sull'argomento.

Lo studio ha evidenziato che le metodologie empiriche s.s. per il calcolo della permeabilità che forniscono una stima della permeabilità basata unicamente sulla profondità, benché permettano una definizione sufficientemente precisa della permeabilità, non possono essere considerate soddisfacenti in quanto, ovviamente, non sono in grado di risentire di variazioni laterali della permeabilità legate al cambiamento delle condizioni geomeccaniche dell'ammasso roccioso ed in particolare a differenze nelle condizioni delle discontinuità.

Tra le varie metodologie applicate il metodo "dell'interlayer model", almeno nel caso puntiforme esaminato, ha fornito una stima di permeabilità dell'ammasso roccioso con differenze relativamente modeste rispetto alle misure dirette effettuate in sito; tali differenze sono state ulteriormente ridotte con l'inserimento, nel processo di stima, di una legge di variazione della spaziatura con la profondità.

TERMINI CHIAVE: ammasso roccioso, conducibilità idraulica, metodi indiretti

INTRODUZIONE

Sono numerosi e tra loro molto diversi i campi della Geologia Applicata nei quali risulta necessaria o indispensabile la conoscenza della conducibilità idraulica degli ammassi rocciosi, come ad esempio nello studio delle rocce di fondazione di uno sbarramento idraulico, nella caratterizzazione degli ammassi rocciosi di un invaso, nel bilancio idrico di un bacino, negli studi idrogeologici per approvvigionamento, vulnerabilità e difesa di acquiferi, nelle previsioni di venute d'acqua in opere in sotterraneo, nell'analisi delle condizioni di equilibrio di un versante.

La conducibilità idraulica degli ammassi rocciosi, analogamente a quanto avviene nelle terre, è un parametro che ha un campo di variabilità estremamente ampio, che supera i dieci ordini di grandezza.

ABSTRACT

This paper presents some experimental results from estimates of hydraulic conductivity in rock formations using empirical and semi empirical methods in the literature.

Given that direct measurement of hydraulic conductivity in fractured rock formations is impossible at the surface and complicated and costly at depth, the study of some rock masses in Valtellina has provided us with the opportunity to apply empirical methods in investigating the hydraulic conductivity of rock formations.

The study has show that the simplest empirical methods for calculating permeability which estimate permeability exclusively on the basis of depth, cannot be considered satisfactory in that they do not account for eventual lateral variations in permeability associated with changes in the geomechanical or fracture characteristics of the rock formation.

The Interlayer Model provided permeability estimates in the case in question relatively close to the results of direct field measurements. The error was reduced by inserting into the equation a factor accounting for variation of spacing with depth.

KEY WORDS: Rock mass; hydraulic conductivity; indirect methods.

INTRODUCTION

There are numerous and various fields of applied geology where information regarding the hydraulic conductivity of rock formations is necessary. Examples include studies of the bedrock underlying a hydraulic barrier, the characterization of the storage capacity of rock formations, the hydrological balance of a basin, hydrogeological studies for water supply, aquifer vulnerability and protection studies, estimates of water infiltrations in subterranean works, or slope stability analyses.

The hydraulic conductivity of rock formations, analogously to its counterpart in soil, is a value with an extremely broad range of variation that exceeds ten orders of magnitude. Direct measure-

La misura diretta della conducibilità idraulica negli ammassi rocciosi è sempre una attività tecnicamente complessa e costosa che, di conseguenza, viene spesso tralasciata, tranne che nei progetti maggiori ed in particolare nello studio degli ammassi rocciosi di fondazione di dighe dove, comunque, le misure sono per lo più trascurate nelle prime fasi della progettazione dell'opera.

Da quanto sopra segue la necessità di acquisire indicazioni riguardanti la conducibilità degli ammassi rocciosi almeno per via indiretta, cioè mediante stime. Queste possono essere eseguite con criteri diversi in funzione, soprattutto, dell'estensione dell'area di studio e delle finalità dell'indagine: si va così dalle stime qualitative relative a vaste aree e basate sulle caratteristiche geologiche (sedimentologiche, petrografiche, strutturali) delle formazioni interessate, con indicazioni anche solo di massima (permeabilità bassa, media o alta), alle stime quantitative, per lo più impostate su criteri empirici, relative ad aree ristrette.

L'occasione messaci a disposizione dalla AEM S.p.A. di Milano, che sta potenziando i propri impianti di produzione idroelettrica in Valtellina, ha fornito lo spunto per una applicazione dei metodi empirici e per svolgere alcune considerazioni sull'argomento.

LA STIMA DELLA CONDUCIBILITÀ IDRAULICA DEGLI AMMASSI ROCCIOSI IN AREE RISTRETTE

Nei casi in cui l'area di studio risulti limitata, come avviene normalmente nell'ambito della progettazione di un'opera ingegneristica, è possibile giungere ad una stima della conducibilità idraulica degli ammassi rocciosi eseguendo rilievi geomeccanici di dettaglio sugli affioramenti presenti, in quanto è ben noto che il comportamento idraulico di un ammasso dipende innanzi tutto dalle caratteristiche delle discontinuità che sono appunto l'oggetto principale dei rilievi geomeccanici (CLERICI *et alii*, 1986); è inoltre possibile, partendo da questi stessi dati di superficie, avere una stima della conducibilità idraulica degli ammassi anche in profondità.

In questa nota vengono presi in considerazione solo i metodi di stima della conducibilità idraulica che siano derivati da esperienze dirette (metodi empirici) e che siano basati su parametri effettivamente misurabili; vengono cioè trascurati quei metodi che risultano, di fatto, difficilmente applicabili in un contesto concreto perché in qualche modo dipendenti da parametri non rilevabili in sito. Purtroppo, va subito notato che "*Illustration of methods of permeability estimation is constrained by lack of published data*" (LEE & FARMER, 1993); sull'argomento si tornerà più avanti.

I criteri empirici sono basati su esperienze maturate in condizioni dove si sono potute svolgere misure dirette e dove queste sono state poste a confronto con alcune caratteristiche significative degli ammassi rocciosi e in particolare, come detto, delle discontinuità.

La definizione della conducibilità idraulica all'interno di un ammasso roccioso fratturato risulta complessa anche a causa dell'elevato numero di parametri che lo influenzano (come giacitura, persistenza, spaziatura, apertura, forma e rugosità delle discontinuità) e della variabilità degli stessi nello spazio.

ments of hydraulic conductivity are very complex and costly and are thus often omitted, except in major projects and especially in studies of bedrock foundations of dams, although even here the measurements are generally omitted from the early phases of design.

Information on the hydraulic conductivity of rock formations must thus be obtained indirectly via estimation methods. Different methods are available depending on the extent of the study area and the purpose of the investigation. These range from qualitative estimates of broad areas based on geological characteristics (sediment, petrographic, or structural analyses) of the formations under consideration and producing very generalized results (low, medium, or high permeability), to quantitative estimates for more limited areas, generally based on empirical criteria.

AEM S.p.A. of Milan is increasing its hydroelectric power production capacity in Valtellina and has provided us with the opportunity to apply empirical methods in investigating the hydraulic conductivity of rock formations.

THE ESTIMATION OF HYDRAULIC CONDUCTIVITY IN ROCK FORMATIONS IN LIMITED AREAS

In cases where the study area is of limited extent, as is often the case in civil engineering projects, the hydraulic conductivity of superficial rock formations may be estimated by means of detailed geomechanical measurements on outcrops. It is well known that the hydraulic behavior of a rock formation depends mainly on the characteristics of its discontinuities or joints, which are the main object of geomechanical measurements (CLERICI *et alii*, 1986). On the basis of these surface data, methods exist to estimate the hydraulic conductivity of the rock formation at depth.

In this paper we consider only the estimation methods deriving from direct experience (empirical methods) and based on measurable characteristics. We thus exclude those methods which are difficult to apply in a concrete context because in one way or another they depend on characteristics that cannot be measured in the field. Unfortunately we must immediately note that "illustration of methods of permeability estimation is constrained by lack of published data" (LEE & FARMER, 1993). We will return to this question below.

The empirical criteria have been developed on the basis of direct measurements which were compared with a number of significant characteristics of the rock formation in question, especially its joint system.

The determination of hydraulic conductivity in rock formations is complex also because of the high number of factors influencing it (such as joint orientation, extent, spacing, aperture, shape, and roughness) and their spatial heterogeneity.

I METODI EMPIRICI CONSIDERATI

Di seguito vengono presentati alcuni criteri empirici utilizzati per la stima della conducibilità idraulica degli ammassi rocciosi fratturati ed i risultati ottenuti con la loro applicazione vengono, successivamente, confrontati con alcune misure dirette effettuate in foro nel corso di prove Lugeon. Va subito ricordato chiaramente che la permeabilità calcolata partendo da prove Lugeon non può essere considerata *tout court* la conducibilità idraulica di un ammasso: a questa, però, in molti casi pratici ci si riferisce e, seppure esistano anche problemi interpretativi dei dati di prova, è su questo dato sperimentale che molti progetti vengono impostati.

In ogni caso si considera che la matrice rocciosa abbia una permeabilità trascurabile e che quindi il flusso idrico avvenga unicamente attraverso le discontinuità; inoltre si ipotizza che la distribuzione delle discontinuità nell'ammasso sia statisticamente omogenea.

Il metodo della soglia di percolazione (WEI Z. Q., EGGER P. & DESCOEUDRES F., 1995) considera innanzi tutto come la permeabilità sia strettamente influenzata dalla lunghezza (persistenza) L e dalla spaziatura (S) delle discontinuità; in particolare l'ammasso è permeabile quando la lunghezza media delle discontinuità è maggiore del doppio della spaziatura totale (reciproco della frequenza totale delle discontinuità), oppure quando è maggiore della spaziatura media delle diverse famiglie.

Inoltre viene definito un volume rappresentativo elementare tale che, se la lunghezza delle discontinuità è maggiore di 10-15 volte la spaziatura, la permeabilità può essere calcolata come se la lunghezza delle discontinuità fosse infinita, e quindi ottenibile con la relazione che ipotizza la presenza di un ammasso roccioso caratterizzato da tre set di discontinuità ortogonali tra loro (SNOW, 1968):

$$K_0 = 1/6 \cdot e^3 / S_{a0}$$

dove *e* rappresenta l'apertura idraulica delle discontinuità ed *S_{a0}* è la spaziatura media delle discontinuità delle diverse famiglie.

Per ottenere l'apertura idraulica superficiale, BARTON *et alii*, (1985) forniscono la seguente relazione:

$$e_i = e_i^2 / JRC^{2.5}$$

dove:

e_i = apertura meccanica (µm), cioè la misura dell'apertura rilevabile in sito;

JRC = *Joint Roughness Coefficient*.

In alternativa si può impiegare il metodo di WEI *et alii* (1995):

$$e_i = k_i \cdot V_m$$

dove *V_m* in accordo con il metodo di Barton è dato da:

$$V_m = A + B \cdot (JRC) + C \cdot \left[\frac{JCS}{E_0} \right]^D \quad (\text{mm})$$

$$E_0 = \frac{JRC}{5} \cdot \left(0,2 \frac{\sigma_c}{JCS} - 0,1 \right) \quad (\text{mm})$$

A = - 0,2960
C = 2,241

B = - 0,0056
D = - 0,2450

THE EMPIRICAL METHODS EXAMINED

Below we examine some empirical methods used for estimating hydraulic conductivity in fractured rock formations. Their results are compared with direct downhole measurements obtained by means of Lugeon tests used as reference values. We must immediately point out that the permeability calculated on the basis of Lugeon tests cannot be considered to represent the definitive determination of the hydraulic conductivity of a rock formation. However, in spite of issues associated with the interpretation of test data this is the value used in a great number of practical cases.

In any case, it is assumed that a rocky matrix has negligible permeability and hence that groundwater flow is almost exclusively confined to the joints. Furthermore, it is assumed that the joints are evenly distributed throughout the rock formation.

The Percolation Threshold method (WEI Z. Q., EGGER P. & DESCOEUDRES F., 1995) posits that permeability is strictly influenced by joint length (extent) L and spacing (S). The formation is considered permeable when the average length of the joint is greater than twice the total spacing (reciprocal of total joint frequency), or else when it is greater than the average spacing of the different joint families.

Furthermore, an elementary representative volume is specified such that if the joint length is greater than 10 to 15 times the spacing it may be treated as being infinite and permeability may be calculated using an equation that assumes the presence of three perpendicular joint systems in the rock formation (SNOW, 1968):

$$K_0 = 1/6 \cdot e^3 / S_{a0}$$

where *e* is the hydraulic aperture of the joint and *S_{a0}* is the average spacing of the joints in the different families.

BARTON *et alii*, (1985) provide the following equation to obtain the superficial hydraulic aperture:

$$e_i = e_i^2 / JRC^{2.5}$$

where:

e_i = mechanical aperture (µm) measured in the field;
JRC = *Joint Roughness Coefficient*.

An alternative approach is the method of WEI *et alii* (1995):

$$e_i = k_i \cdot V_m$$

where *V_m* is obtained via the Barton method:

$$V_m = A + B \cdot (JRC) + C \cdot \left[\frac{JCS}{E_0} \right]^D \quad (\text{mm})$$

$$E_0 = \frac{JRC}{5} \cdot \left(0,2 \frac{\sigma_c}{JCS} - 0,1 \right) \quad (\text{mm})$$

A = - 0,2960
C = 2,241

B = - 0,0056
D = - 0,2450

dove:

JRC = Joint Roughness Coefficient.

JCS = Joint Wall Compressive Strength.

σ_c = resistenza a compressione monoassiale del materiale roccia.

Nel caso in cui la lunghezza delle fratture sia inferiore a 10-15 volte la spaziatura è invece necessario introdurre un fattore correttivo del tipo:

$$k = (I_d - 2 / I + I_d) k_0$$

dove: $I_d = \lambda_t L = L / S_t$

con λ_t = frequenza totale delle discontinuità.

SNOW (1968) considera invece la permeabilità di un ammasso roccioso avente una famiglia prevalente, con discontinuità regolarmente spaziate e persistenti: in queste condizioni la permeabilità in direzione parallela alle discontinuità della famiglia maggiore può essere calcolata mediante la relazione:

$$k = 1/12 E(e^3) / S$$

dove:

$E(e^3)$ = media del cubo dell'apertura meccanica della frattura;

S = spaziatura tra le fratture.

Il metodo Interlayer Model (DOOLIN & MAULDON, 2000) è stato principalmente utilizzato per lo studio della permeabilità di rocce sedimentarie stratificate ma è applicabile a qualsiasi ammasso in cui vi sia una famiglia di discontinuità ben rappresentata (stratificazione, scistosità, fratturazione) e persistente ed un secondo set di fratture ortogonale a quello principale e le cui discontinuità abbiano le terminazioni in corrispondenza delle discontinuità del primo, come avviene in molti casi (Fig. 1).

Per la stima della permeabilità in direzione parallela alla stratificazione, gli Autori si rifanno alla equazione di Snow mentre, per la stima della permeabilità in direzione perpendicolare alla stratificazione occorre tenere in considerazione anche le perdite di carico dovute al percorso che l'acqua compie tra uno strato e l'altro parallelamente agli strati stessi (Fig. 1).

Viene così introdotto uno strato virtuale di roccia (interlayer) che può essere considerato come uno strato di roccia fratturata. L'interlayer ha una apertura delle fratture che corrisponde all'apertura del piano di strato; la spaziatura di queste fratture deriva da quella degli strati rocciosi adiacenti; mentre lo spessore dell'interlayer corrisponde alla lunghezza $E(L)$ del percorso di flusso lungo la superficie di strato (Fig. 2).

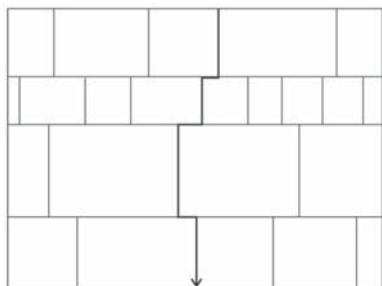


Fig. 1 Sezione di un ammasso roccioso stratificato e fratturato con evidenziato un percorso di flusso perpendicolare alla stratificazione
- Section of a stratified and fractured rock formation showing flow line perpendicular to the stratification

where:

JRC = Joint Roughness Coefficient.

JCS = Joint Wall Compressive Strength.

σ_c = monoaxial compressive strength of the rock matrix.

If the joint length is less than 10 to 15 times the spacing, it is necessary to use a correction factor such as the following:

$$k = (I_d - 2 / I + I_d) k_0$$

where: $I_d = \lambda_t L = L / S_t$

and λ_t = total joint frequency.

SNOW (1968) considers the permeability of a rock formation having a prevailing family (i.e., joint orientation), with regularly spaced and extensive joints. In these conditions the permeability parallel to the major joint family can be calculated using the relation:

$$k = 1/12 E(e^3) / S$$

where:

$E(e^3)$ = average of the cubes of the mechanical fracture aperture;

S = spacing between fractures.

The Interlayer Model (DOOLIN & MAULDON, 2000) is principally used to estimate the permeability of stratified sedimentary rock but is applicable to any formation in which there is a dominant (stratification, schistosity, fracturing) and persistent family of joints and a second set of fractures perpendicular to and interrupted by the main family, as is true in many cases (Fig. 1).

Permeability parallel to the stratification may be estimated using the Snow equation. In estimating permeability perpendicular to the stratification, the flow resistance represented by the jogs in the flow lines where the secondary joint system intersects the main one (Fig. 1) must also be taken into account.

This is done by representing the flow parallel to the stratification as a fractured rock layer (interlayer) as seen in Figure 2. The interlayer has a fracture aperture corresponding to the aperture of the joints parallel to the stratification. The spacing of these fractures is assumed to be the same as that of the adjacent rock strata. The thickness of the interlayer corresponds to the length $E(L)$ of the flow line parallel to the stratification.

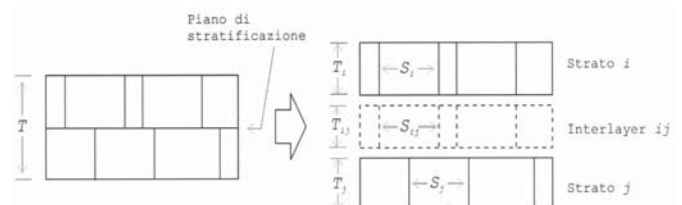


Fig. 2 Rappresentazione grafica del modello dello strato fittizio; T_{ij} è il valore medio del percorso di flusso lungo il piano di stratificazione
- Graphic representation of Interlayer model; T_{ij} is the average length of the flow line along the stratification plane

ESTIMATES OF HYDRAULIC CONDUCTIVITY IN ROCK FORMATIONS

Analizzando i flussi all'interno dei percorsi normali alla stratificazione e nell'interlayer, l'equazione che si ottiene per la permeabilità normale al piano di stratificazione è la seguente:

$$K_{\perp} = \frac{1}{12} \left(\frac{\sum_{i=1}^n T_i}{\sum_{i=1}^n T_i S_i / e_i^3 + \sum_{i=1}^{n-1} S_i S_j / c e_{ij}^3} \right)$$

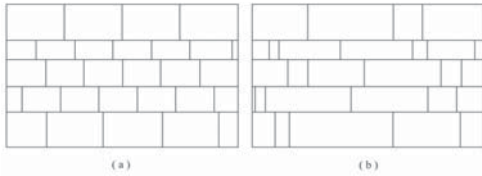
dove:

T_i : spessore dello strato

S_i : spaziatura media tra le fratture

e_i^3 : media dei cubi delle aperture di frattura nello strato i

c = costante dipendente della geometria considerata per le fratture ($c = 2$ geometria a grata e $c = 4$ per la geometria di Poisson).



Stima della variazione della permeabilità con la profondità

Una volta calcolato il valore dell'apertura idraulica e della permeabilità in superficie, si possono calcolare i valori che queste assumono a differenti profondità. Numerose osservazioni in sito hanno mostrato infatti come le caratteristiche geometriche delle discontinuità varino con la profondità: in particolare, mentre lo sforzo normale aumenta con essa, la frequenza, l'apertura delle fratture e , di conseguenza, anche la permeabilità tendono a diminuire. La quantificazione di tali diminuzioni è però controversa: da un lato (BRACE, 1980) viene messo in evidenza come, considerando i risultati di un gran numero di misure in sito, si possa rilevare solo un accenno ad una diminuzione della conducibilità idraulica con la profondità, accenno che non giustifica la proposta di relazioni empiriche di validità generale; d'altra parte, almeno nell'ambito di profondità modeste (che spesso corrispondono a quelle di interesse pratico), diversi Autori rilevano una sistematica variazione dei due parametri che più di altri sembrano condizionare la conducibilità idraulica degli ammassi rocciosi fratturati, l'apertura e la spaziatura delle discontinuità.

LOUIS (1974) ad esempio mette in relazione la conducibilità idraulica con il carico e con la profondità secondo la relazione:

$$k = k_0 e^{-\alpha\sigma}$$

dove:

k_0 : conducibilità idraulica superficiale;

σ : sforzo normale $\approx \gamma Z$;

$A = \alpha \gamma = 7.8 - 3.4 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^{-1}\text{]} .$

WEI & HUDSON (1988) indicano due relazioni che descrivono le variazioni dell'apertura delle discontinuità e della permeabilità con la profondità ovvero:

$$\frac{e}{e_{ci}} = 1 - \frac{Z}{A + BZ}$$

$$\frac{K}{K_i} = \left(1 - \frac{Z}{A + BZ} \right)^3$$

Accounting for flow along lines perpendicular to the stratification planes and in the interlayer, the equation for permeability normal to the stratification plane is:

$$K_{\perp} = \frac{1}{12} \left(\frac{\sum_{i=1}^n T_i}{\sum_{i=1}^n T_i S_i / e_i^3 + \sum_{i=1}^{n-1} S_i S_j / c e_{ij}^3} \right)$$

where:

T_i : stratum thickness

S_i : average spacing between fractures

e_i^3 : average of the cubes of fracture apertures in stratum i

c = fracture geometry constant ($c = 2$ grid geometry, $c = 4$ Poisson geometry).

Fig. 3 Geometria delle fratture a grata e di Poisson. (a) Geometria a grata: fratture confinate all'interno degli strati con spaziatura costante. (b) Geometria di Poisson: fratture confinate all'interno degli strati con distribuzione della spaziature esponenziale negativa
- Grid and Poisson fracture geometry. (a) Grid geometry: evenly spaced fractures confined within strata. (b) Poisson geometry: fractures confined within strata with negative exponential spacing distribution.

Estimating change in permeability with depth

Once the hydraulic aperture and permeability have been calculated for the surface, their values can be calculated at depth. Numerous field observations have demonstrated how joint geometry varies with depth. Specifically, normal stress increases with depth, and joint frequency and aperture tend to decrease, and as a result, so does permeability. However, there is some controversy as to how to quantify these decreases. On the one hand, on the basis of a large number of field measurements, only a negligible decrease in hydraulic conductivity with depth is observed, which tends to deny the validity of generally applicable empirical relations (BRACE, 1980). On the other, at modest depths (which are often those of practical interest), various authors record systematic variations in the two characteristics that seem to have greatest influence hydraulic conductivity in fractured rock formations, i.e., joint aperture and spacing.

LOUIS (1974) for example relates hydraulic conductivity to stress and depth with the equation:

$$k = k_0 e^{-\alpha\sigma}$$

where:

k_0 : hydraulic conductivity at the surface;

σ : normal stress $\approx \gamma Z$;

$A = \alpha \gamma = 7.8 - 3.4 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^{-1}\text{]} .$

WEI AND HUDSON (1988) provide two equations that describe variations in joint aperture and permeability with depth:

$$\frac{e}{e_{ci}} = 1 - \frac{Z}{A + BZ}$$

$$\frac{K}{K_i} = \left(1 - \frac{Z}{A + BZ} \right)^3$$

e_{ci} = apertura idraulica in superficie (condizioni di sforzo normale nullo sulle discontinuità);

K_i = permeabilità in superficie;

Z = profondità;

A, B = costanti (definite da SNOW pari ad A = 58,0 e B = 1,02).

SNOW (1968) propone per il calcolo della permeabilità in ammassi rocciosi cristallini fratturati una relazione indipendente dalla permeabilità superficiale:

$$K = 10^{-(1,6 \log Z + 4)}$$

dove:

K : permeabilità intrinseca in ft^2 ;

Z : profondità in ft ;

Analogamente, CARLSSON & OLSSON (1977) propongono due relazioni per il calcolo della conducibilità idraulica dipendenti unicamente dalla profondità:

$$K = 10^{-(0,002 Z + 5,6)}$$

$$K = 10^{-(2,5 \log Z + 2,5)}$$

con k in m/s e Z in m .

Anche BURGESS (1977) propone:

$$\log K = 5,57 + 0,352 \log Z - 0,978 (\log Z)^2 + 0,167 (\log Z)^3$$

con K in m/s e Z in metri.

APPLICAZIONI ALL'AMMASSO DI FONDAZIONE DELLA DIGA DI S. GIACOMO DI FRAELE

Dal 1999 la AEM di Milano sta conducendo una serie di studi e di opere volte a potenziare la capacità di produzione idroelettrica dei suoi impianti ubicati in Alta Valtellina, a seguito delle maggiori e diversificate esigenze del mercato. Da alcuni anni infatti si sta assistendo, oltre ad un aumento della richiesta energetica, anche ad una diversa distribuzione di questa nell'arco dell'anno; in particolare le necessità del periodo estivo sono cresciute maggiormente rispetto a quelle del periodo invernale, in cui storicamente si aveva la richiesta nettamente più alta.

Il potenziamento degli impianti prevede molte opere, le più significative delle quali sono la realizzazione della seconda centrale di Premadio, con nuove gallerie di adduzione primaria e secondaria (CLERICI *et alii*, 2005), lo scavo di un nuovo canale di derivazione delle acque della Val Viola, ed una serie di interventi sulla diga a gravità alleggerita di S. Giacomo di Fraele.

Qui, tra l'altro, si è reso necessario uno studio della permeabilità degli ammassi rocciosi di fondazione in vista di un innalzamento del livello di massimo invaso del Lago di Cancano le cui acque vanno a bagnare la struttura di S. Giacomo sul paramento di valle. L'indagine ha comportato la realizzazione di una serie di perforazioni e l'esecuzione di 34 prove di permeabilità Lugeon. I risultati di queste sono serviti, nell'ambito del presente studio, per verificare l'applicabilità dei metodi predittivi sopra riportati.

L'area oggetto di studio si colloca in Alta Valtellina (SO) all'interno della struttura a falde di ricoprimento appartenenti al dominio Austroalpino superiore ed in particolare al sistema Ortles-Quattervals.

L'assetto geologico di questo settore è caratterizzato dalla pre-

e_{ci} = hydraulic aperture at the surface (zero normal joint stress);

K_i = permeability at the surface;

Z = depth;

A, B = constants (defined by Snow as A = 58.0 and B = 1.02).

SNOW (1968) proposes a relation that is independent of superficial permeability and depends only on depth for calculating permeability in fractured crystalline rock formations:

$$K = 10^{-(1,6 \log Z + 4)}$$

where:

K : intrinsic permeability in ft^2 ;

Z : depth in ft ;

Analogously, CARLSSON & OLSSON (1977) propose two equations:

$$K = 10^{-(0,002 Z + 5,6)}$$

$$K = 10^{-(2,5 \log Z + 2,5)}$$

with k in m/s e Z in m .

BURGESS (1977) proposes:

$$\log K = 5,57 + 0,352 \log Z - 0,978 (\log Z)^2 + 0,167 (\log Z)^3$$

with K in m/s and Z in meters.

APPLICATIONS TO THE FOUNDATIONS OF THE SAN GIACOMO DI FRAELE DAM

AEM of Milan has been carrying out studies since 1999 aimed at increasing its hydroelectric production capacity in Upper Valtellina in order to respond to greater and diversified market demand. For a number of years now energy demand has been increasing and its distribution over the course of the year has also changed. Specifically, summertime demand has increased at a greater rate than wintertime demand, which has historically been the period of highest demand.

The increase in power production capacity comprises a number of projects, the most significant of which are the second plant in Premadio with new primary and secondary water tunnels (CLERICI *et alii*, 2005), the creation of a new bypass channel for the waters of Val Viola, and a series of modifications to the San Giacomo di Fraele hollow gravity dam.

A permeability study of the bedrock formations was necessary for this third project in view of the increase in the maximum storage level of the Lago di Cancano, which is contained at the downstream end by the San Giacomo di Fraele dam. The investigation involved drilling a series of boreholes and carrying out 34 Lugeon tests. The results of these tests are used in this study to verify the applicability of the predictive methods discussed above.

The study area is located in Upper Valtellina (Province of Sondrio) within the superficial nappe structure of the upper Austro-alpine formation, specifically in the Ortles-Quattervals system.



Fig. 4 Paramento di Valle della Diga di San Giacomo
- Downstream end by the San Giacomo di Fraele dam

senza di due importanti lineamenti tettonici: il primo è la frattura dell'Alpisella che, con andamento E-W separa il sedimentario di Quaternari s.s. da quello dell'Ortles (POZZI & GIORCELLI, 1960) estendendosi dalla valle dell'Engadina sino al monte Solena per poi proseguire attraverso un sistema molto complesso di scaglie tettoniche (POZZI, 1965) nella Linea del Braulio; la seconda è la Linea dello Zebrù (HAMMER, 1902) che separa il Norico dell'Ortles dal Carnico ed è costituita dalla cataclasi di scaglie sedimentarie e del Cristallino; tale lineamento è stato ripetutamente attraversato da alcune gallerie idrauliche dell'AEM (POZZI, 1959; MARTINA, 1961).

La zona in esame, ovvero l'area di imposta della diga di S. Giacomo di Fraele, si colloca all'interno della Falda dell'Ortles ed interessa la Formazione di Fraele (Retico) costituita essenzialmente da calcari e calcari marnosi grigi e grigio-neri con potenze stratigrafiche variabili dai 50 metri (Monte Crapene) ai 250 metri (Valle di Fraele).

Le metodologie sopra riportate sono state applicate ad una serie di affioramenti dislocati nei pressi dello sbarramento della diga di San Giacomo di Fraele; la fase propedeutica è consistita nella definizione delle caratteristiche geologico-tecniche degli ammassi rocciosi mediante l'esc-

The geological makeup of this area is characterized by two important tectonic lines. The first is the east-west Alpisella fracture separating the sedimentary Quaternari formations from those of the Ortles (POZZI & GIORCELLI, 1960). This fracture extends from the Engadine Valley to Mount Solena and then continues through a very complex system of horse formations (POZZI, 1965) along the Braulio line. The second is the Zebrù line (HAMMER, 1902) which separates the Norian Ortles formation from the Carnian and is marked by cataclastic sedimentary horses and crystalline rock. The Zebrù line is crossed at several points by AEM water tunnels (POZZI, 1959; MARTINA, 1961).

The zone in question, the San Giacomo di Fraele dam area, is located within the Ortles nappe and touches on the Fraele Formation (Retian) composed essentially of gray or blackish-gray limestone and marly limestone in layers of thicknesses varying from 50 (Monte Crapene) to 250 meters (Valle di Fraele).

The above-described methods were applied to a series of outcrops near the San Giacomo di Fraele dam. The preparatory phase involved determining the geological and geotechnical characteristics of the rock formations by means of detailed geomechanical



Fig. 5 Ammasso roccioso di tipo A caratterizzato da prevalente componente calcarea
- The type A formation is characterized by a prevailing limestone content



Fig. 6 Ammasso roccioso di tipo B a componente calcarea marnosa, con orizzonti di marne laminare e sottili interstrati di argilliti fissili
- The type B formation is composed of marly limestone with layers of laminated marl and fissile shale

Tab. 1 Confronto di permeabilità (m/s) negli ammassi rocciosi alla profondità di 20 m
 - Comparison of permeability values (m/s) in rock formations at a depth of 20 m

	k (m/s) Ammasso roccioso A Rock formation A	k (m/s) Ammasso roccioso B Rock formation B
Prove Lugeon di riferimento Lugeon test (reference)	1.5E-06	5.0E-07
Soglia di percolazione Percolation threshold	1.9E-05	1.6E-04
Interlayer model (c=2)	2.1E-05	2.7E-05
Interlayer model (c=4)	2.2E-05	2.8E-05
CARLSSON & OLSSON (1977) (1)	1.0E-06	1.0E-06
CARLSSON & OLSSON (1977) (2)	1.8E-06	1.8E-06
SNOW (1968)	8.3E-07	8.3E-07
BURGESS (1977)	4.0E-07	4.0E-07

cuzione di rilievi geomeccanici di dettaglio e nella loro classificazione.

In particolare durante le operazioni di raccolta dati in sito sono stati distinti due settori (A e B) con ammassi rocciosi costituiti da differenti caratteristiche geometriche dei sistemi di discontinuità. In particolare l'ammasso roccioso di tipo A è caratterizzato da prevalente componente calcarea, in cui le frazioni marnosa ed argillitica sono limitate a locali e sottili livelli di interstrato mentre l'ammasso roccioso di tipo B si presenta a componente calcareo marnosa, con orizzonti di marne laminate e sottili interstrati di argilliti fissili.

Nella Tabella 1 si confrontano i valori della permeabilità ottenuti con le prove in foro eseguite nell'ammasso roccioso di tipo A e nell'ammasso roccioso di tipo B alla profondità di 20 m e quelli calcolati con i diversi metodi prima descritti.

La profondità di 20 m da piano campagna è stata qui considerata in quanto le prove Lugeon sono state più numerose ed omogenee nei risultati, fornendo un valore medio per ciascuna tipologia di ammasso che può essere considerato significativo e preso come riferimento.

Tutti i valori ottenuti dai metodi empirici sono stati modificati con la relazione empirica di WEI & HUDSON (1988) per tener conto della profondità. Va rilevato che questa relazione fa dipendere la permeabilità solo dalla variazione della apertura con la profondità, trascurando altri parametri che caratterizzano le discontinuità e che pure variano con la profondità, come la spaziatura.

In sostanza si può osservare come i metodi empirici che prevedono innanzi tutto il calcolo della permeabilità superficiale e successivamente vengono corretti per tener conto della profondità da piano campagna forniscono le stime più lontane dai valori misurati. Ciò è particolarmente vero per il metodo della soglia di percolazione.

Viceversa le relazioni empiriche in s.s. (CARLSSON & OLSSON, 1977; SNOW, 1968; BURGESS, 1977), basate solo sulla profondità da piano campagna, forniscono valori che, nel caso in esame, si allineano meglio ai valori ottenuti durante i test in sito. Ciò porta a far ritenere che la profondità costituisca effettivamente il parametro determinante nei riguardi della permeabilità degli ammassi rocciosi.

A questo punto, poiché si ritiene che, concettualmente, siano da preferire metodi di stima che siano basati su più parametri caratteristici degli ammassi rocciosi considerati e tenendo conto di quanto sopra emerso circa l'importanza del fattore "profondità", appare ragionevole considerare i metodi della soglia di percolazione e interlayer model ed inserire un fattore correttivo che tenga conto della variazione con la profondità anche della spaziatura; interpretando i dati di letteratura sull'argomento (ad es. ATTEWEL & FARMER, 1976), viene quindi proposta la relazione:

$$k(z) = (0,378 \cdot Z^{(-0,363)}) \cdot k_0$$

in cui Z = profondità (m).

Applicando tale relazione al caso in esame si ottengono, partendo dai dati di superficie e per profondità di 20 metri, i seguenti valori:

measurements.

Table 1 presents a comparison between permeability values obtained from the Lugeon tests in rock formations A and B at a depth of 20 meters and those calculated with the above-described methods.

The depth of 20 meters below ground surface was chosen because this is the depth at which the Lugeon tests were performed. The great number and relatively homogeneous results of these tests provided a significant average value for each rock type that is used as the reference value.

All values obtained via empirical methods were modified by means of the WEI & HUDSON (1988) empirical relation to account for depth. It should be pointed out that in this relation permeability depends only on the variation of joint aperture with depth, neglecting other joint characteristics that also vary with depth, such as spacing.

The empirical methods that entail calculating the superficial permeability and then correcting it for depth below ground level show the poorest fit with respect to measured values, with the Percolation Threshold method showing the greatest deviation.

The more simple empirical methods (CARLSSON & OLSSON, 1977; SNOW, 1968; BURGESS, 1977) based exclusively on depth below ground level produce values that are closer to the measured values for the case in question. This suggests that depth is the determining factor in the permeability of rock formations.

On a conceptual level, estimation methods that take into account a plurality of rock mass characteristics, rather than just one, should be preferable. This, taken together with the above-indicated importance of depth as a factor in permeability, suggests that it would be reasonable to revise the Percolation Threshold method and interlayer model by inserting a correction factor to account for the variation of fracture spacing with depth. The following relation is proposed on the basis of data in the literature (for example, ATTEWEL & FARMER, 1976):

$$k(z) = (0,378 \cdot Z^{(-0,363)}) \cdot k_0$$

where Z = depth (m).

Applying this relation to the case in question using the superficial data and a depth of 20 meters, we obtain the following values:

Tab. 2 Confronto di permeabilità (m/s) negli ammassi rocciosi alla profondità di 20 metri considerando anche la variazione della spaziatura con la profondità
 - Comparison of permeability values (m/s) in rock formations at a depth of 20 m accounting for joint spacing variation with depth

	k (m/s) Ammasso roccioso A Rock formation A	k (m/s) Ammasso roccioso B Rock formation B
Prove Lugeon di riferimento Lugeon test (reference)	1.5E-06	5.0E-07
Soglia di percolazione Percolation threshold	1.4E-05	2.0E-05
Interlayer model (c=2)	2.7E-06	3.4E-06
Interlayer model (c=4)	2.8E-06	3.6E-06

CONSIDERAZIONI

Considerato che l'esecuzione di misure dirette di conducibilità idraulica sugli ammassi rocciosi fratturati sono di fatto impossibili in superficie e risultano complesse e costose in profondità, il ricorso a stime di questo importante parametro diventa, in molti casi concreti, indispensabile.

Il caso esaminato consente di osservare che le stime della permeabilità degli ammassi rocciosi eseguite con il metodo della soglia di percolazione non sono risultate pienamente soddisfacenti, in quanto differiscono di alcuni ordini di grandezza da quanto misurato nel corso delle prove in foro; con ogni probabilità, queste differenze sono dovute alla non ottimale corrispondenza di questo modello alle caratteristiche degli affioramenti rocciosi esaminati.

Le metodologie empiriche s.s. per il calcolo della permeabilità che forniscono una stima della permeabilità basata unicamente sulla profondità, benché permettano una definizione sufficientemente precisa della permeabilità, non possono essere considerate soddisfacenti in quanto non sono in grado di risentire delle variazioni laterali della permeabilità legate al cambiamento delle condizioni geomeccaniche dell'ammasso roccioso ed in particolare a differenze nelle condizioni delle discontinuità.

Il metodo "dell'interlayer model", almeno nel caso puntiforme esaminato, ha fornito una stima di permeabilità dell'ammasso roccioso con differenze relativamente modeste rispetto alle misure dirette effettuate in sito; tali differenze sono state ulteriormente ridotte con l'inserimento, nel processo di stima, di una legge di variazione della spaziatura con la profondità.

Il metodo potrebbe quindi venire utilmente impiegato in tutti quei casi in cui, in una fase preliminare del progetto, sia necessaria e sufficiente una stima che consenta un corretto inquadramento del problema tecnico relativo alla permeabilità delle rocce, stima che sarà successivamente confortata da misure dirette da condursi nelle fasi di maggior dettaglio della progettazione.

Infine, sarebbe auspicabile che qualunque esperienza professionale (è in questo ambito che viene realizzata la gran parte delle misure di permeabilità dirette) sull'argomento venisse divulgata in modo che questo importante, ma complesso e poco frequentato tema, possa ricevere un contributo significativo di conoscenza.

RINGRAZIAMENTI

Si desidera ringraziare l'AEM S.p.A. di Milano, in particolare della persona del Dott. Michele De Censi, per aver messo a disposizione i risultati delle prove in foro. Un ringraziamento anche all'Ing. Matteo Marchina, al Dott. Simone Scola e all'Ing. Susi Canti che hanno collaborato allo studio.

CONCLUSIONS

Given that direct measurement of hydraulic conductivity in fractured rock formations is impossible at the surface and complicated and costly at depth, the use of methods to estimate this fundamentally important property is indispensable in many real-world cases.

The case examined herein shows that the estimates of permeability in rock formations carried out using the Percolation Threshold method were not fully satisfactory since they differ by several orders of magnitude from values obtained during direct downhole tests. In all probability, these differences are due to the non-optimal suitability of this model to the characteristics of the specific rock outcrops examined in this study.

While producing a rather close estimate of permeability, the simplest empirical methods for calculating permeability, such as those of CARLSSON & OLSSON (1977), SNOW (1968), and BURGESS (1977), which estimate permeability exclusively on the basis of depth, cannot be considered satisfactory in that they do not account for eventual lateral variations in permeability associated with changes in the geomechanical or fracture characteristics of the rock formation.

The Interlayer Model provided permeability estimates in the case in question relatively close to the results of direct field measurements. The error was reduced by inserting into the equation a factor accounting for variation of spacing with depth. The method could thus be used in preliminary design phases where an estimate of the permeability of the rock formation is needed to outline the technical issues of a project, with the estimate being refined later by means of direct measurements carried out during the more detailed design phases.

It is hoped that all permeability data collected by professionals (which is the source of most direct permeability measurements) be published in order to expand the knowledge base of this important, complex, and insufficiently investigated topic.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to thank in particular Michele De Censi of AEM of Milan, who provided the results of the downhole permeability measurements. Thanks also to Matteo Marchina, Simone Scola, and Susi Canti, who contributed to the study.

OPERE CITATE/REFERENCES

- AEM S.p.A. (1996) - *Storia e sviluppo degli impianti idroelettrici Aem in Valtellina*. Milano.
- AEM S.p.A. (2003) - *Diga di S. Giacomo di Fraele - Schermo di impermeabilizzazione - Prove Lugeon e rapporti vari*. Milano.
- ATTEWELL, P.B. & FARMER, I.W. (1976) - *Principles of Engineering Geology*. Chapman & Hall, London.
- BANDIS S. C., LUMSDEN A.C. & BARTON N.R. (1983) - *Fundamentals of Rock Joint Deformation*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. **20** (6): 249-268.
- BARTON N., BANDIS S. AND BAKHTAR K. (1985) - *Strength, Deformation and Conductivity Coupling of Rock Joint*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. **22** (3): 121-140.
- BERETTA G.P. (1993) - *Idrogeologia per il disinquinamento delle acque sotterranee*. Pitagora editrice Bologna, Bologna.
- CALEGARI P., & CERONI G., (1997) - *Diga di S. Giacomo di Fraele (SO) Caratterizzazione geomeccanica della roccia di fondazione*. relazione per conto AEM S.p.A. Milano.
- CASTANY G. (1987) - *Idrogeologia, principi e metodi*. Libreria Dario Flaccovio Editrice. Palermo.
- CHENG-HAW L. & FARMER I. (1993) - *Fluid Flow in Discontinuous Rock*. Chapman and Hall, London.
- CHENG-HAW L., BOR-WEI D. & JUI-LI C. (1995) - *A continuum approach for estimating permeability in naturally fractured rocks*. Engineering Geology **39**: 71-85, Elsevier Science.
- CLERICI A., DE CENSI M., MARIANI S. & LOVATI S. (2005) - *Lo scavo con TBM della rimonta del Progetto Premadio II in Alta Valtellina (Prov. di Sondrio): confronto tra le previsioni progettuali, i dati macchina e le condizioni geomeccaniche degli ammassi rocciosi scavati*. Gallerie e grandi opere sotterranee, **76**, ISSN-0393-1641: 11-22, Patron Ed.
- LEE H. S. & CHO T. F. (2002) - *Hydraulic Characteristic of Rough Fractures in Linear Flow under Normal and Shear Load*. Rock Mech. Rock Eng. **35** (4): 299-318.
- MARCHINA M. (2003) - *Tesi di laurea - La permeabilità negli ammassi rocciosi: metodologie a confronto*. Università degli Studi di Brescia, Facoltà di Ingegneria.
- OLSSON R. & BARTON N. (2001) - *An improved model for hydromechanical coupling during shearing of rock joints*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. **38**: 317-329.
- MONTALDO P., (1971). - *Symposium Internazionale sulle acque sotterranee nelle rocce cristalline*. Cagliari.
- POZZI R, BOLLETTINARI G. E CLERICI A. (1990) - *Studio geomorfologico e geologico applicato dell'Alta Valtellina - Alto bacino dell'Adda con chiusura a Tirano*. Quaderni Aem 1, Aem S.p.A.
- POZZI R. (1959) - *Studio stratigrafico del mesozoico dell'Alta Valtellina (Livigno-Passo Stelvio)*. Istituto di geologia paleontologia e geografia fisica dell'Università di Milano.
- POZZI R. (1960) - *Nuovi fossili norici nei calcari dell'alta Val Cancano (Bormio-Alpi Retiche)*. Istituto di geologia paleontologia e geografia fisica dell'Università di Milano.
- POZZI R. & GIORCELLI A., (1960a) - *Memoria illustrativa della carta geologica della regione compresa fra Livigno ed il passo dello Stelvio (Alpi Retiche)*. Istituto di Geologia, Paleontologia e Geografia fisica della Università di Milano.
- POZZI R. & GIORCELLI A., (1960b) - *Carta geologica della regione compresa fra Livigno ed il passo dello Stelvio (Alpi Retiche)*. Istituto di Geologia, Paleontologia e Geografia fisica della Università di Milano.
- SCESI L. & PAPINI M. (1995) - *Geologia applicata, il rilevamento geologico-tecnico*. Città studi edizioni, Milano.
- SCOLA S. (2004) - *Tesi di laurea - Confronto tra stime di permeabilità in foro e stime di dati superficiali negli ammassi rocciosi di fondazione della diga di S. Giacomo di Fraele (So)*. Università degli Studi di Milano, Facoltà di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali.
- SNOW D. T. (1968) - *Rock fracture spacings, openings, and porosities*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Divisions, ASCE **96**: 73-91.
- STUDIO LOMBARDI (2002) - *Impianto di Premadio - Diga di San Giacomo di Fraele - Intervento di manutenzione conservativa - Progetto esecutivo - integrazioni progettuali*. AEM S.p.A. Milano.
- WEI Z. & HUDSON J. A. (1988) - *Permeability of jointed rock masses*. Proc. ISRM Symp., Rock Mechanics and Power Plants, Madrid, (Edited by Romana): 613-625.
- WEI Z. Q., EGGER P. & DESCOEUDRES F. (1995) - *Permeability Predictions for Jointed Rock Masses*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. **32** (3): 251-261.

Received March 2006 - Accepted January 2008