

PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO ENSAIO LUGEON*

Suggested new methodology for Lugeon test

por
ANTÓNIO NAZARETH**

RESUMO — Demarcam-se os objectivos do ensaio Lugeon, como teste da permeabilidade de maciços rochosos, dos objectivos que justificaram a sua concepção, como critério simples para limitar a profundidade de cortinas de impermeabilização.

Propõe-se uma nova metodologia de execução do ensaio, decompondo-o em três fases destinadas, respectivamente, à avaliação: 1.º, da permeabilidade do maciço rochoso ensaiado; 2.º, das alterações da permeabilidade consequentes da percolação induzida pelo próprio ensaio; 3.º, da susceptibilidade do maciço à rotura hidráulica.

Apresentam-se expedientes práticos para a selecção das pressões de ensaio e para a interpretação dos resultados.

Justifica-se a complementaridade do teste Lugeon assim reformulado e do estudo geológico-estrutural dos maciços rochosos ensaiados e salientam-se as vantagens consequentes, designadamente para o zonamento geotécnico, para a delimitação de zonas saturadas e para o projecto de cortinas de impermeabilização e de órgãos de drenagem de obras de retenção de água.

SYNOPSIS — The Lugeon test finalities, as permeability test, are distinguished from the original simple criterion to limit the depth of curtain grouting.

A new methodology is suggested, carried out in three phases: 1st, to estimate the permeability of rock masses; 2nd, to estimate the permeability alterations resulting from seepage induced by the test itself; 3rd, to estimate the rock mass susceptibility to hydraulic fracturation.

Practical supports are presented in order to select test pressures and to interpret the tests results.

Lugeon tests, as a useful complement to rock masses geological-structural study, are justified by the consequent advantages, namely for geotechnical zoning, for delimiting saturation zones and for designing curtain grouting and drainage systems.

1 — INTRODUÇÃO: OBJECTIVOS DO ENSAIO LUGEON

O ensaio Lugeon é, no domínio da geotecnia, um tema inesgotado, não obstante a já vasta bibliografia que dele se ocupa e que, a um tempo, lhe louva as virtudes e lhe respeta as deficiências.

* Trabalho recebido em Dezembro de 1986. A discussão do trabalho está aberta por um período de três meses.

** Geólogo, Hidrotécnica Portuguesa.

Se outras virtudes lhe não apontassem, teria, pelo menos, a da persistência com que é utilizado no reconhecimento da fundação de barragens e é invocado para justificar tratamentos de impermeabilização da mesma fundação.

A cada passo se lhe apontam, igualmente, deficiências comprometedoras, desde a problemática significância da unidade de absorção de água (a unidade Lugeon) em que traduz os seus resultados, até à problemática validade da própria execução.

Recorda-se que o ensaio em causa foi concebido pelo geólogo suíço Maurice Lugeon (1933), como um critério simples para limitar a profundidade a atingir com as cortinas de impermeabilização na fundação rochosa de barragens de betão, com altura superior a 30 m. O ensaio consistia na injeção de água em troços, com comprimento até 5 m, de furos de sondagens, à pressão estabilizada de 10 kgf/cm^2 , durante 5 a 10 minutos. Seria objecto de tratamento, com injeções de caldas de cimento, toda a espessura do maciço de fundação em que se tivesse registado absorção de água superior a 1 litro por minuto e por metro de furo ensaiado.

Com a adaptação do ensaio ao reconhecimento geotécnico dos maciços rochosos, a sua execução passou a contar com outros escalões de pressão de injeção de água, em sucessão crescente até 10 kgf/cm^2 ($\sim 1 \text{ MPa}$) e, depois, decrescente. Efectuado nestas condições, o ensaio evidenciava, geralmente, uma variação não-linear do caudal injectado com as respectivas pressões de injeção. Tal variação seria atribuível a alterações, por um lado, do regime de escoamento da água nas fracturas e, por outro, das características das próprias fracturas. As últimas alterações dever-se-iam à obstrução (colmatação) ou desobstrução (lavagem) das fracturas, em consequência do arrastamento das partículas sólidas que nelas se podem encontrar ou ao alargamento das mesmas fracturas pela pressão da água injectada. Poderia ainda concluir-se que os fenómenos de obstrução e de desobstrução variariam também em função do intervalo de tempo em que decorresse o escoamento, ainda que a pressão de injeção de água se mantivesse constante.

Apesar de tais variações de comportamento hidráulico no decurso dos ensaios, tem continuado a utilizar-se a absorção de água, expressa em unidades Lugeon (litros por minuto e por metro de furo ensaiado, à pressão estabilizada de 1 MPa), como indicador da permeabilidade dos maciços, facto que tem gerado, naturalmente, crescente contro-
vêrsia.

Efectivamente:

- por um lado, não é lícito tomar-se, como indicador da permeabilidade de um maciço rochoso, a absorção, desde que se tenham provocado alterações das condições de percolação e se não tenham levado em consideração as alterações eventuais do regime de escoamento;
- por outro, não pode deixar de ter-se em devida atenção, num reconhecimento geotécnico, toda a alteração da permeabilidade do maciço rochoso, em consequência da instalação artificial de novos gradientes hidráulicos, pouco ou muito

variáveis, e também em consequência de fenómenos que evoluem com o tempo, ainda mais quando se trata de maciços de fundação para obras de retenção de água.

A permeabilidade ou condutividade hidráulica dos maciços rochosos fracturados é, portanto, um parâmetro mais ou menos variável em função da pressão da água e do intervalo de tempo em que se processa o escoamento. Distingue-se, por isso (salvo em casos particulares de fronteira), da permeabilidade ou condutividade hidráulica dos meios porosos, que se identifica com a constante de proporcionalidade entre a velocidade de escoamento e a perda de carga unitária.

Assim, o estudo das características hidráulicas de um maciço rochoso tem, pois, de incluir a avaliação não só da respectiva permeabilidade inicial (primeiro objectivo) como das consequências que resultam da instalação artificial, no maciço, de novos gradientes hidráulicos (segundo objectivo).

Estes objectivos demarcam-se claramente dos que justificaram a concepção do ensaio e justificam a aplicação de metodologia adequada. No entanto, é manifesta a insuficiência das modificações já empreendidas, facto que foi salientado no último Congresso das Grandes Barragens (Lausanne, 1985), com as seguintes afirmações de A. Bozovic, relator da Questão 58:

”Il y a intérêt à modifier l’essai Lugeon de manière à assurer que le déficit d’absorption initial soit obtenu sous une pression suffisamment basse pour ne pas déranger la perméabilité naturelle par la pression appliquée” (p. 1543);

”Le coefficient de perméabilité devrait être calculé pour la plus basse pression initial au lieu de dix bars (soit comme mesure directe, soit comme valeur extrapolée)” (p. 1545).

Nestas afirmações invoca-se, contudo, apenas o primeiro dos dois objectivos fundamentais que justificam o ensaio da permeabilidade dos maciços rochosos.

O segundo objectivo, igualmente importante para a caracterização hidráulica daqueles maciços, exige outras modificações do ensaio que lhe permitam avaliar a importância das alterações da permeabilidade inicial e a dos factores que as determinam.

A metodologia que se propõe, com base no equipamento tradicionalmente utilizado, procura dar satisfação a tais exigências, dentro das limitações de exequibilidade do ensaio.

O autor socorreu-se, naturalmente, da sua experiência em trabalhos de reconhecimento, mas não lhe foi menos útil a experiência alheia a que tem tido acesso. Desta salienta os estudos de Claude Louis, com evidência para a ”Introduction à l’Hydraulique des Roches” (1974), e também as reflexões de F. Sabarly (1968) sobre o mesmo tema.

2 — METODOLOGIA DA EXECUÇÃO

2.1 — Esquema genérico

Para se atingirem os objectivos enunciados na alínea anterior, propõe-se decompor a execução do ensaio nas seguintes três fases:

1.ª Fase

avaliação da permeabilidade inicial: com utilização de pressões de injeção de água, tão baixas quanto possível;

2.ª Fase

avaliação das alterações da permeabilidade: com utilização de pressões de injeção de água em sucessões crescente e decrescente, cujo valor máximo não ultrapasse, necessariamente, o peso próprio do maciço rochoso (P_r) no local do ensaio;

3.ª Fase

teste da susceptibilidade à rotura hidráulica: com utilização de pressões de injeção de água em sucessões crescente e decrescente, superiores ao peso próprio do maciço (P_r).

2.2 — 1.ª Fase: avaliação da permeabilidade inicial

Tem-se presente que, numa rede de fracturação, as condições de escoamento da água, dependentes da geometria das fracturas, são muito variáveis, não só de sistema para sistema de fracturas, como de fractura para fractura do mesmo sistema, como ainda ao longo da mesma fractura e que, em geral, pode existir uma anisotropia da permeabilidade do maciço rochoso, pior ou melhor definida.

Tal complexidade é justificação suficiente para concluir pela impossibilidade prática de medir aquela permeabilidade. Além do mais, às dificuldades decorrentes da geometria das fracturas acrescentam-se as que são do âmbito exclusivo da hidráulica dos maciços rochosos.

Minimizadas, porém, as causas das alterações da permeabilidade e a turbulência do escoamento com o emprego de baixas pressões de ensaio, pode supor-se que as absorções de água pelo maciço se identificam, praticamente, com a respectiva permeabilidade inicial.

A avaliação desta será, nestas condições, tanto menos imprecisa quanto maior for o número de ensaios e o volume de maciço que estes, em conjunto, abrangerem. Beneficiará, além disso, com o estudo prévio da fracturação, mediante a observação directa das fracturas nos afloramentos, em escavações superficiais (trincheiras, pedreiras) e subsuperficiais (poços, galerias) e em sondagens não-destrutivas.

A distinção de zonas diferenciadas com características de fracturação peculiares contribui, obviamente, para o respectivo correlacionamento com os resultados do ensaio. Neste sentido, o estudo da fracturação encontra, por regra, um apoio útil na prospecção geofísica, designadamente na de sísmica de refração e na eléctrica (resistividade aparente).

Por razões hidráulicas, é condição necessária para a realização do ensaio que o maciço rochoso se encontre saturado de água. É norma, por isso, proceder-se ao prévio encharcamento da zona de ensaio até se atingir uma relativa estabilização do nível de água acima dessa zona. Esta operação pode ser mais ou menos bem sucedida, conforme a permeabilidade da rocha a ensaiar.

No caso de o maciço se encontrar naturalmente saturado, a injeção de água só é possível depois de a pressão de ensaio P vencer a pressão P_u exercida pela água de saturação, efectuando-se, por isso, em função da pressão efectiva $P' = P - P_u$.

Em qualquer caso, porém (no pressuposto de que o escoamento da água nas fracturas mantém regime laminar ou com turbulência mínima e não é significativamente alterado por obstruções ou desobstruções), as absorções A serão proporcionais ou praticamente proporcionais às pressões efectivas de injeção utilizadas. Portanto, a função $f(P') = A$ é representada, num sistema de eixos coordenados, por uma recta, correspondendo a cada valor de P' um só valor de A . Assim, qualquer valor de $f(P')$ indicia igualmente a permeabilidade do maciço, pelo que o resultado desta 1.ª fase do ensaio poderá traduzir-se também pela absorção (em litros por minuto e por metro de furo ensaiado), extrapolada para $P' = 1$ MPa, isto é, traduzir-se em unidades Lugeon (u. L.), beneficiando da vantagem de conservar uma unidade já consagrada.

Na Fig. 1, representam-se graficamente as duas situações consideradas nesta 1.ª fase do ensaio: a) relativa a um maciço sujeito a prévia saturação; b) relativa a um maciço naturalmente saturado.

Acontece, por vezes, que fenómenos de turbulência afectam o escoamento da água nas fracturas, mesmo com a injeção efectuada a baixas pressões, e determinam que o crescimento das absorções fique abaixo da proporcionalidade linear em relação às pressões. A função $f(P') = A$ será então representada graficamente por uma curva e a permeabilidade inicial do maciço inferida da tangente na origem das pressões efectivas, conforme se esquetiza na Fig. 2.

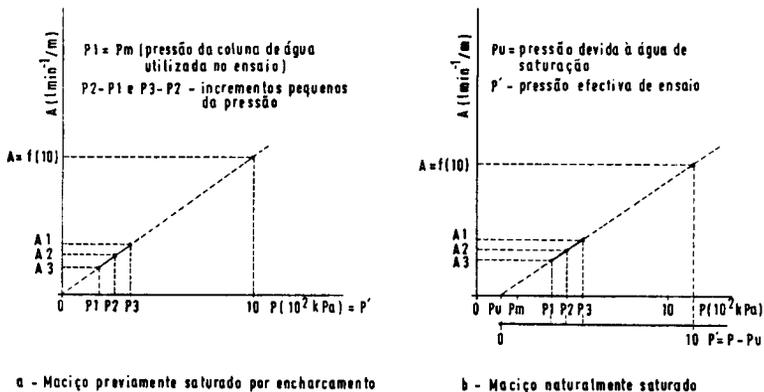


Fig. 1 — Ensaio Lugeon: 1.ª fase, com regime de escoamento laminar

A utilização da unidade Lugeon, para traduzir a permeabilidade avaliada segundo o critério exposto e ilustrado com os casos típicos das Figs. 1 e 2, implica, contudo, um conceito reformulado daquela unidade, com o seguinte conteúdo:

“absorção de 1 litro de água, por minuto e por metro de furo ensaiado, que se registaria com a pressão efectiva estabilizada de 1 MPa, se o escoamento mantivesse regime laminar”.

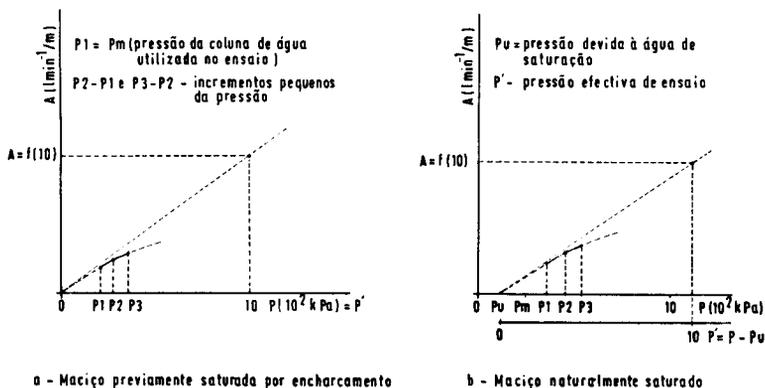


Fig. 2 — Ensaio Lugeon: 1.ª fase, com escoamento afectado por turbulência

O sucesso desta 1.^a fase do ensaio está muito ligado ao rigor da medição das pressões de ensaio (pressões da água no troço do furo ensaiado). Tem sido norma, geralmente seguida, calcular essas pressões pela adição à pressão manométrica, lida próximo da boca do furo, a pressão da coluna de água, correspondente ao desnível entre o manómetro e o troço do furo ensaiado, e pela dedução das perdas de carga ocorridas nas condutas do equipamento entre os mesmos limites.

Este procedimento, no entanto, tem o inconveniente não só de a estimativa das perdas de carga poder vir afectada de erro, tanto mais significativo quanto mais elevado for o caudal, como também de ser feito "a posteriori", impossibilitando, por isso, a utilização de pressões de ensaio prévia e criteriosamente seleccionadas.

A medição directa das pressões de ensaio conferiria, pois, maior credibilidade ao teste da permeabilidade e garantiria maior rigor à localização e delimitação das zonas saturadas. Aliás, essa medição tem já sido efectuada por algumas empresas de sondagens de reconhecimento geológico e geotécnico, recorrendo ao emprego de uma célula piezoeléctrica para medição de tensões neutras, colocada no interior do troço do furo a ensaiar. Este expediente envolve, porém, alguns riscos para o cabo eléctrico ligado à célula, susceptível de ser danificado pela pressão do obturador contra as paredes rochosas do furo, e pode condicionar a eficiência da obturação. Vale a pena, por isso, salientar a importância dos esforços desenvolvidos no LNEC, referidos por Oliveira (1975), para a criação de um protótipo de obturador que incorpora a referida célula.

2.3 — 2.^a Fase

2.3.1 — *Alterações da permeabilidade pelas obstruções e desobstruções das fracturas*

É de há muito sabido que a injeção de água nos maciços rochosos tem como consequência o arrastamento de partículas materiais soltas existentes nas fracturas (partículas resultantes da meteorização ou da tectonização da rocha ou do transporte por águas de circulação subterrânea). Conforme as circunstâncias, aquele arrastamento pode originar a obstrução ou a desobstrução das fracturas e, consequentemente, a redução ou o aumento da respectiva permeabilidade.

Pode, assim, supor-se que idênticos processos sejam desencadeados em consequência da instalação, nos mesmos maciços rochosos, de gradientes hidráulicos devidos a sobrecargas decorrentes, designadamente, da criação de albufeiras. Afigura-se, pois, pertinente, a avaliação do aumento ou decréscimo da permeabilidade que tais processos determinem.

A continuidade de qualquer dos processos, durante os ensaios, quer com a pressão estabilizada, quer em consequência da variação crescente ou decrescente da pressão, sugere que, ao menos teoricamente, se possa atingir o objectivo proposto. De facto, com repetições sucessivas da 2.^a fase, a obstrução ou a desobstrução tenderão a perder importância e até a desaparecer, tal como sucede no exemplo da Fig. 3. Nessa situação limite, a permeabilidade diferirá da que foi inferida na 1.^a fase, mas o significado do aumento ou decréscimo que revelar deverá ser averiguado no quadro geral dos resultados.

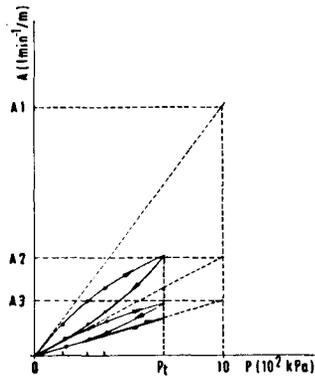


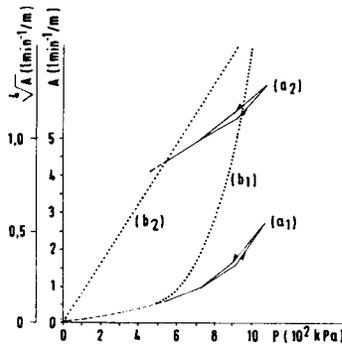
Fig. 3 — Ensaio Lugeon: decréscimo e estabilização da permeabilidade em consequência de obstrução das fracturas

A experiência poderá decidir da utilidade deste expediente. No entanto, a simples identificação de cada um dos processos tem, só por si, manifesto interesse, não só para prever o comportamento hidráulico de maciços rochosos, como para ser tida em conta nos tratamentos de impermeabilização (aliás, redução criteriosa da permeabilidade) de fundações de barragens. Tem-se revelado, além disso, uma preciosa informação complementar de estudos geológicos e geotécnicos, pois a distribuição das obstruções e desobstruções das fracturas é, frequentemente, correlacionável com características geológico-estruturais diferenciadas, em particular com horizontes de meteorização. Verifica-se mesmo que essa distribuição possibilita estabelecer zonamentos geotécnicos que, de outro modo, poderiam passar despercebidos.

2.3.2 — Alterações da permeabilidade por deformações elásticas do maciço rochoso

Recordam-se as reflexões expostas por F. Sabarly (1968), em que aborda problemas relativos aos ensaios Lugeon efectuados em rochas pouco permeáveis. Segundo este autor, o aumento rápido das absorções relativamente ao das pressões pode dever-se à abertura elástica das fracturas. Esta dedução baseou-se em cálculos sumários e simplistas, conforme as suas próprias palavras, da deformação elástica a que seriam sujeitas as paredes de uma fractura, de mínima abertura inicial, em consequência do incremento da pressão nelas aplicada pela água injectada durante um ensaio. A deformação inferida justificaria que as absorções crescessem proporcionalmente à quarta potência da pressão.

Difícilmente, porém, as condições idealizadas para suporte desta dedução se podem encontrar na realidade. De facto, os fenómenos diversos, mecânicos e hidráulicos, desencadeados pela injeção de água nos maciços rochosos, condicionam-se mutuamente e dissimulam, mais ou menos, a manifestação característica que de cada um, separadamente, se poderia esperar. O caso particular da abertura elástica das fracturas não é excepção. No entanto, a ocorrência deste fenómeno pode identificar-se ou, pelo menos, suspeitar-se desde que o quociente A/P (absorções/pressões respectivas) cresça continuamente com as pressões, sem pontos de inflexão notáveis (não havendo, assim, lugar para confusão com a rotura hidráulica), e que, com o decréscimo das pressões se inverta aquela variação (condição que não permite confundir o fenómeno com o da desobstrução).



Barragem de Almourol : sondagem PS 29 (29,00/35,85 m)
em gneisses biotíticos sãos, moderada e intensamente
fracturados

- | | |
|--|--|
| a) Curvas do ensaio | b) Curvas teóricas ($P = K \sqrt[4]{A}$) |
| (a ₁) $f(P) = A$ | (b ₁) $f(P) = A$ |
| (a ₂) $f(P) = \sqrt[4]{A}$ | (b ₂) $f(P) = \sqrt[4]{A}$ |

Fig. 4 — Ensaio Lugeon: abertura elástica das fracturas

Foi este o critério utilizado na interpretação da abertura elástica no ensaio Lugeon da Fig. 4, apresentado a título de exemplo e retirado do estudo geológico-geotécnico efectuado pela Hidrotécnica Portuguesa (1986) da fundação da barragem de Almourol, no rio Tejo. Na representação gráfica respectiva, pelas curvas $f(P)=A$ e $f(P)=\sqrt[4]{A}$, incluem-se também as curvas teóricas das mesmas funções, respeitando as deduções de Sabarly e deduzidas a partir dos valores mais baixos de pressão e de absorção do ensaio, com o fim de evidenciar a importância dos desvios entre essas curvas e as do ensaio.

De salientar que a abertura elástica das fracturas, interpretável num ensaio de injeção de água como é o ensaio Lugeon, só pode identificar-se em maciços de baixa permeabilidade, condição necessária para que a turbulência do escoamento da água nas fracturas não descaracterize a manifestação daquele fenómeno. Com baixas permeabilidades, as absorções registadas no ensaio também deverão ser baixas, circunstância que chama a atenção para a importância dos erros relativos de medição dos caudais injectados.

2.3.3 — *Consequência na variação do regime de escoamento*

A interpretação do comportamento hidráulico dos maciços rochosos apresenta crescente complexidade quando se ponderam as modificações de regime de escoamento nas fracturas, durante o ensaio, e se encara a inevitabilidade de, no mesmo instante, o escoamento se poder processar com regimes distintos em fracturas com diferentes características de abertura e com atitudes diversas. Assim, mesmo que não ocorram fenómenos que alterem as características de permeabilidade, a identificação do regime de escoamento só não deixará dúvidas se for integralmente laminar. Porém, desde que esses fenómenos ocorram, a sua ponderação, não sendo indispensável para a avaliação da permeabilidade, pode ser significativa para o estudo geotécnico, se dela se puder inferir o estado da fracturação dos maciços.

É facto que, entre a fracturação e a permeabilidade/regimes de escoamento, não há correspondência recíproca. O mesmo resultado, em termos hidráulicos, pode ser determinado por redes de fracturação diversas, diferenciadas no número, na abertura e na atitude das fracturas. É elucidativo o exemplo apresentado por Sabarly (1968). Segundo este autor, uma só fractura de 0,25 mm de abertura garante uma absorção equivalente a dez fracturas com 0,12 mm ou a cem fracturas com 0,06 mm de abertura (supondo que o escoamento se faz em regime laminar).

Pode, assim, concluir-se que, uma vez conhecidas as características da fracturação, é possível encontrar correlações entre as características estruturais e as hidráulicas dos maciços rochosos, facto que justifica um cuidadoso estudo geológico-estrutural, quanto possível antecedendo a realização dos ensaios de permeabilidade.

2.4 — 3.^a Fase: teste da susceptibilidade à rotura hidráulica

A utilização de pressões de ensaio superiores à resultante do peso próprio do terreno P_t , no local de ensaio implica o risco de a pressão de injeção poder encontrar condições para vencer a resistência do maciço rochoso e provocar rotura hidráulica, identificável pelo aumento brusco do caudal injectado. No volume de maciço que constitui, em geral, objecto do ensaio de permeabilidade, a fracturação de diaclasamento e o perfil de meteorização são responsáveis pelo baixo nível que aquela resistência pode atingir, a ponto de se identificar, praticamente, com o peso do terreno, eventualmente acrescido de sobrecargas (efeitos de montanha, massas de água, aterros, edificações).

A efectivação do ensaio em tais condições constitui, assim, não só o prolongamento do ensaio da permeabilidade do maciço rochoso, mas também um teste à susceptibilidade de deste à rotura hidráulica.

Num ensaio da permeabilidade, esta ocorrência tem de considerar-se um acidente indesejável. Mas, desde que denuncie o risco de rotura hidráulica em consequência da instalação de subpressões, assume inegável interesse, quer na programação de cortinas de impermeabilização, quer, sobretudo, na programação de sistemas de drenagem.

No caso da fundação de uma barragem de betão, o teste da susceptibilidade à rotura hidráulica justifica-se, em particular, até à profundidade limite z em que as subpressões P_a expectáveis possam superar as pressões devidas ao peso próprio do maciço P_t , imediatamente a jusante da obra. Portanto, designando por γ_t o peso específico do terreno, por h a altura de água acima do terreno e abstraindo de perdas de carga na fundação, para que $P_a \geq P_t$, isto é, $\gamma_a (h+z) \geq \gamma_t z$, resulta que $z < h (\gamma_t/\gamma_a - 1)$.

Concluiu-se, assim, uma vez mais, que é importante a selecção criteriosa das pressões de ensaio, bem como o rigor da medição destas, recorrendo ao expediente referido na alínea 2.2.

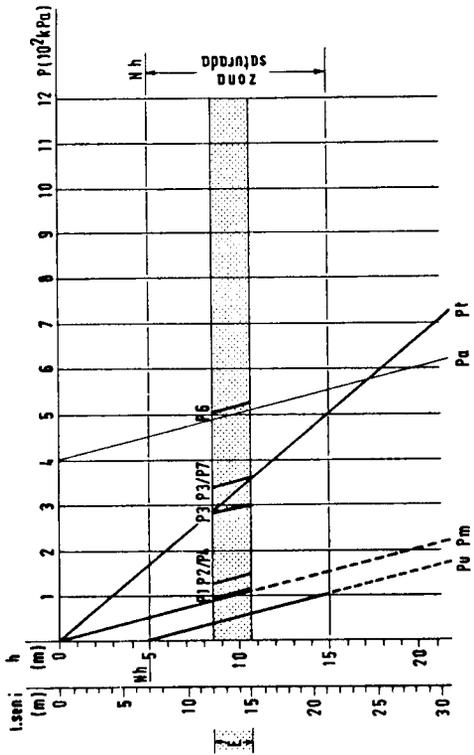
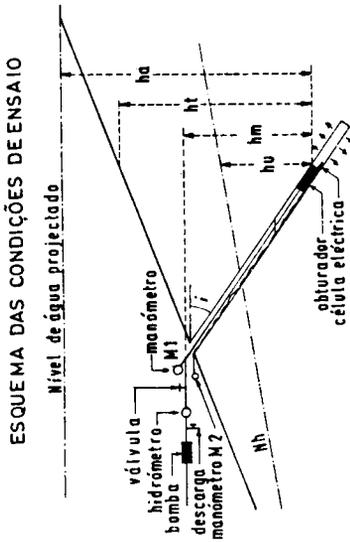
3 — EXECUÇÃO DO ENSAIO

3.1 — Selecção das pressões de ensaio

Como procurou justificar-se, a metodologia exposta exige que as pressões de ensaio sejam previamente seleccionadas e haja condições de as garantir com a medição directa à profundidade do ensaio.

Para selecção das pressões, afigura-se prático construir um ábaco, como o que se apresenta na Fig. 5, em que se delimitam, para cada caso, os domínios das pressões de ensaio relativas a cada fase, em função da profundidade do ensaio.

Os limites fixos daqueles domínios são a pressão mínima de ensaio P_m (isto é, a pressão exercida pela coluna de água) e a pressão devida ao peso próprio do terreno P_t à profundidade mínima do ensaio (limite superior das pressões da 2.^a fase) ou à profundidade máxima do ensaio (limite inferior das pressões da 3.^a fase).



- Pm - pressão exercida pela altura de hm utilizada no ensaio
 - Pt - pressão devida ao peso do terreno (acrescida de eventuais sobrecargas) correspondente ao desnível ht
 - Pu - pressão exercida pela altura hu da água de saturação natural
 - Pa - subpressão expectável à profundidade mínima de ensaio devida ao desnível ha
 - Nh - nível hidrostático
- Escalas verticais do ábaco - dos desníveis (h) e das projecções verticais dos comprimentos (l.seni i)
 E - zona de ensaio referenciada e pressões de ensaio arbitrárias (P1 a P7)

Fig. 5 — Ensaio Lugeon: ábaco para selecção das pressões de ensaio

O limite que separa as pressões das 1.^a e 2.^a fases não é fixo; deverá arbitrar-se de acordo com o critério geral e os condicionamentos de cada caso, encontrando-se entre estes a eventual saturação do maciço rochoso.

O limite superior das pressões da 3.^a fase deve ser muito ponderado em função das características da obra, das da fundação e, ainda, de finalidades específicas do ensaio.

A ocorrência de rotura hidráulica, podendo ser denunciadora do risco de rotura resultante de subpressões, constitui, por vezes, um dado importante desta fase do ensaio, pelo que também se incluem no ábaco da Fig. 5 os valores expectáveis para aquelas subpressões (valores que não interessará ultrapassar significativamente pelas pressões de ensaio).

Justifica-se prescindir da realização da última fase do ensaio, designadamente:

- quando, à profundidade do ensaio, a subpressão expectável for inferior à devida ao peso próprio do terreno;
- quando existam razões para recear as consequências de repetidas roturas hidráulicas.

Seguindo o critério delineado e considerando, como exemplo, um ensaio a efectuar no troço de 12 a 15 m do furo representado na Fig. 5, seleccionar-se-iam, com apoio do ábaco respectivo, as seguintes pressões de ensaio, expressas em 10^2 kPa (supondo também uma subpressão expectável de 5×10^2 kPa):

1. ^a Fase		2. ^a Fase		3. ^a Fase		
$P_1 = P_m$	P_2	P_3	$P_4 = P_2$	P_5	P_6	$P_7 = P_5$
0,9	1,2	2,8	1,2	3,4	5,0	3,4

Registando-se absorções nulas com P_1 e P_2 , visto que tal pode ser devido à presença eventual de água de saturação natural, justificam-se novos pequenos incrementos da pressão de ensaio até ser ultrapassada a pressão da água de saturação. Se, nestas condições, as absorções persistirem nulas, conclui-se pela impermeabilidade do terreno ensaiado e o ensaio poderá dar-se por terminado, a menos que se queira testar a susceptibilidade daquele à rotura hidráulica com a 3.^a fase.

No caso de haver prévio conhecimento de que o terreno a ensaiar se encontra naturalmente saturado, a pressão mínima de ensaio é acrescida do valor P_u (pressão devida à água de saturação) à profundidade mínima de ensaio. Arbitrando para P_u o valor de $0,5 \times 10^2$ kPa, seleccionar-se-iam, neste caso, as seguintes pressões de ensaio:

1.ª Fase		2.ª Fase		3.ª Fase		
$P_1 = P_m$	P_2	P_3	$P_4 = P_2$	P_5	P_6	$P_7 = P_5$
1,4	1,6	2,8	1,6	3,4	5,0	3,4

3.2 — Comprimento dos troços a ensaiar

Segundo o próprio M. Lugeon (1933), a medição das absorções em furos de sondagens poderia fazer-se metro a metro ou em troços com 5 m de comprimento. No entanto, foi este comprimento que acabou por se rotinar nos ensaios de permeabilidade (como nas injeções de impermeabilização), devido, certamente, mais a um compromisso técnico-económico que às condições geológico-estruturais ou hidráulicas do maciço rochoso. Apesar de tudo, executam-se, com alguma frequência, ensaios Lugeon em troços com comprimento diferente, em geral inferior a 5 m, mas este procedimento não tem características de normalidade.

Reconhecida, porém, a importância dos factores geológico-estruturais no condicionamento dos resultados do ensaio, tem de concluir-se que, no troço a ensaiar, a presença daqueles factores deveria caracterizar-se por certa homogeneidade. A atribuição de um comprimento médio ao troço de ensaio deveria, assim, ser feita em consequência do estudo geológico-estrutural do maciço objecto de reconhecimento, se possível contando já com alguns ensaios de permeabilidade efectuados em fase inicial desse reconhecimento.

Não se dispondo desses ensaios, haveria que recorrer à experiência de situações análogas. Em todo o caso, parece prudente que, nos primeiros ensaios, se não ultrapassem comprimentos de 2 a 3 m e aconselhável que os trabalhos sejam assistidos por geólogo de engenharia. Este acabará, normalmente, por definir um comprimento médio do troço do ensaio, eventualmente variável com o zonamento previsível das características geológico-estruturais e hidráulicas.

3.3 — Registo de dados

Se a preparação do ensaio deve ser cuidada, com prévia ponderação dos factores condicionantes e dos objectivos, a execução respectiva exige cuidado equivalente, com o emprego, não só de equipamentos adequados, como de operadores preparados.

Assim, é recomendável o uso de bomba de fluxo contínuo para que possam garantir-se pressões de injeção estabilizadas.

A medição directa da pressão no local do ensaio, com célula piezoelétrica, não deve dispensar o emprego de um manómetro à boca do furo, para garantia do controlo das perdas de carga na conduta do equipamento ou de eventuais anomalias.

Os pequenos incrementos de pressão recomendados na 1.^a fase do ensaio e os pequenos caudais que, em diversas situações, se têm de controlar supõem a utilização de manómetros e hidrómetros com precisões adequadas. Com o equipamento tradicional de ensaio, tem-se reconhecido suficientes as precisões mínimas de 20 kPa, para os manómetros, e de 1 l/s para os hidrómetros.

Para controlo da eficiência da obturação, deve recorrer-se a sonda eléctrica que verifique o nível de água acima do obturador no início, durante e no final do ensaio.

O registo das leituras do hidrómetro, para cada escalão de pressão, convém ser feito minuto a minuto, para controlo da regularidade com que o caudal é injectado. Poderá decidir-se encurtar o tempo de injeção se a variação dos caudais injectados, minuto a minuto, for mínima; excepcionalmente, se essa variação não manifestar tendência para estabilizar, é aconselhável prolongar o período normal (10 minutos) de injeção. Este comportamento variável justificará, ainda, decompor o troço ensaiado em troços mais curtos e ensaiar estes separadamente.

É da máxima conveniência que o operador disponha de uma ficha para registo de dados, suficientemente elaborada, para garantir a anotação de todos os elementos essenciais para a interpretação do ensaio, como a que, a título de exemplo, se apresenta no Quadro 1.

Actualmente é já possível medir e registar, de forma contínua e automática, a pressão de ensaio e o caudal injectado, recorrendo à técnica das diagrfias instantâneas digitalizadas, particularmente divulgada por J. Lutz S. A. (1984) e referida com interesse por Tocha Santos (1985).

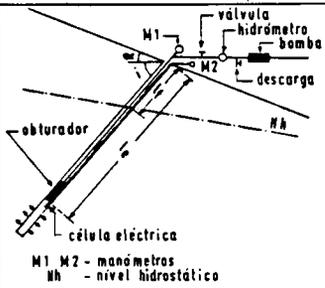
Esta técnica parece, assim, oferecer novas possibilidades de controlo da absorção em função do tempo e da pressão, como também parece oferecer condições para modificar (para mais ou para menos) o tempo de dez minutos classicamente gasto na injeção, em cada escalão de pressão, se tal se justificar no decorrer do ensaio.

3.4 — Interpretação do ensaio

A interpretação do ensaio de permeabilidade Lugeon, qualquer que seja a técnica de execução utilizada, implica um cuidadoso exercício de investigação do significado dos dados recolhidos, incluindo a ponderação dos erros devidos à imprecisão dos aparelhos de medição utilizados e a factores humanos. Posteriormente, implica uma revisão crítica das conclusões perante o quadro geral dos resultados dos ensaios e mesmo dos demais

estudos geológicos e geotécnicos, devendo salientar-se que um zonamento geotécnico correcto tem de contar com um número mínimo de ensaios que possibilite o estabelecimento de relações de analogia.

QUADRO 1

(Estudo)		ENSAIO LUGEON - REGISTO DE DADOS							
(Local de trabalho)		SONDAGEM : / m (n°)							
(Data)		(Operador)							
A) Tentativas de obturação (profundidades)									
1ª <input type="text"/> ; 2ª <input type="text"/> ; 3ª <input type="text"/>									
B) Altura do manómetro M1 acima da boca de sondagem (a)		<input type="text"/>							
C) Profundidades do nível de água acima do obturador									
- no início do ensaio (C1)		<input type="text"/>							
- no final do ensaio (C2)		<input type="text"/>							
D) Diâmetro interno das condutas		<input type="text"/>							
Observações :									
3ª fase									
2ª fase									
1ª fase									
		P1 = Pm	P2	P3	PL	P5	P6	P7	P8
M1									
M2									
1º min									
2º min									
3º min									
4º min									
5º min									
6º min									
7º min									
8º min									
9º min									
10º min									
A médias (l/min)									
A (lmin ² /m)									

Para facilitar o processo interpretativo de cada ensaio, convém rotinar, dentro de certos limites, as respectivas operações, recorrendo para isso a um modelo de ficha como o que se apresenta, a título de exemplo, no Quadro 2. Nesta ficha, além dos dados essenciais para a interpretação do ensaio, figura a representação gráfica deste, elemento

QUADRO 2

<p>(Estudo)</p> <p>(Local de trabalho)</p>	<p>ENSAIO LUGEON - INTERPRETAÇÃO</p> <p>SONDAGEM : / m (N°)</p>																																																																																																				
<p>Inclinação da sondagem (i) =</p> <p>Pressão devida ao lençol de água</p> $P_U = 0,1 \text{ sen } i (l_g - l_f) =$ <p>Pressão do maciço rochoso (e eventuais sobrecargas) estimado para a profundidade mínima do ensaio</p> <p>(Peso específico do maciço $\delta_T \approx$)</p> $P_T \approx 0,1 \delta_T l_g \text{ sen } i (1 + \text{tg } \alpha) \approx$	<p>M1, M2 - manómetros N_h - nível hidrostático</p>																																																																																																				
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">3ª fase</th> <th rowspan="2">2ª fase</th> <th rowspan="2">1ª fase</th> <th rowspan="2">P (M2)</th> <th>P'</th> <th>A₁</th> <th>a) P_U = 0</th> <th>b) P_U ≠ 0</th> </tr> <tr> <th>(P - P_U)</th> <th>(l_{in}/s)</th> <th>P = P</th> <th>P₂ = P - P_U</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table>	3ª fase	2ª fase	1ª fase	P (M2)	P'	A ₁	a) P _U = 0	b) P _U ≠ 0	(P - P _U)	(l _{in} /s)	P = P	P ₂ = P - P _U																																																																																									
3ª fase					2ª fase	1ª fase	P (M2)	P'	A ₁	a) P _U = 0	b) P _U ≠ 0																																																																																										
	(P - P _U)	(l _{in} /s)	P = P	P ₂ = P - P _U																																																																																																	

MACIÇO ROCHOSO ENSAIADO : - Litologia
 - Fracturação
 - Meteorização

- CONCLUSÕES :
- 1) Permeabilidade/ unidades Lugeon :
 - 2) Alterações da permeabilidade
 - Factores
 - Consequências
 - 3) Suscetibilidade à rotura hidráulica
 - 4) Outras deduções

auxiliar muito útil para a identificação dos fenómenos que podem ocorrer conjuntamente durante o ensaio. As conclusões a que este conduzir poderão resumir-se, na mesma ficha, de forma que possam ser transferidas facilmente para as representações gráficas de sondagens e cortes geológico-geotécnicos.

4 — CONSEQUÊNCIAS DA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA NAS INJECCÕES E DRENAGENS DE MACIÇOS ROCHOSOS

O ensaio de permeabilidade desempenha papel de indiscutível importância, não só no projecto de cortinas impermeabilizantes e de órgãos drenantes, como no controlo da eficiência daquelas cortinas. É oportuno, por isso, avaliar as consequências que a metodologia exposta pode ter naquele papel.

Uma primeira consequência atinge o dimensionamento das cortinas, dado que as permeabilidades calculadas com aquela metodologia podem diferir sensivelmente das deduzidas pelo método clássico, umas vezes para mais, outras para menos. Além disso, a identificação de zonas naturalmente saturadas assume significado de particular interesse, como ressalta do estudo, recentemente efectuado pela Hidrotécnica Portuguesa (1986), da fundação da barragem de Serra Serrada (Montezinho). Efectivamente, as zonas de saturação, assinaladas no corte pelo eixo da obra (Fig. 6), relacionaram-se com

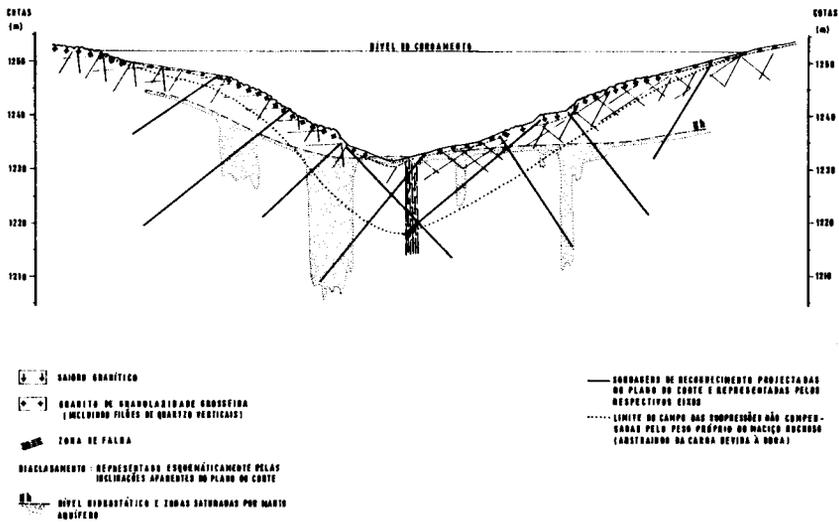


Fig. 6 — Barragem de Serra Serrada (Montezinho). Corte geológico simplificado pelo eixo com identificação de zonas saturadas

descontinuidades subverticais do substrato granítico, pouco oblíquas ao vale, consideradas por isso vias preferenciais de percolação.

Uma segunda consequência atinge o grau de adequação do tratamento, desde que a caracterização geológico-estrutural beneficie com a execução proposta para os ensaios Lugeon, relativamente à execução clássica.

Uma terceira consequência da metodologia proposta atinge o controlo da eficiência da injeção. De facto, devem dispensar-se, nos ensaios efectuados para esse controlo, os escalões de pressão susceptíveis de provocar rotura hidráulica e, portanto, de comprometer a eficiência do tratamento, isto é, deve reduzir-se o ensaio às 1.^a e 2.^a fases, eventualmente até apenas à 1.^a fase.

Finalmente, recorda-se que o projecto dos órgãos drenantes procurará interferir com os sistemas de fracturação que ofereçam melhores condições de drenagem subterrânea e com os que oponham maiores dificuldades de tratamento pelas injeções. Além disso, os órgãos de drenagem interessar-se-ão, em particular, pelo volume de maciço que se tenha revelado susceptível a rotura hidráulica.

5 — CONCLUSÕES

A metodologia proposta corresponde a uma flexibilização do ensaio Lugeon, que contraria um procedimento mais ou menos rotinado e crescentemente controverso. Sintomático da forma rotinada é o facto de as empresas de sondagens de reconhecimento apresentarem, normalmente, preços unitários para aquele ensaio.

A valorização que se atribui ao ensaio Lugeon, nos campos do reconhecimento geológico e geotécnico, compensaria o seu emprego mais intensivo.

A necessidade de adaptação do ensaio às diversas condições geológico-estruturais implica que se exijam do geólogo de engenharia as responsabilidades de:

- 1.º) definir, no âmbito de um programa de trabalhos de reconhecimento geológico-geotécnico, as características dos ensaios de permeabilidade de acordo com a caracterização geológico-estrutural que tenha efectuado previamente;
- 2.º) dar assistência à execução do programa de reconhecimento e, nesse papel, adaptar as especificações dos ensaios aos níveis crescentes de conhecimento geológico-estrutural e hidráulico;
- 3.º) integrar as interpretações dos ensaios efectuados no quadro geral dos estudos geológicos e geotécnicos;
- 4.º) participar na concepção, execução e controlo da eficiência de órgãos de estanquidade e de drenagem, como órgãos interceptores dos sistemas naturais de drenagem subterrânea.

6 — AGRADECIMENTOS

Para a elaboração deste artigo, o autor contou com a colaboração crítica dos técnicos que consigo se têm envolvido em estudos e trabalhos de carácter geotécnico, devedores, por isso, do seu reconhecimento.

Manifesta-se, além disso, devedor das entidades que confiaram aqueles estudos à equipa em que se integra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOZOVIC, A. (1985) — Relatório Geral da Questão 58 (*Traitement des fondations en relation avec les infiltrations*), do 15.º Congresso das Grandes Barragens. Lausanne.
- HIDROTÉCNICA PORTUGUESA (1986a) — *Aproveitamento de Almourol. Estudos Geológicos e Geotécnicos* (An. 4 do Projecto). EDP.
- HIDROTÉCNICA PORTUGUESA (1986b) — *Aproveitamento Hidráulico do Alto Sabor. Escalão de Serra Serrada. Estudos Geológicos e Geotécnicos* (An. 2 do Projecto para Concurso). Câmara Municipal de Bragança.
- JEAN LUTZ, S. A. (1984) — *Logicard - Logiciel de Traitement des Paramètres de Forage. Application à l'Interprétation Géotechnique des Paramètres*. Pau.
- LOUIS, C. (1974) — *Introduction à l'Hydraulique des Roches*. Bull. BRGM (2), III, 4, pp. 283-356.
- LUGEON, M. (1933) — *Barrages et Géologie*. Librairie de l'Université. F. Rouge & C.^a, S.A. Lausanne.
- OLIVEIRA, R. (1985) — *Um Novo Equipamento para a Realização de Ensaios de Permeabilidade em Maciços Rochosos*. Geotécnico n.º 1, UNL/Fac. Ciências e Tecnologia. Lisboa.
- SABARLY, F. (1968) — *Les Injections et les Drainages de Fondation de Barrages en Roches peu Perméables*. Géotechnique, 18: 229-249. The Institution of Civil Engineers. London.
- TOCHA SANTOS, J. & LOPES, R. (1985) — *Tratamento de Fundações de Barragens por Injecções. Técnicas de Programação e Controlo*. Comunicação no painel sobre Geotecnia nas Grandes Barragens, sob o patrocínio da SPG e Ordem dos Engenheiros. Fac. Eng Porto.