

ENSAIOS DE PERMEABILIDADE EM MACIÇOS ROCHOSOS*

Permeability tests in Rock Masses

por
RICARDO OLIVEIRA**

RESUMO – Refere-se sumariamente o princípio do ensaio e apresentam-se considerações quanto à interpretação dos seus resultados. Fazem-se comentários quanto à validade do ensaio, quanto aos cuidados a ter nas fases de planeamento, realização e interpretação para que os resultados sejam representativos destacando-se o aspecto da definição das pressões a utilizar nas diversas fases do ensaio.

SYNOPSIS – The principle of the test is referred very briefly and some considerations concerning the interpretation of its results are presented. The paper includes comments regarding the validity of the test the attention needed in the planning, performing and interpretation of the tests highlighting the problem of definition of pressures to be used in the different steps of the test.

1 – INTRODUÇÃO

Foi sobretudo com a construção de barragens de certa importância, no início do século, que surgiu o problema da determinação da permeabilidade dos respectivos maciços de fundação a fim de ajuizar da necessidade de construção de obras de impermeabilização, evitando-se assim perdas de água sob a barragem.

O ensaio que então mostrou ser mais satisfatório e que ainda hoje é utilizado de forma sistemática ficou designado por ensaio Lugeon em homenagem ao geólogo suíço Maurice Lugeon, que primeiro o preconizou.

* Comunicação apresentada à sessão sobre “Amostragem e Ensaios *in situ*” organizada pelo APMSR em 26/5/72.

** Geólogo, Especialista e Chefe da Divisão de Prospecção do LNEC. Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.

2 – PRINCÍPIO DO ENSAIO

O ensaio consiste na injeção de água sob pressão num certo trecho de um furo de sondagem e na medição da quantidade de água que entra no maciço rochoso durante um certo tempo, a uma dada pressão de injeção.

A realização do ensaio em vários degraus de pressão (crescentes e decrescentes) permite traçar curvas caudal-pressão que dão informação quanto ao regime hidrológico do maciço e quanto ao estado e tipo de fracturação nas vizinhanças do trecho ensaiado.

A tendência para normalização levou a que, em regra, o ensaio chamado Lugeon seja realizado nas mesmas condições, independentemente do tipo e dimensão das obras que vão ser fundadas no maciço respectivo. Aparece assim a unidade lugeon que corresponde a 1 litro por minuto e por metro, num ensaio em que a pressão de injeção de água se mantém a 10 kgf/cm^2 durante 10 minutos. A 1 lugeon corresponde um valor para o coeficiente de permeabilidade k entre 1.10^{-5} e 2.10^{-5} cm/s para sondagens de diâmetros entre 5 e 10 cm.

A experiência mostrou que para valores de coeficiente de permeabilidade inferiores a 1 lugeon é impossível injectar qualquer calda de cimento pelo que se considerou que sempre que a permeabilidade seja inferior a 1 lugeon o maciço rochoso é impermeável.

Em regra estes ensaios vão sendo realizados à medida que o furo vai prosseguindo, em trechos de comprimento variável conforme a permeabilidade do maciço e a capacidade da bomba de injeção mas mais vulgarmente com 5 m. Neste caso, o limite inferior do trecho é o fundo do furo no momento do ensaio e o limite superior definido pela posição de um obturador de couro ou borracha que tem por missão impedir que a água injectada no furo se escape entre o obturador e a parede respectiva. Convém que o obturador seja suficientemente comprido de forma a garantir boa estanqueidade. Quando o ensaio é realizado num trecho intermédio do furo de sondagem utiliza-se um obturador duplo que define os limites superior e inferior do trecho a ensaiar.

A pressão de injeção de água é lida em regra num manómetro colocado à superfície, junto à boca do furo, e a quantidade de água absorvida é lida num contador vulgar ou, na sua falta, medida pela descida de nível num reservatório de secção conhecida.

3 – INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DO ENSAIO

Desde que o ensaio tenha sido bem realizado, a informação obtida é de grande utilidade na definição do regime hidrológico do maciço e da sua fracturação.

Calculadas as absorções em litros por minuto e por metro para cada patamar de pressões utilizado no ensaio, depois de se proceder à respectiva correcção resultante das leituras das pressões se fizerem junto à boca do furo, traçam-se gráficos de pressão-absorção que permitem especialmente avaliar o regime de escoamento que se instalou no maciço e daí o tipo e abertura das fracturas interessadas.

A correcção, que se torna necessário fazer em boa parte dos casos (nomeadamente em furos profundos em que o nível freático está bastante abaixo da superfície do terreno), é constituída por 2 parcelas uma das quais, aditiva, corresponde à carga estática resultante da coluna de água entre a boca do furo e o nível freático e a outra, subtractiva, corresponde às perdas de carga através da canalização utilizada (diâmetro, rugosidade, caudal, etc.).

Para fazer a primeira correcção é apenas necessário tomar nota da posição do nível freático do maciço rochoso na zona da sondagem (o que nem sempre é fácil) e subtrair para a cota da zona da tubagem onde foi colocado o manómetro.

A segunda correcção, que poderá em certos casos ter muita importância, faz-se quer calculando as perdas de carga por via analítica quer ensaiando

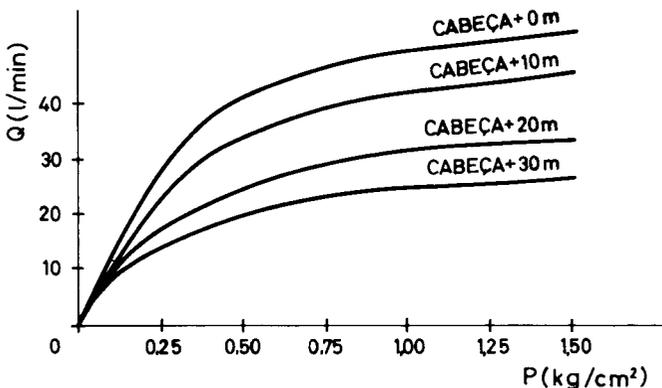


Fig. 1

a tubagem de injeção utilizada no ensaio, estabelecendo ábacos para os diferentes comprimentos de tubagem.

Esses ábacos são formados por curvas de caudal-pressão, obtidas ensaiando a tubagem utilizada para diferentes pressões lidas no manómetro (Fig. 1).

O esquema do ensaio é o seguinte (Fig. 2).

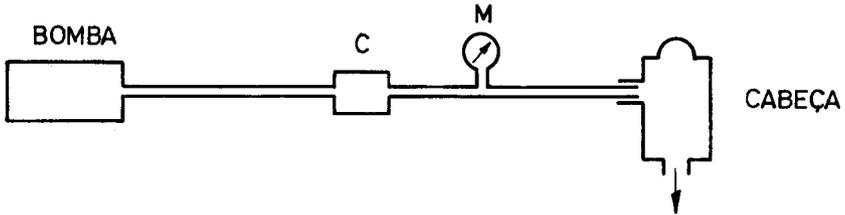


Fig. 2

A correcção resultante da perda de carga pode igualmente ser feita por via analítica a partir da fórmula de Flamant aplicável a tubagem de pequeno diâmetro.

$$p_c = 0,00092 \sqrt{\frac{v^7}{D^5}}$$

em que v é a velocidade de água em metros por segundo, D o diâmetro em metros e p_c a perda de carga em metros de altura da água.

Feitas pois as correcções, a primeira informação diz respeito à absorção em l/min.m correspondente à pressão máxima considerada conveniente. Isso permite tirar desde logo conclusões quanto à necessidade de tratamento de impermeabilização, e, no caso afirmativo, que profundidades terá que atingir. No que respeita ao regime de escoamento instalado, função das características físicas das fracturas presentes, a interpretação das curvas pressão-absorção é de grande interesse.

Quando se verifica proporcionalidade entre os caudais e as pressões está-se na presença de um escoamento laminar (regido pela Lei de Darcy: $v = ki$) que, no caso de maciços rochosos, é característico de fracturas pouco espessas. É o caso da Fig. 3 onde se representa o resultado de um ensaio em que ou as fracturas não tinham enchimento ou o enchimento não foi sensível à percolação durante o ensaio.

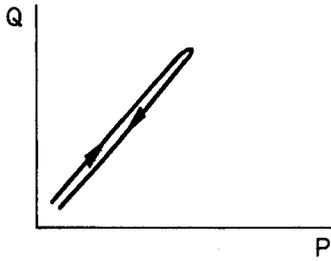


Fig. 3

Casos há, no entanto, em que a injeção de água sob pressão conduz à colmatação progressiva das fracturas por arrastamento de material como é o caso da Fig. 4.

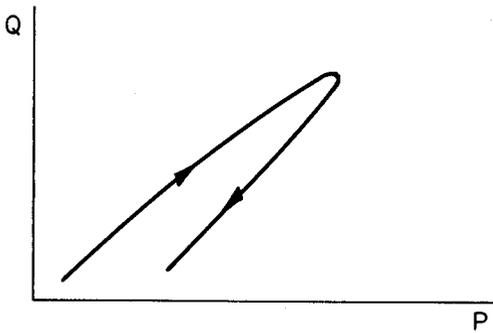


Fig. 4

e outros em que o aumento de pressão provoca arrastamento dos materiais de enchimento e conseqüente lavagem das fracturas. Em esquema representa-se: (Fig. 5).

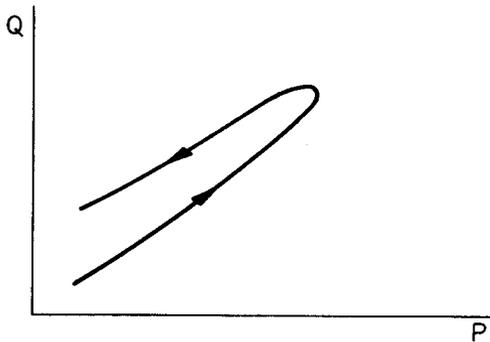


Fig. 5

Quando não há proporcionalidade na curva Q-P está-se, em princípio, em presença de um escoamento turbulento, que é regido pela lei de Chezy quando os gradientes são proporcionais ao quadrado das velocidades ($V = k\sqrt{i}$) e a curva obtida é do tipo da representada na Fig. 6.

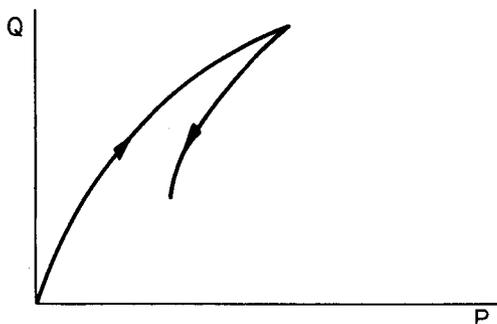


Fig. 6

No entanto, este resultado pode dever-se apenas à abertura elástica de fracturas como consequência da pressão de injeção.

Estas considerações são de extrema utilidade no estabelecimento das pressões de injeção e quantidades das caldas de tratamento e do próprio tipo de caldas, embora as pressões de injeção das caldas atinjam muitas vezes 20 a 30 kg/cm² e o comportamento do escoamento das caldas seja diferente do da água.

4 – COMENTÁRIOS

4.1 – Considera-se o ensaio de permeabilidade “tipo Lugeon” da maior utilidade e interesse no estudo das características de permeabilidade e fracturação de um maciço rochoso, e que continua a ser o processo mais adequado desde que seja apropriada a orientação dos furos de sondagem em relação à atitude das fracturas mais importantes do maciço e que seja significativo o número de ensaios realizados. Não é raro acontecer, por exemplo, pretender-se estudar a permeabilidade em grande de um maciço rochoso compartimentado por famílias de fracturas verticais, à custa da realização de ensaios “tipo Lugeon”, em furos de sondagem igualmente verticais.

4.2 – Considera-se no entanto indispensável aperfeiçoar o ensaio de forma sistemática, adaptando-o às condições de cada local e melhorando os sistemas de obturação e leitura. Para isso, muito pode contribuir o planeamento e acompanhamento dos trabalhos de prospecção pelo geólogo responsável.

Na *fase de planeamento* há que decidir sobre a orientação dos furos de sondagem onde irão ser realizados os ensaios e as pressões de injeção a utilizar durante o ensaio. Na *fase de realização*, há que garantir a estanqueidade do obturador escolhendo o tipo e comprimento mais adequados (muitas vezes difícil, se a parede do furo é muito irregular – caso de terrenos brandos, zonas de falha, filões, etc.) e a manutenção de pressão de ensaio, há que conservar a variação do nível freático antes e depois do ensaio e que medir as perdas de carga ao longo das varas de injeção. Nesta fase há igualmente que ir ajustando a localização e comprimento dos trechos a ensaiar em face da observação dos tarolos correspondentes àqueles trechos (acontece com frequência ensaiar-se um trecho de 5 m de comprimento onde se verifica grande perda de água que é devida à ocorrência de fractura ou fracturas abertas apenas nos primeiros centímetros do trecho considerado, às quais se segue um tarolo praticamente sem fracturas ou então com algumas fracturas fechadas; neste caso dever-se-ia realizar novo ensaio apenas na parte inicial do trecho, abrangendo a zona das fracturas abertas utilizando obturador duplo e comparar os resultados com os inicialmente obtidos para todo o trecho de 5 m).

Na *fase de interpretação* dois aspectos são fundamentais. O primeiro prende-se com a definição das pressões efectivamente utilizadas no ensaio. Como se disse atrás, a pressão de injeção é lida num manómetro localizado à superfície, que dá informações quanto à pressão da água à entrada na tubagem; a pressão que interessa é a pressão da água no trecho ensaiado que pode ser muito diferente da lida no manómetro, especialmente no caso de furos feitos em encostas onde o nível freático pode estar muito abaixo da superfície.

A pressão real será então

$$P = P_{\text{manómetro}} + \text{altura da coluna de água acima do nível freático} - \text{perdas de carga}$$

Dadas, por vezes, a dificuldade e a imprecisão das leituras correctivas, o método mais preciso consiste na instalação de uma célula medidora da

pressão da água no próprio trecho em ensaio. Isso teria em conta as duas parcelas acima mencionadas (altura de coluna de água e perdas de carga) Este procedimento embora simples não é vulgarmente adoptado.

O segundo aspecto diz respeito ao tipo de curva caudal-pressão, característico do regime de escoamento durante o ensaio que reflete o tipo de fracturação que ocorre no trecho ensaiado.

4.3 – Um dos aspectos mais importantes dos ensaios de permeabilidade “tipo Lugeon” prende-se como se disse com a definição das pressões de injeção de água a utilizar no ensaio.

Na maior parte dos casos com que se teve oportunidade de contactar, os ensaios são realizados, independentemente da altura e tipo de obra, para níveis de pressão do tipo 2,5 - 5 - 10 - 5 - 2,5 kg/cm².

A interpretação é, como se disse, feita com base nos valores de água injectada para aquelas pressões sendo uma das conclusões a consideração de um coeficiente de absorção em unidades lugeon (1 lugeon = 1 l/min.m a 10 kg/cm²) definidor da permeabilidade do maciço.

A única vantagem de tal procedimento reside na longa experiência destes ensaios e da análise que essa experiência permite fazer para as diferentes situações. Assim, embora se considere que um maciço é impermeável apenas para valores de coeficiente de absorção inferiores a 1 lugeon (isto é, que esses trechos não são injectáveis com caldas tradicionais) é corrente hoje em dia definir o limite da zona permeável – logo, a submeter a tratamento – em função do gradiente hidráulico que se vai instalar no maciço (no caso, por exemplo, de barragens de betão com cerca de 30 a 35 m de altura, considera-se como zona impermeável – logo, sem necessidade de tratamento – aquela cujos valores dos ensaios de permeabilidade são inferiores a 3 lugeons; se se tratar de uma barragem de terra em que, para a mesma altura de água, o gradiente de percolação é consideravelmente menor, aqueles poderão ainda ser menos conservadores).

Parece no entanto que será desejável estabelecer os valores das pressões de ensaio (entenda-se pressões corrigidas e não as lidas no manómetro) em função das solicitações previstas, embora isso seja de difícil concretização. Uma das dificuldades resulta das modificações no estado de tensão do maciço rochoso como resultado de construção das estruturas projectadas, que se reflectem no regime de percolação do maciço. Isso seria observado se os

ensaios fossem realizados (ou pelo menos parte deles) depois de construídas as estruturas.

Outro condicionamento na definição das pressões de ensaio prende-se com a profundidade da sua realização já que se torna necessária certa reacção do terreno (dada pelo peso das formações acima do trecho ensaiado e pelos efeitos de encastramento dessas formações) para evitar que o ensaio conduza à fracturação e descompressão do maciço. Mais uma vez, a atitude das formações e das suas descontinuidades tem papel importante nestas considerações (este aspecto tem muito mais relevância, por exemplo, se o ensaio visa formações sub-horizontais onde ocorrem diaclases sub-horizontais importantes do que no caso de maciços de fracturação aleatória ou predominantemente vertical).

Em geral, no entanto, o critério que se baseia no estabelecimento das pressões do ensaio apenas em função do peso dos terrenos de cobertura não é satisfatório, em especial quando se trata de projectos de obras que vão introduzir uma carga hidráulica apreciável (considere-se, por exemplo, o caso de uma barragem de 100 m de altura em que se prevê uma escavação máxima de 10 m no maciço de fundação; a 15 m de profundidade o maciço ficará submetido a uma pressão hidrostática um pouco superior a 10 kg/cm^2 e não tem portanto sentido fazer o ensaio a 3 kg/cm^2 que seria a pressão em função apenas da espessura dos terrenos acima da zona ensaiada antes da realização da obra).

Ha pois que ter em conta dois aspectos na definição das pressões de ensaio. Por um lado as pressões deverão ser função em certa medida das profundidades a que se realizam os ensaios, mas por outro os resultados só são significativos se essas pressões criadas durante o ensaio criarem gradientes que se aproximem dos gradientes que se vão instalar com a construção da obra. Torna-se assim necessário um compromisso entre aqueles limites, que terá que ser definido pelo responsável pelo estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LOUIS, C. and MAINI, Y. N. — *Determination of in situ Hydraulic Parameters in Jointed Rock*. Proceedings 2nd Congress of the International Society for Rock Meccnanics (paper 1-32). Belgrad 1970.

SABARLY, F. — *Les injections et les drainages de fondation de barrages en roches peu permeables*. Geotechnique. June 1968, London.