

## **APOIO AO DESENVOLVIMENTO TÉCNICO-CIENTÍFICO NO BRASIL**

A FVD – Fundação Victor Dequech, entidade sem fins lucrativos, criada em 2001, apoia e incentiva ações e projetos de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico e Inovativo no Brasil.

Com foco na pesquisa e engenharia mineral -- bem como nas áreas de energia, óleo e gás, meio ambiente e tecnologias a elas relacionadas -- a FVD sente-se plenamente honrada por apoiar a ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental na edição de suas Diretrizes, Guias, Manuais, Boletins e outros documentos assemelhados, agora como Normas Técnicas dessa conceituada associação.

A FVD e a ABGE estão irmanadas no esforço para a educação e a capacitação continuada, que proporcionam qualificação, habilidades e competências de empresas e de profissionais, contribuindo assim com o desenvolvimento e a melhoria da qualidade de vida em nosso país.

Cumprimentamos a todos os participantes dessa iniciativa pioneira.

Antonio de Padua Vieira Chaves  
**Diretor Presidente da FVD**



Rua São Vicente, 255. Bloco B  
Bairro Olho D'água - Belo Horizonte, Minas Gerais,  
Brasil. CEP 30.390-570.  
Tel. +55 31 3288-1742 | [www.fvd.org.br](http://www.fvd.org.br)



NORMA DA ASSOCIAÇÃO  
BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE  
ENGENHARIA E AMBIENTAL

NÚMERO DE REFERÊNCIA:  
**NORMA ABGE 108/2024**  
1ª Edição, 2024

**ENSAIO DE PERDA  
D'ÁGUA SOB PRESSÃO**

NORMA ABGE 108  
1ª Edição, 2024

ABGE — AJUDANDO AS EMPRESAS A TRABALHAREM MELHOR



Copyright 2024. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental – ABGE  
Todos os direitos reservados a ABGE.

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)**

Norma ABGE - 108/2024 : ensaio de perda d'água sob  
pressão. -- 1. ed. -- São Paulo : ABGE, 2024.

Vários colaboradores.  
Bibliografia.  
ISBN 978-65-88460-29-0

1. Geotecnia 2. Investigação geológica  
3. Investigações geotécnicas 4. Normas técnicas.

24-198145 CDD-624.15  
-624.151

**Índices para catálogo sistemático:**

1. Geotecnia 624.15  
2. Geologia de engenharia 624.151

Eliane de Freitas Leite - Bibliotecária - CRB 8/8415

**Sugestão de referência bibliográfica:**

Norma ABGE 108/2024: Ensaio de perda d'água sob pressão. Vários colaboradores.  
1ª Edição. São Paulo: ABGE, 2024.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL – ABGE**  
**Av. Prof. Almeida Prado, 532, Prédio 59. Cidade Universitária, São Paulo, SP CEP 05508-901**  
**www.abge.org.br – abge@abge.org.br**  
**Fones: (11) 3767.4361 (11) 9.8687.6560**

A ABGE e todos os colaboradores, revisores, coordenadores, autores e editor participantes dessa Norma ou de artigos e livros utilizados como referência bibliográfica, não possuem responsabilidade de qualquer natureza por eventuais danos ou perdas pessoais ou de bens originados do uso da presente publicação. Aqueles que usam essa publicação são responsáveis por tomar suas próprias decisões quando aplicarem as informações aqui fornecidas e as cotejarem e harmonizarem com outras. Críticas e contribuições devem ser encaminhadas a Secretaria Executiva da ABGE:  
**abge@abge.org.br**

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| APRESENTAÇÃO .....  | 4  |
| <b>1.</b> INTRODUÇÃO .....  | 6  |
| <b>2.</b> DEFINIÇÃO.....  | 7  |
| <b>3.</b> FINALIDADE.....   | 7  |
| <b>4.</b> CRITÉRIOS DE PRESSÃO.....   | 8  |
| <b>5.</b> EQUIPAMENTO UTILIZADO.....  | 10 |
| <b>6.</b> ENSAIO DE PERDA DE CARGA.....   | 15 |
| <b>7.</b> PRÁTICA DO ENSAIO.....  | 25 |
| <b>8.</b> DETERMINAÇÃO DOS RESULTADOS .....                                     | 30 |
| 8.1 Cálculo da carga efetiva ( $C_e$ ) .....                                    | 31 |
| 8.2 Cálculo da perda d'água específica (PE) .....                               | 33 |
| 8.3 Cálculo da condutividade hidráulica .....                                   | 33 |
| <b>9.</b> ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO TRECHO ENSAIADO.....                      | 36 |
| <b>10.</b> ESPECIFICAÇÕES DOS TRABALHOS E IMPORTÂNCIA DO<br>REGIME LAMINAR..... | 42 |
| <b>11.</b> PADRONIZAÇÃO E DIGITALIZAÇÃO DE RESULTADOS .....                     | 46 |
| <b>12.</b> PRINCIPAIS PARTICIPANTES .....                                       | 47 |
| <b>13.</b> REFERÊNCIAS NORMATIVAS E DIRETIVAS .....                             | 48 |
| <b>14.</b> REFERÊNCIAS/LEITURAS RECOMENDADAS .....                              | 49 |
| ANEXO ÚNICO: ENSAIO DE PERDA D'ÁGUA NO BRASIL – BREVE<br>HISTÓRICO.....         | 53 |

## APRESENTAÇÃO

Essa Norma destina-se aos diversos protagonistas envolvidos em sondagens mecânicas convencionais, como são os casos de proprietários de obras, investidores, construtoras, empresas executoras de serviços geológico-geotécnicos de campo e de laboratório, agências de regulação, projetistas, consultores e encarregados de fiscalização.

A Norma ABGE 108/2024 trata do **Ensaio de Perda D’água sob Pressão– EPA**, realizado em furos de sondagens rotativas ou rotopercussivas.

A presente Norma utilizou, como referência básica, a publicação de título “Investigações geológico-geotécnicas – Guias de boas práticas”, editado pela ABGE em 2021, especificamente o livro 5 contido naquela publicação, de título “Ensaio de Perda D’água sob Pressão. Os critérios e procedimentos metodológicos já foram testados e aprovados ao longo de mais de 45 anos de história de desenvolvimento da geotecnia brasileira, em especial da geologia de engenharia. Como nas demais Normas da ABGE, que têm por fonte o “Guia de Boas Práticas”, de 2021, foi necessário rever a itemização, sem perder o conteúdo original, e introduzir um novo tópico, que visa contemplar as tecnologias de digitalização, padronização e de modelagem geológico-geotécnica informatizadas.

A Norma ABGE possui formato próprio, mas semelhante ao publicado por entidades civis e associações técnicas e profissionais, nacionais ou estrangeiras, como ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), ASTM (American Society for Testing and Materials), API (American Petroleum Institute), ISO (international Organization for Standardization), ASCE (American Society of Civil Engineering), CDA (Canadian Dam Association), IAEG (International Association for Engineering Geology and the Environment), dentre outras. Essas entidades publicam Normas (Standards), Diretrizes (Guidelines), Boletins (Bulletins), Regras (Codes) e outros documentos assemelhados, com a finalidade de ajudar empresas e profissionais a trabalharem melhor.

As normas e as publicações técnicas editadas pelas entidades acima citadas, assim como a presente NORMA ABGE, são de aceitação voluntária. A sua aplicação somente passará a ter caráter vinculante no plano legal/

normativo, caso seja reconhecida e de alguma forma chancelada/acolhida pelo poder público (por exemplo, se a adoção de alguma NORMA ABGE for exigida ou referida por algum dispositivo legal); e, no plano privado, caso seja mencionada em um contrato como norma a ser observada pelas partes no cumprimento de suas obrigações (Passini & Alvares Sociedade de Advogados, 2021).

Sugerimos que os usuários das informações dessa publicação a cotejem e a harmonizem com outras sobre o mesmo tema, assim possibilitando maior consistência nos termos de referências e contratos e maior eficácia, segurança e economicidade nos estudos, projetos e obras.

Agradecimentos aos sócios, às empresas patrocinadoras da ABGE e a todos que apoiaram e colaboraram com a presente publicação, em especial aos autores e colaboradores do livro “Investigações geológico-geotécnicas – Guias de boas práticas”, publicado pela ABGE em 2021.

**João Jeronimo Monticelli**

Editor

**Fábio Soares Magalhães**

Presidente da ABGE – Gestão 2023-2024

# 1 INTRODUÇÃO

O Ensaio de Perda D'água sob Pressão – EPA deriva do ensaio conhecido internacionalmente como Ensaio Lugeon, ensaio esse proposto por Maurice LUGEON (1933) para verificar a estanqueidade de fundações de barragens. Uma unidade Lugeon corresponde à absorção de 1 litro de água por minuto, por metro de trecho ensaiado, sob  $10 \text{ kgf/cm}^2$  de pressão, equivalente a, aproximadamente, 1,0 MPa. No Brasil, no entanto, tal critério único de pressão não tem sido utilizado desde os anos 1970.

O ensaio Lugeon é mais usado para localizar as zonas de perda d'água mais importantes e aquilatar a permeabilidade pontual dos maciços rochosos. No entanto, a estimativa da permeabilidade dos maciços rochosos não foi originalmente proposta por Lugeon, embora essa tem sido uma prática comum atualmente. Em condições ideais (ou seja, em um meio homogêneo e isotrópico), uma unidade Lugeon (1 Lu) equivale a  $1,3 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ .

O Ensaio de Perda d'água sob Pressão, objeto da presente Norma, é realizado em vários estágios de pressão. Envolve um procedimento bastante simples e vem sendo utilizado de maneira sistemática em investigações geológico-geotécnicas no Brasil. Ainda que a sua origem esteja intimamente relacionada a estudos para fundações de barragens, passou a ser utilizado de modo mais intenso em outras aplicações, como em projetos de obras subterrâneas, mineração etc.

Cada par de valores vazão x pressão fornece um resultado que exprime o valor da condutividade hidráulica do trecho ensaiado do maciço. Pode-se também, para cada trecho ensaiado, traçar por pontos correspondentes aos estágios de pressão aplicados, a curva vazão x pressão, que demonstra a evolução das absorções em função das pressões aplicadas para os escoamentos laminar e turbulento. Em função dessa análise pode-se inferir características do maciço e obter-se algumas conclusões a respeito do comportamento do fluxo através das descontinuidades. Se for admitido que o regime permanente é atingido, que o escoamento através do maciço é laminar, sem alteração das condições físicas do maciço, tanto para pressões crescentes como decrescentes, os pontos plotados devem se situar sobre uma reta que passa pela origem.

Porém, na maioria dos casos obtêm-se curvas passíveis de interpretação, que traduzem características peculiares a cada trecho do maciço rochoso ensaiado.

Após um grande progresso teórico nos estudos de percolação d'água em meios fissurados, ocorrido até meados da década de 1980, somente nas últimas duas décadas é que foram introduzidas algumas modificações em seu modo de execução. Tais alterações são decorrentes das oportunidades oferecidas pelas tecnologias atuais, que permitem, por exemplo, registrar os dados do ensaio em tempo real, e a oportunidade de atualizar os procedimentos de interpretação dos ensaios, mas, fundamentalmente, não modificam os conceitos e fundamentos originalmente propostos por Lugeon.

Mais recentemente, surgiram normas internacionais (*International Organization for Standardization-ISO*; *British Standard – BS EM ISO 22282-3:2012*; *American Society for Testing and Materials – ASTM D4630-2019*; *Internacional Society for Rock Mechanics – Vaskou et al., 2019*), que apresentam as regras e os princípios para execução dos ensaios, sem, no entanto, alterar o conceito originalmente proposto por Lugeon, mas com as adaptações que permitem usufruir dos equipamentos hoje em dia disponíveis.

## 2 DEFINIÇÃO

O ensaio consiste na injeção de água sob pressão em um trecho de um furo de sondagem isolado por obturadores e em medir a quantidade de água que infiltra no maciço durante um certo tempo (absorção), sob uma dada pressão de injeção. O ensaio é realizado em vários estágios de pressão, medida em  $\text{Kgf/cm}^2$ . Para cada um desses estágios, a pressão é mantida fixa durante o tempo necessário para se obter uma vazão constante, conseguindo-se, dessa forma, condições de fluxo permanente. A absorção correspondente a cada estágio de pressão é anotada em termos de vazão ( $\text{L/min}$ ).

## 3 FINALIDADE

O Ensaio de Perda d'Água sob Pressão (EPA) em furos de sondagem rotativa ou rotopercussiva é utilizado para estimar a condutividade hidráulica

média equivalente e o comportamento dos maciços rochosos frente à percolação da água através de suas fissuras. Permite estimar as propriedades hidráulicas, a capacidade de absorção e a estanqueidade de maciços rochosos, a eficiência de cortinas de vedação em fundação de barragens, além da possibilidade de se verificar comportamentos geomecânicos, como, por exemplo, indução de fraturamento hidráulico e de deformações que o maciço rochoso (rocha intacta e descontinuidades) pode vir a sofrer durante a execução do ensaio.

## 4 CRITÉRIOS DE PRESSÃO

As pressões ascendentes e descendentes são determinadas em função da pressão máxima a ser aplicada no ensaio. A determinação da pressão máxima é o primeiro passo na definição das demais pressões do ensaio e não deve exceder a tensão máxima de confinamento, para evitar o faturamento hidráulico ou deformações permanentes no maciço rochoso.

A pressão máxima é definida pela diferença de cota entre a superfície do terreno e a cota do trecho do ensaio, para o caso de ensaios realizados em terrenos planos, ou pela cobertura lateral, para o caso de ensaios realizados em terrenos inclinados, nas proximidades de encostas. Este critério deve ser mantido mesmo para o caso de perfurações inclinadas.

O ensaio deve ser executado com um mínimo de cinco estágios de pressão, o que permite avaliar não só as absorções e a condutividade hidráulica do maciço rochoso, mas também o regime de escoamento e o comportamento das descontinuidades frente à imposição de fluxos mais severos que aqueles naturalmente encontrados na natureza. É comum, em muitos países, a utilização de um maior número de estágios de pressão, alcançando até onze estágios, com quatro etapas crescentes e quatro decrescentes, além dos estágios inicial e final, de pressão mínima, e do estágio de pressão máxima.

No Brasil, o ensaio tem sido executado com um ciclo de 5 estágios de pressão, com o seguinte critério para escolha das pressões de ensaio (a serem lidas no manômetro):

*1º estágio: pressão mínima ( $P_{min}$ ) – adota-se como mínima a pressão de 0,10 kgf/cm<sup>2</sup> (correspondente a 1 m de coluna d'água), considerada como estágio de pressão inicial do ensaio*

2º estágio: pressão intermediária ascendente ( $P_{int. asc.}$ ) – obtida a partir da pressão máxima do ensaio:

$$P_{int. asc.} = \frac{P_{max}}{2}$$

3º estágio: pressão máxima ( $P_{max}$ ) – igual a 0,25 kgf/cm<sup>2</sup> por metro de profundidade do obturador

4º estágio: pressão intermediária descendente ( $P_{int. desc.}$ ) – obtida a partir da pressão máxima do ensaio:

$$P_{int. desc.} = \frac{P_{max}}{2}$$

5º estágio: pressão mínima ( $P_{min}$ ) – adota-se como mínima a pressão de 0,10 kgf/cm<sup>2</sup>, considerada como estágio de pressão final do ensaio

A adoção deste critério para determinar as pressões máximas do ensaio de perda d'água é justificada pela consideração da densidade média dos maciços rochosos, da ordem de 2,7 t/m<sup>3</sup>. Admite-se que a adoção da pressão máxima de 0,25 kgf/cm<sup>2</sup> por metro de profundidade do obturador (em cota), não deve provocar a ruptura do maciço ensaiado em terrenos planos, estando em acordo com a necessidade de não ultrapassar a tensão máxima de confinamento. Tal critério também deve ser observado em relação à cobertura lateral para ensaios em sondagens realizadas em terrenos inclinados, como taludes, encostas etc.

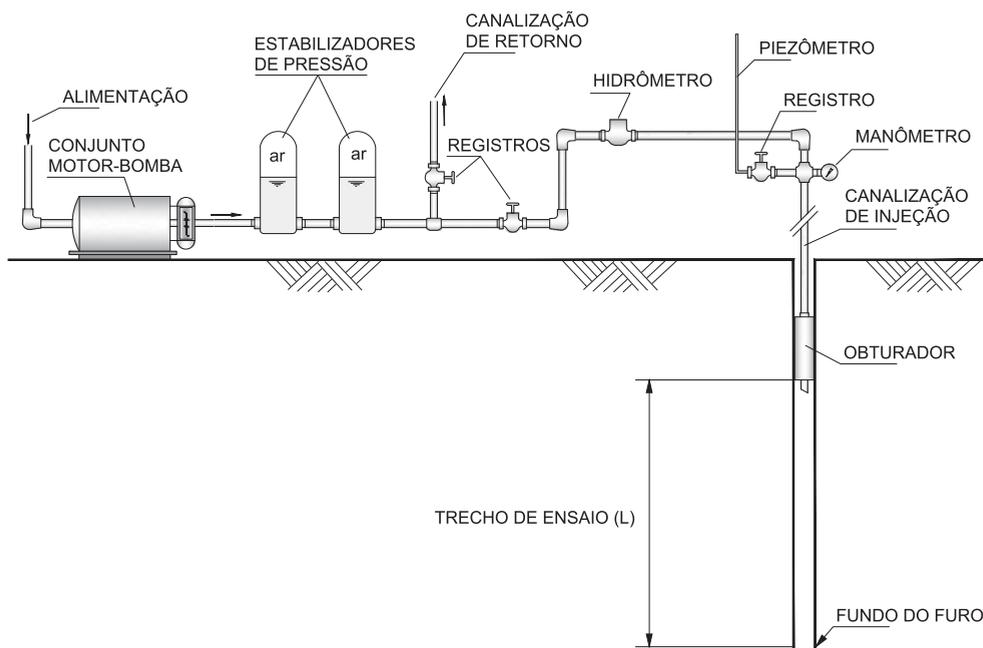
Os critérios de pressão máxima devem ser mantidos, mesmo quando os ensaios são realizados com a utilização de transdutores de pressão, que possibilitam a leitura da pressão efetiva diretamente no trecho do ensaio.

Diferentes critérios de pressão máxima podem ser adotados, em função das necessidades dos projetos e das características geotécnicas e geomecânicas do maciço rochoso, ou seja, além da densidade, podem também ser considerados parâmetros como a resistência da rocha, o estado de alteração e faturamento do maciço etc. Por exemplo, para o caso de rocha muito alterada, a pressão máxima poderá ser ajustada para 0,15 kgf/cm<sup>2</sup> por metro de profundidade do obturador.

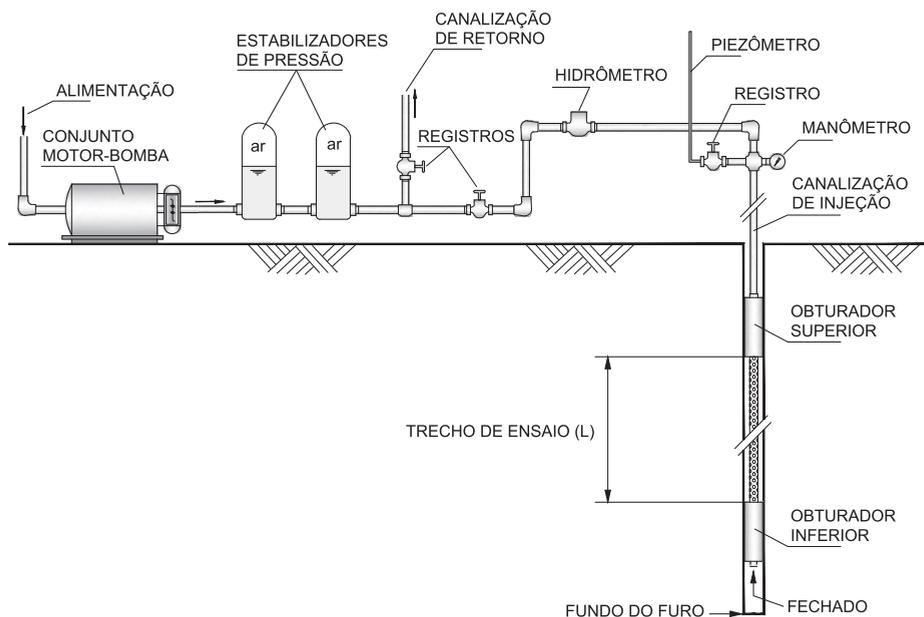
Dependendo dos objetivos do ensaio e das condições dadas para a sua execução, como, por exemplo, em perfurações muito profundas, onde as pressões máximas podem exceder, em muito, a capacidade dos equipamentos, ou mesmo por necessidades próprias de um dado projeto, as pressões máximas a ser aplicadas podem não ser iguais àquelas estabelecidas pelo critério descrito. O número de estágios de pressão pode ser aumentado e, nesse caso, preferencialmente nos estágios iniciais, quando as pressões devem ser suficientemente baixas para não alterar a permeabilidade natural do maciço rochoso pela pressão aplicada.

## 5 EQUIPAMENTO UTILIZADO

O equipamento utilizado para realização do ensaio é apresentado de modo esquemático nas Figura 1 e Figura 2.



**Figura 1** – Montagem típica do equipamento para realização do ensaio de perda d'água sob pressão, com uso de obturador simples e aquisição de dados de modo analógico (modificado de Oliveira, et al., 1975).



**Figura 2** – Montagem típica do equipamento para realização do ensaio de perda d'água sob pressão, com uso de obturador duplo e aquisição de dados de modo analógico.

Apresenta-se, a seguir, a descrição sucinta de cada equipamento componente do ensaio

**Bomba:** incluindo o fornecimento de água. Com pressão controlada, adequada para as pressões exigidas, com capacidade para vazões de **150 L/min a uma pressão 15 kgf/cm<sup>2</sup> (≈15 MPa)**. Deve-se usar uma bomba cuja oscilação de pressão seja de, no máximo, 3%. A água a ser utilizada deve ser limpa. Caso necessário, deverá passar por um processo de filtragem de modo a suprimir qualquer tipo de material em suspensão e redução da turbidez. A cada dez ensaios, ou a cada furo de sondagem, deve ser feito um teste de vazão para verificação das condições mínimas exigidas.

**Canalização, luvas e cotovelos:** devem estar em bom estado de conservação, não apresentando obstruções de nenhuma espécie que possam reduzir a seção de escoamento.

**Registros, válvulas:** para controle das vazões, devem estar em bom estado de conservação e não apresentar vazamentos, mas devem permitir um controle efetivo das vazões de ensaio.

*Hidrômetros:* A faixa de medição dos hidrômetros deve ser compatível com as absorções esperadas. Pode ser necessário instalar dois hidrômetros para atender diferentes faixas de amplitude de absorções. Devem ter sensibilidade e precisão suficientes para medir absorções da ordem de 3% da absorção máxima. A cada dez ensaios devem ser submetidos à calibração, ou sempre que solicitado pela fiscalização, devendo ser rejeitados aqueles que apresentarem um desvio de leitura superior a 10%. Os laudos de calibração devem estar disponíveis em local de fácil acesso para eventual auditoria da qualidade.

*Manômetros:* devem ser compatíveis com as faixas de pressão a serem aplicadas no ensaio, recomendando-se o uso de manômetros com fundo de escala não superior a duas vezes a pressão máxima a ser aplicada no ensaio. A divisão da escala, assim como a sensibilidade, deve ser compatível com as pressões a serem aplicadas. Os manômetros devem ser aferidos a cada 10 ensaios ou sempre que solicitados pela fiscalização, não se admitindo leituras com desvio maior que 10% do valor real. Os laudos de calibração devem estar disponíveis em local de fácil acesso para eventual auditoria da qualidade.

*Piezômetro:* tubo de plástico transparente para ser usado quando se requer maior precisão na medida das baixas pressões ( $< 0,5 \text{ kgf/cm}^2$ ). O uso de piezômetros é opcional.

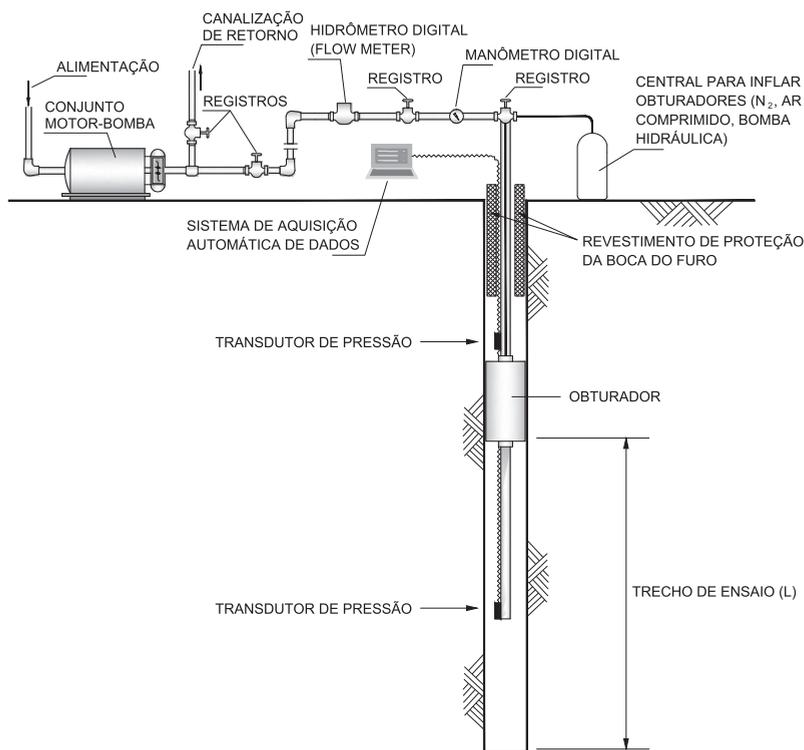
*Estabilizadores de pressão:* têm a função de estabilizar o fluxo de água e, por consequência, minimizar as oscilações das pressões aplicadas durante o ensaio. A variação no campo de leitura das pressões não pode ser superior a 10% do valor da pressão especificada. É vedado o uso de quaisquer tipo de “estabilizadores” (parafuso salva-manômetro, por exemplo) que possam introduzir erro nas leituras.

*Obturador:* em geral é utilizado o de borracha que isola o trecho a ser ensaiado quando submetido à expansão, seja por compressão mecânica ou por aplicação de pressão pneumática ou hidráulica internamente ao obturador. O diâmetro da canalização interna do obturador não deve ser menor que o diâmetro da tubulação de ensaio. O comprimento efetivo dos obturadores deve ser de 1,0 m, de modo a minimizar eventuais fluxos de água no contato do obturador com as paredes do furo, ou eventuais fugas

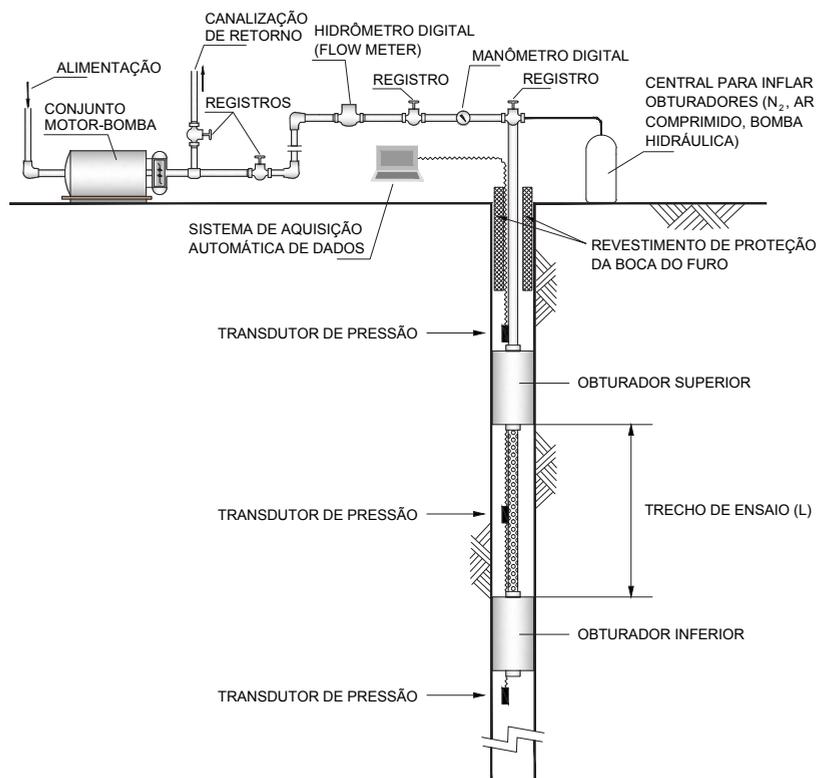
d'água decorrentes da presença de fraturas abertas que possam causar um curto-circuito entre o trecho de ensaio e as porções externas à área vedada. Recomenda-se monitorar a variação do nível d'água acima do trecho vedado. No caso do uso de obturadores duplos, o diâmetro da canalização interna dos obturadores não deve ser menor que o diâmetro da tubulação no trecho de ensaio. A canalização no trecho de ensaio deve ser ranhurada ou perfurada, cujas dimensões não devem provocar perdas de carga localizadas significativas.

O equipamento utilizado para realização do ensaio com o uso de sistema digital para aquisição automática dos dados de pressão e absorção é apresentado de modo esquemático na Figura 3 e Figura 4.

O conjunto de equipamentos necessários, além daqueles já usualmente utilizados para execução dos ensaios de perda d'água sob pressão (e descritos acima), consiste em:



**Figura 3** – Montagem típica de equipamento para realização do ensaio de perda d'água sob pressão, com uso de obturadores simples e sistema digital para aquisição automática de dados de absorção e pressão (modificado de Vaskou et al., 2019)



**Figura 4** – Montagem típica de equipamento para realização do ensaio de perda d'água sob pressão, com uso de obturador duplo e sistema digital para aquisição automática de dados de absorção e pressão (modificado de Vaskou et al., 2019).

*Hidrômetros digitais (flow meter, fluxômetros):* A faixa de medição dos hidrômetros digitais deve ser compatível com as absorções esperadas. Pode ser necessário instalar dois hidrômetros digitais para atender diferentes faixas de amplitudes de absorção. Devem ter sensibilidade e precisão suficiente para medir absorções da ordem de 3% da absorção máxima. A cada dez ensaios devem ser submetidos à calibração ou sempre que solicitado pela fiscalização, devendo ser rejeitados aqueles que apresentarem um desvio de leitura superior a 10%. Os laudos de calibração devem estar disponíveis em local de fácil acesso para eventual auditoria da qualidade

*Canalização:* necessário o uso de mangueiras de alta pressão, em bom estado de conservação, com capacidade mínima de 25 kgf/cm<sup>2</sup> (≈25 MPa), para conexão dos equipamentos em superfície com o trecho do ensaio.

*Obturador*: inflável, por acionamento pneumático (aplicação de gás) ou hidráulico (por aplicação de água), com comprimento mínimo da ordem de 10 vezes o diâmetro da perfuração, não sendo recomendável que seja menor do que 1,0 m. A pressão de expansão do obturador deve ser no mínimo 30% maior do que a pressão máxima a ser aplicada no trecho. São necessários condutos apropriados para transmissão das pressões para acionamento dos obturadores.

*Transdutores de pressão*: para medir a pressão efetiva aplicada no trecho do ensaio, bem como acima e abaixo do trecho ensaiado, com o objetivo de verificar a estanqueidade dos obturadores.

*Registros, válvulas*: devem estar em bom estado de conservação e não apresentarem vazamentos para permitir o controle efetivo das absorções e das pressões do sistema hidráulico ou pneumático que infla os obturadores.

*Cilindros de gás*: de nitrogênio ( $N_2$ ) ou ar comprimido para inflar os obturadores, cujos modelos são acionados por gás. Os obturadores que operam com água dispensam esse arranjo. Neste caso, são necessárias bombas apropriadas para acionamento dos obturadores hidráulicos.

*Sistema para aquisição de dados em tempo real*: constituído por um sistema de gravação de dados, placas de conversão A/D, cabos de transmissão de dados dos transdutores de pressão e das absorções.

*Válvula de pé*: necessária para desinflar os obturadores, em especial quando são utilizados obturadores acionados por pressão hidráulica.

## 6 ENSAIO DE PERDA DE CARGA

A perda de carga ao longo de uma tubulação depende do seu comprimento, do diâmetro interno, da vazão e da rugosidade da sua superfície interna. Dentro dos limites usuais de vazão em ensaios de perda d'água sob pressão, canalizações com diâmetro inferior a 3/4" introduzem grandes perdas de carga, ao contrário de canalizações com diâmetro superior a 1 1/2", cuja perda de carga é desprezível.

Como canalizações provocam perdas de cargas importantes, torna-se necessário medi-las para que sejam adequadamente consideradas no cálculo da pressão efetiva que atua no trecho do ensaio, caso esta não tenha sido medida com transdutor de pressão.

Fórmulas e ábacos encontrados em manuais de hidráulica podem servir a esta avaliação. Contudo, recomenda-se que sejam executados ensaios de perda de carga no campo, utilizando-se a canalização que será efetivamente utilizada nos ensaios. A realização é bastante simples e estes ensaios podem ser executados rapidamente, permitindo a obtenção de resultados mais confiáveis que os encontrados nos manuais.

O ensaio de perda de carga consiste na reprodução das condições de vazão previstas para os ensaios de perda d'água e na determinação das perdas de cargas correspondentes. Recomenda-se a execução de um ensaio de perda de carga por campanha de sondagens com realização de ensaios de perda d'água.

Considerando-se que, em determinada campanha, o comprimento máximo previsto para os furos de sondagens seja **P**, recomenda-se proceder o ensaio da seguinte forma:

- 1) Inicialmente, o local onde será realizado o ensaio deve estar nivelado, assim como a canalização, de modo que a carga de posição não altere os resultados do ensaio.
- 2) O comprimento **L** da canalização deve ser cerca de 20% maior que **P**. Para este comprimento **L**, estabelecem-se as perdas de carga obtidas em sucessivos estágios de vazão. Deve-se cobrir todo o espectro da vazão fornecida pela bomba, em especial as maiores vazões, onde as perdas de carga são substancialmente maiores. Recomenda-se que sejam realizados ensaios com as seguintes vazões: vazão inicial de 10 L/min, com a vazão máxima da bomba; e, no mínimo, mais cinco estágios de vazão intermediários. Em todos os estágios deverão ser utilizados os estabilizadores de pressão, de modo a minimizar as oscilações de vazão e pressão.

### TABELA PARA ENSAIO DE PERDA DE CARGA

INTERESSADO \_\_\_\_\_ PROJETO \_\_\_\_\_ OBRA \_\_\_\_\_ EMPREITEIRA \_\_\_\_\_ CAMPANHA \_\_\_\_\_

BOMBA | MARCA \_\_\_\_\_ Nº \_\_\_\_\_ | MANÔMETRO | Nº \_\_\_\_\_ | HIDRÔMETRO | Nº \_\_\_\_\_  
 | CAPACIDADE \_\_\_\_\_ | | CAPACIDADE \_\_\_\_\_ | | TIPO \_\_\_\_\_  
 | DATA DO TESTE \_\_\_\_\_ | | AFERIÇÃO DATA \_\_\_\_\_ | | AFERIÇÃO DATA \_\_\_\_\_

CANALIZAÇÃO | IDENTIFICAÇÃO \_\_\_\_\_ | ANO \_\_\_\_\_ | PROFUNDIDADE MÁXIMA \_\_\_\_\_  
 | MATERIAL \_\_\_\_\_ | OBTURADOR TIPO \_\_\_\_\_

| DATA | COMPRIMENTO DA CANALIZAÇÃO (m) | ESTÁGIOS DE VAZÃO (L/min) | LEITURAS ESTABILIZADAS (1 em 1 minuto)         |                    |  |                    | VAZÃO MÉDIA (L/min) | PERDA DE CARGA (kgf/cm <sup>2</sup> ) | OBSERVAÇÕES |
|------|--------------------------------|---------------------------|--|--------------------|--|--------------------|---------------------|---------------------------------------|-------------|
|      |                                |                           | MANÔMETRO OU PIEZÔMETRO (kgf/cm <sup>2</sup> ) | HIDRÔMETRO (L/min) | MANÔMETRO OU PIEZÔMETRO (kgf/cm <sup>2</sup> ) | HIDRÔMETRO (L/min) |                     |                                       |             |
|      | L                              |                           |  |                    |  |                    |                     |                                       |             |
|      |                                |                           |  |                    |  |                    |                     |                                       |             |
|      |                                |                           |  |                    |  |                    |                     |                                       |             |
|      |                                |                           |  |                    |  |                    |                     |                                       |             |
|      | 2/3 L                          |                           |  |                    |  |                    |                     |                                       |             |
|      |                                |                           |  |                    |  |                    |                     |                                       |             |
|      |                                |                           |  |                    |  |                    |                     |                                       |             |
|      |                                |                           |  |                    |  |                    |                     |                                       |             |
|      | 1/2 L                          |                           |  |                    |  |                    |                     |                                       |             |
|      |                                |                           |  |                    |  |                    |                     |                                       |             |
|      |                                |                           |  |                    |  |                    |                     |                                       |             |
|      |                                |                           |  |                    |  |                    |                     |                                       |             |

APONTADOR \_\_\_\_\_ FISCAL DE CAMPO \_\_\_\_\_ FISCALIZAÇÃO \_\_\_\_\_ MEDIÇÃO \_\_\_\_\_

**Figura 5** – Exemplo de tabela para realização de ensaios de perda de carga (modificado de Oliveira et al., 1975).

- 3) Cada um dos estágios de vazão deve ser mantido por um tempo mínimo de 2 minutos, efetuando-se 3 leituras consecutivas no manômetro e no hidrômetro. O uso de um piezômetro acoplado no início da canalização permite a medida de pressões mais baixas, nas quais os manômetros são pouco sensíveis.
- 4) Após a realização do ensaio com o comprimento máximo da canalização, passa-se à redução sucessiva do comprimento desta, em sucessivos estágios, dando-se prosseguimento ao ensaio do mesmo modo descrito no item 2 e 3.
- 5) Os valores de perda de carga inferiores a  $0,1 \text{ kgf/cm}^2$ , quando lidos no manômetro, não devem ser usados para elaboração do ábaco, pois, em geral, são pouco precisos.

Com os resultados obtidos, conforme exemplificado na Tabela 1, elabora-se um gráfico correlacionando vazão (L/min) com a perda de carga ( $\text{kgf/cm}^2$ ) a ser utilizado durante a campanha de ensaios (Figura 6). Neste caso, o ensaio definiu a perda de carga de uma tubulação onde a profundidade máxima **P** é de 30 m.

Como a perda de carga por metro linear é constante para uma dada tubulação, pode-se extrapolar os resultados obtidos no ensaio, obtendo-se curvas equivalentes para qualquer comprimento da tubulação (Tabela 1), as quais são utilizadas para obtenção de ábacos semelhantes ao da Figura 7, para um determinado diâmetro de tubulação.

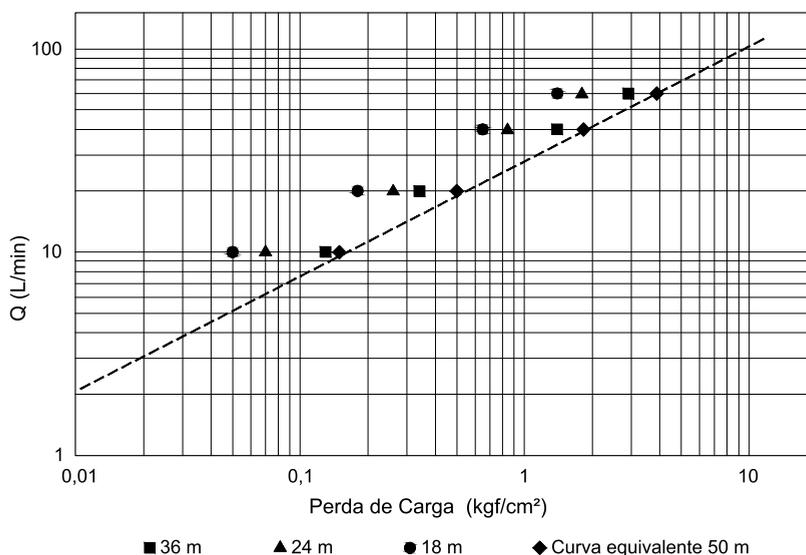
A Figura 1 e a Figura 2 demonstram que, após o manômetro, a canalização não deve ter curvas, cotovelos etc., de modo que, quando se utiliza obturador simples, apenas a perda de carga na canalização (denominada de perda de carga distribuída) deve ser considerada no cálculo da pressão efetiva.

No caso de obturadores duplos, além da perda de carga distribuída, deve-se considerar no cálculo da pressão efetiva, a perda de carga devido às ranhuras e/ou orifícios presentes na tubulação entre obturadores no trecho do ensaio (denominada de perda de carga localizada). Estas perdas de carga localizadas ocorrem devido a uma ampliação ou redução brusca do diâmetro da tubulação, como é o caso dos obturadores duplos. Essas perdas de carga

variam de dispositivo para dispositivo e, devido à complexidade do escoamento no interior dos mesmos, devem ser determinadas experimentalmente.

**Tabela 1** – Resultados de um ensaio de perda de carga e exemplo de extrapolação dos resultados para uma tubulação com 50m de comprimento (modificado de Oliveira et al., 1975)

| Comprimento da Tubulação (L) | Resultados do Ensaio de Perda de Carga (PC) P = 30 m |                           | Extrapolação para L = 50 m (*Cálculo das Médias) |       |       |       |
|------------------------------|--|---------------------------|--|-------|-------|-------|
|                              | Vazão Q (L/min)                                      | PC (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Q (L/min)  |       |       |       |
|                              |  |                           | 10   | 20    | 40    | 60    |
| 36 m                         | 10   | 0,13                      | 0,18   |       |       |       |
|                              | 20   | 0,34                      |  | 0,47  |       |       |
|                              | 40   | 1,40                      |  |       | 1,94  |       |
|                              | 60   | 2,90                      |  |       |       | 4,03  |
| 24 m                         | 10   | 0,07                      | 0,14   |       |       |       |
|                              | 20   | 0,26                      |  | 0,54  |       |       |
|                              | 40   | 0,84                      |  |       | 1,75  |       |
|                              | 60   | 1,80                      |  |       |       | 3,75  |
| 18 m                         | 10   | 0,05                      | 0,14   |       |       |       |
|                              | 20   | 0,18                      |  | 0,50  |       |       |
|                              | 40   | 0,65                      |  |       | 1,50  |       |
|                              | 60   | 1,40                      |  |       |       | 3,89  |
|                              |  |                           | 0,15*  | 0,50* | 1,83* | 3,89* |



**Figura 6** – Gráfico relacionando a vazão Q (L/min) com a Perda de Carga (kgf/cm<sup>2</sup>) (modificado de Oliveira et al., 1975).

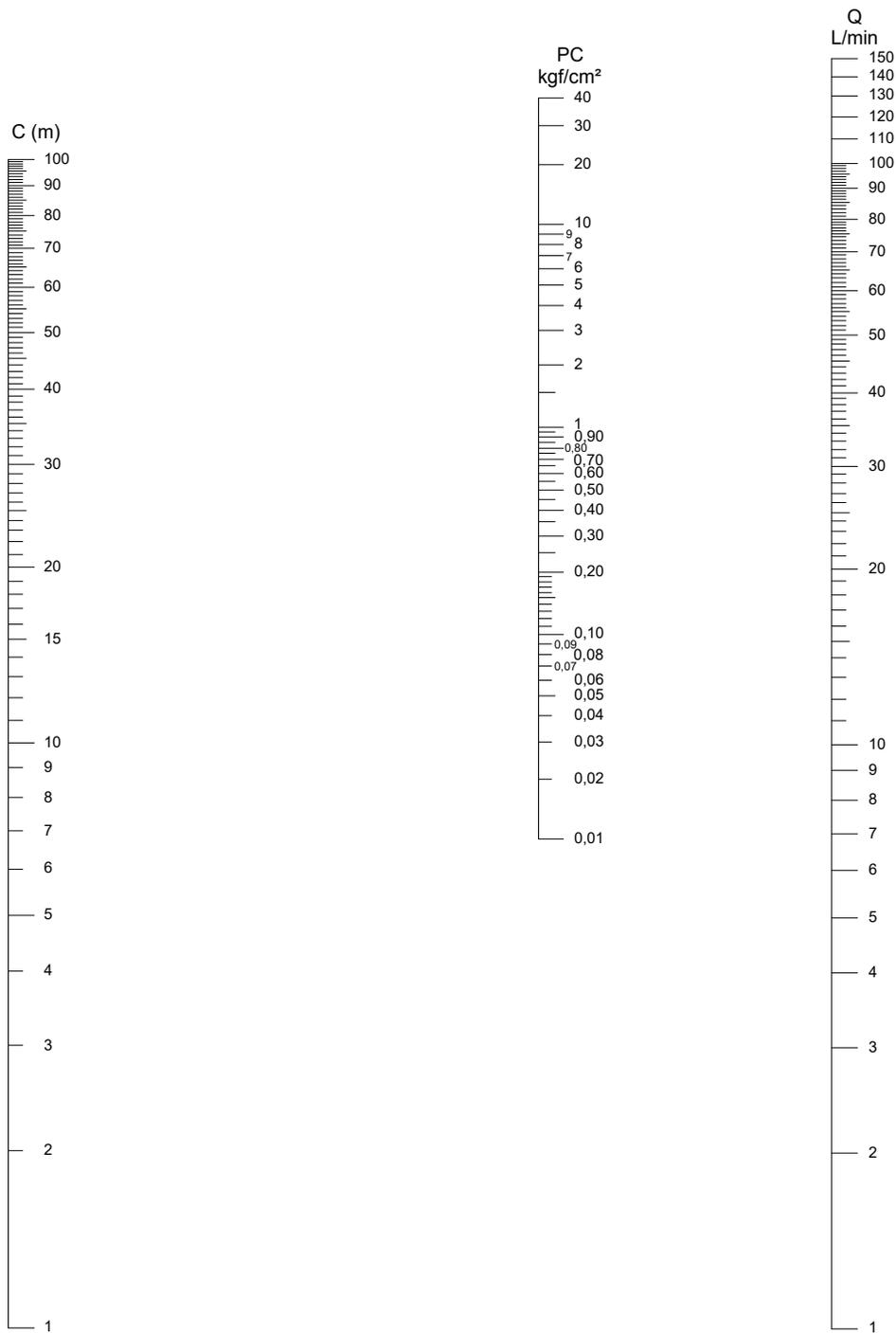


Figura 7 – Âbaco para perda de carga em tubulação de 3/4” (Fernandes da Silva, 1969).

Nesse caso, à semelhança do ensaio de perda de carga na tubulação, deve-se realizar um ensaio de perda de carga com o obturador montado, incluindo o segmento da canalização que faz a união do obturador com o restante da tubulação que se dirige para a superfície, além de todas as demais particularidades que, eventualmente, compõem o obturador duplo (eventuais curvas, reduções de diâmetro etc.), seguindo-se o seguinte procedimento:

- 1) Inicialmente, o local onde será realizado o ensaio, deve estar nivelado, assim como a canalização/obturador duplo, de modo que a carga de posição não altere os resultados do ensaio.
- 2) O obturador duplo, cujo diâmetro e comprimento deve ser fixo, com todas as suas eventuais particularidades, deve ser ensaiado a diferentes vazões, dentro do espectro de vazões da bomba. Para uma determinada geometria de um obturador duplo, estabelecem-se as perdas de carga obtidas em sucessivos estágios de vazão.
- 3) Cada um dos estágios de vazão deve ser mantido por um tempo mínimo de 2 minutos, efetuando-se 3 leituras consecutivas no manômetro e no hidrômetro. O uso de um piezômetro acoplado no início da canalização permite medida de pressões baixas, nas quais os manômetros são pouco sensíveis.

Caso as condições para realização dos ensaios no campo sejam inadequadas, ou os diâmetros das tubulações a utilizar sejam maiores que 3/4", pode-se utilizar, alternativamente, para determinação da perda de carga, a fórmula de Fair-Whipple-Hsiao (Equação 1), recomendada pela norma brasileira (ABNT/NBR 5296/1988), para projetos de instalações industriais com uso de aço galvanizado e/ou ferro fundido.

$$J = 20,21 * 10^6 * Q^{1,88} * d^{-4,88} \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde:

J – Perda de Carga (m/m)

Q – Vazão (m<sup>3</sup>/s)

d – Diâmetro interno da tubulação (m)

Outras eventuais perdas de carga localizadas, devido a válvulas, registros, curvas, cotovelos, dentre outros, devem ser ensaiados individualmente, quando necessário.

Caso o equipamento seja dotado de transdutores de pressão, conforme indicado nas Figura 3 e Figura 4, não será necessária a realização de ensaio de perda de carga, pois as pressões efetivas serão medidas diretamente no trecho do ensaio.

## 7 PRÁTICA DO ENSAIO

O Ensaio de Perda d'água sob Pressão (EPA) é realizado em um trecho isolado por obturador simples ou duplo no interior de uma perfuração (sondagens rotativas, perfurações a roto percussão etc.), com qualquer orientação ou diâmetro, o qual é executado em sucessivos estágios de pressão, sendo, cada estágio, executado sob uma pressão constante, acima ou abaixo do lençol freático.

Antes do início da realização dos ensaios, alguns requisitos básicos devem ser estabelecidos, como, o objetivo dos ensaios, profundidade e comprimento dos trechos a ensaiar, pressões máximas a aplicar, número e duração dos estágios de pressão. Além destes, o furo deve ser lavado com circulação de água, até que esta saia limpa, sem impurezas ou turbidez. Deve-se lembrar que a lavagem do furo interfere na posição do nível d'água no interior da perfuração.

A prática corrente no Brasil é a utilização de um obturador simples, em trechos de três metros, sendo a profundidade do trecho inicial do ensaio usualmente definida a partir da profundidade do topo rochoso. Este, geralmente, condiciona a profundidade de todos os demais trechos. Neste caso, os ensaios são executados de modo descendente, com a realização dos ensaios subsequentemente ao avanço da perfuração, interrompendo-se a mesma para execução do ensaio. O intervalo ensaiado (L) é limitado pelo fundo do furo e pelo obturador superior. A despeito da prática corrente, recomenda-se que os trechos de ensaio sejam também escolhidos a partir da análise dos testemunhos de sondagem. A montagem dos equipamentos e acessórios para a realização do ensaio

é apresentada na Figura 1, para o caso de ensaios realizados sem a utilização de um sistema de aquisição automática de dados, e na Figura 3, quando um sistema de aquisição automática de dados é utilizado.

No caso da utilização de obturadores duplos, os ensaios são realizados após o término da perfuração. Neste caso, o ensaio é executado, preferencialmente, de modo ascendente, usualmente em trechos de três metros. O intervalo ensaiado (L) é limitado pelos obturadores superior e inferior. A montagem dos equipamentos e acessórios para a realização do ensaio é apresentado na Figura 2, para o caso de ensaios realizados sem a utilização de um sistema de aquisição automática de dados, e na Figura 4, quando um sistema de aquisição automática de dados é utilizado.

Em ambos os casos, intervalos de ensaio diferentes daqueles previamente programados podem ser realizados devido, principalmente aos seguintes motivos:

- necessidades de projeto;
- impossibilidade de obturação do furo na profundidade programada;
- para melhor delimitação dos trechos com altas absorções de água a baixas pressões, de modo a possibilitar a identificação das porções do maciço responsáveis pelas altas absorções. Neste caso, recomenda-se reduzir sucessivamente o trecho ensaiado até alcançar 1,0 m, ou menos. Esta redução pode ser orientada por uma análise prévia dos testemunhos de sondagem;
- fuga da água para a superfície ou para as porções abaixo do trecho ensaiado devido à comunicação entre as fraturas do maciço.

A execução do ensaio segue o seguinte roteiro:

### 7.1 *Medida do nível d'água*

O primeiro passo é determinar o nível d'água estático no interior da perfuração, no trecho onde será realizado o ensaio. Esse nível d'água é necessário para se calcular as pressões efetivas a ser utilizadas nos cálculos, caso não sejam utilizados transdutores de pressão. Estes, são úteis tanto para registrar a pressão efetiva no trecho do ensaio como para verificar

a eficiência do(s) obturador(es) no isolamento do trecho ensaiado. Recomenda-se que esta etapa seja precedida pela limpeza do furo, a qual deve se estender até que a água de retorno se apresente limpa.

A realização de medidas de nível d'água apresenta, em geral, certas dificuldades.

Primeiro, porque a própria execução da perfuração interfere no nível d'água no interior do maciço, seja pela introdução de água para permitir a perfuração, seja pela retirada da composição de perfuração, ou ainda pela introdução da composição do ensaio. Depois, porque, em meios fissurados, é comum a existência de aquíferos relativamente isolados, cujos níveis d'água sofrem interferência da perfuração, propiciando maior ou menor interação entre os mesmos, resultando em um nível d'água “médio” comum.

O primeiro problema pode ser minimizado procurando-se medir o nível d'água durante a perfuração, sempre que possível. É de interesse realizar medidas de nível d'água sempre que a paralização da perfuração permita a estabilização do nível d'água como, por exemplo, antes do reinício dos trabalhos todas as manhãs. Do mesmo modo, é de interesse que todas as alterações do nível d'água observadas durante a perfuração sejam anotadas, como as profundidades onde ocorreram perdas, ou ganhos de água, trechos com artesianismo etc.

Já o segundo problema é de solução mais difícil, exigindo um prévio conhecimento dos possíveis aquíferos existentes e de seus respectivos níveis d'água. É, portanto, de interesse, transformar os primeiros furos de sondagens/perfurações de uma campanha de investigação em piezômetros, os quais devem ser instalados em camadas potencialmente abrigadoras de aquíferos confinados. Por outro lado, convém realizar medidas de nível d'água, pouco antes do início de cada ensaio, no respectivo trecho a ser ensaiado.

Finalmente, casos de artesianismo devem ser caracterizados em termos de nível d'água estático, além de, no mínimo, duas medidas dos níveis d'água dinâmicos, com as respectivas vazões, antes da execução do ensaio.

## 7.2 Realização do ensaio

- a) Instalação do(s) obturador(es):
- » O(s) obturador(es) deve(m) ser instalado(s) na(s) profundidade(s) especificada(s) e submetido(s) à expansão, seja por compressão mecânica ou com o uso de ar comprimido, ou nitrogênio ( $N_2$ ), ou ainda por ação hidráulica. Obturadores por acionamento hidráulico apresentam vedação dinâmica, ou seja, aumento da pressão no obturador como resposta da pressão imposta no trecho de ensaio devido à água ser incompressível.
  - » A expansão do(s) obturador(es) com o uso de bombas hidráulicas (expansão hidráulica) pode(m) trazer dificuldades para a sua contração quando usado(s) em furos muito profundos, com altas cargas hidráulicas a que podem estar submetidos.
  - » Eventuais problemas decorrentes de dificuldades para a sua contração (devido às altas cargas hidráulicas a que podem estar submetidos) podem ser solucionados pelo acionamento de elementos de segurança apropriados (válvulas de pé).
  - » A pressão de expansão dos obturadores deve ser superior à carga hidrostática devido à coluna d'água acima do trecho de ensaio, bem como, cerca de 30% superior à pressão máxima a ser aplicada no ensaio.
- b) Após a instalação do(s) obturador(es) na(s) profundidade(s) desejada(s) e após a leitura do nível d'água no trecho de ensaio, passa-se a aplicação das pressões calculadas para a profundidade do ensaio. Recomenda-se que seja monitorado o nível d'água acima do obturador superior, para verificação da eficiência na vedação do trecho ensaiado, caso o equipamento não seja dotado de transdutores de pressão.
- c) No primeiro estágio é mantida a pressão de  $0,1 \text{ kgf/cm}^2$  (lida no manômetro), pressão mínima do ensaio, durante o tempo necessário para o estabelecimento de um regime de escoamento permanente. Esse regime é alcançado quando não há variações na

absorção d'água durante um tempo não inferior a 10 minutos, independentemente se o ensaio for executado acima ou abaixo do nível d'água. Posteriormente, são registradas as leituras de vazão em intervalos de tempo de 1 minuto durante um tempo mínimo de 10 min. Para esse estágio de pressão, pode-se executar o ensaio mantendo-se, através de um funil acoplado à canalização, uma coluna de água de 1,0 m acima do nível do terreno. Neste caso, as leituras de vazão podem ser realizadas com o uso de provetas, baldes e tambores, todos graduados, além do hidrômetro, dependendo das absorções observadas. No caso do uso de transdutores de pressão no trecho de ensaio, as leituras devem ser realizadas a cada 5 segundos.

- d) Após a execução do estágio inicial, passa-se à execução dos demais estágios de pressão (intermediária, máxima, intermediária, mínima=estágio final). A transição entre eles deve ser realizada de modo gradativo, ajustando-se a vazão bombeada para o furo até que seja alcançada a pressão especificada. Em todas as etapas devem ser tomados os mesmos cuidados descritos para o primeiro estágio, principalmente no que se refere ao tempo do ensaio, além do tempo necessário para a estabilização da absorção d'água.
- e) Após a aplicação da pressão máxima, o decréscimo de pressão deve ser feito lentamente, controlando-se continuamente a pressão e a vazão. Nas etapas de pressões descendentes, se for percebido o retorno da água injetada no furo, a pressão deve ser levada a zero, independentemente do estágio de pressão que o ensaio se encontra. Este comportamento deve-se a uma deformação elástica das descontinuidades presentes no maciço rochoso, as quais tendem a retornar à sua configuração inicial após o término do incremento das pressões de ensaio. Deve ser anotado o tempo que durou o retorno e o volume total retornado. Caso possível, recomenda-se medir a vazão de retorno a cada minuto (possibilitado pela observação do hidrômetro que indica variação negativa da vazão).

- f) O procedimento descrito corresponde a um trecho de ensaio, com os seus cinco estágios de pressão. Os ensaios só podem ser interrompidos em algumas situações especiais, mas somente nos casos em que os ensaios são realizados com aquisição analógica de dados:
- » Quando for alcançada a vazão total da bomba sem alcançar o estágio de pressão correspondente. Neste caso, o ensaio poderá ser interrompido somente após todo o estágio da pressão máxima ter sido realizado;
  - » Quando houver retorno da água, em qualquer estágio de pressão;
  - » Quando for identificado que o obturador não vedou adequadamente o trecho de ensaio. Nesse caso, o ensaio deve ser interrompido e retomado após o adequado reposicionamento do obturador. Para minimizar vazamentos entre o obturador e a parede do furo, deve-se procurar utilizar técnicas de perfuração para produção de paredes lisas, utilização de obturadores com borrachas mais flexíveis, ou com comprimentos mais longos, para o caso de maciço muito fraturado.
  - » Em quaisquer outras situações, o ensaio só poderá ser interrompido por solicitação da fiscalização, se comunicado por escrito.

Para o caso de ensaios realizados com registro analógico dos dados, todas as leituras e observações efetuadas durante os ensaios devem ser adequadamente registradas em tabelas apropriadas, autoexplicativas (Figura 8 e Figura 9). Nelas, devem constar todas as informações necessárias, comuns aos diversos ensaios, além do registro dos dados resultantes da realização de cada um dos cinco estágios de pressão, bem como aqueles necessários para os cálculos que se seguem à realização do ensaio.

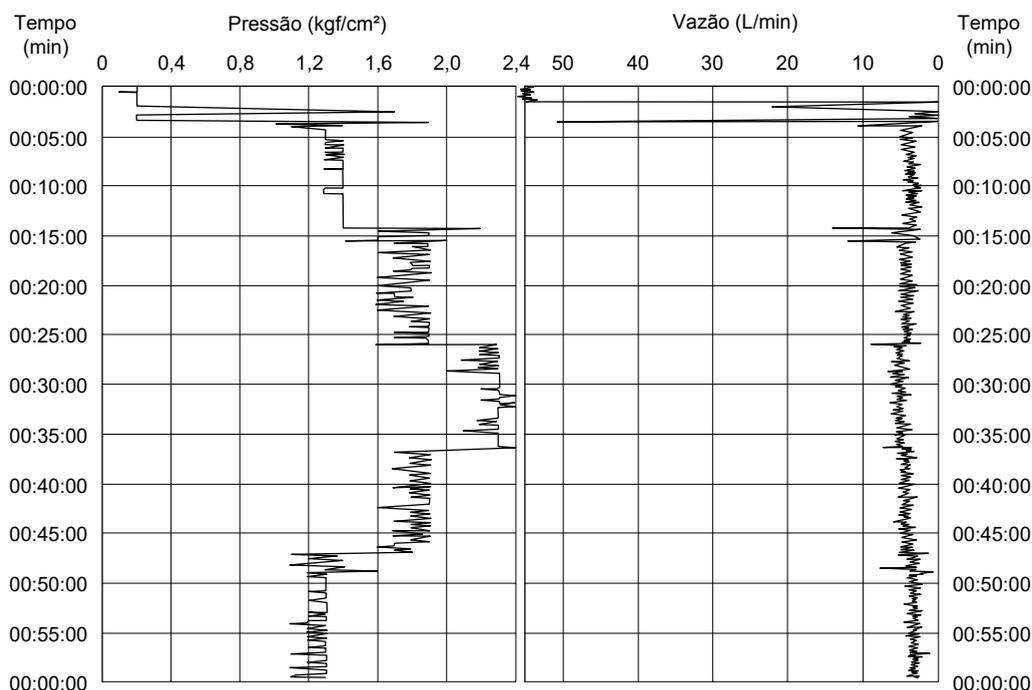
Para ensaios realizados com o uso de sistemas digitais para aquisição de dados, em tempo real, os procedimentos são semelhantes, destacando-se, no entanto, que os ensaios jamais devem ser interrompidos, pois mesmo nas situações mais críticas (altas vazões sem alcançar as correspondentes pressões de ensaio), o sistema de aquisição de dados continua registrando os valores de vazão e pressão, o que permite que as características hidráulicas do maciço ainda sejam determinadas (Figura 10).



| SONDAGEM n°                        |                                   | ENSAIO DE PERDA D'ÁGUA SOB PRESSÃO |                             |                  |                                     |                     |                            |                                    |                                  |                                      |           |                   |                                     |                         |
|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|------------------|-------------------------------------|---------------------|----------------------------|------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|-----------|-------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| ENSAIO n°                          | Profundidade do Obturador (m)     |                                    |                             |                  | Comprimento do Trecho de Ensaio (m) | Ø do furo (m)       | Ø da Canalização (m)       | Comprimento da Canalização (m)     | Altura do Manômetro ou Funil (m) |                                      |           |                   |                                     |                         |
|                                    | Superior                          |                                    | Inferior (ou Fundo do furo) |                  |                                     |                     |                            |                                    |                                  |                                      |           |                   |                                     |                         |
| CONDIÇÃO DE REALIZAÇÃO DO ENSAIO   |                                   | Acima do NA (m)                    |                             | Abaixo do NA (m) |                                     | Artesianismo        | NE (m)                     |                                    | ND (m)                           | ---                                  | Q (L/min) | 0,0               |                                     |                         |
|                                    |                                   |                                    |                             |                  |                                     |                     | NE (m)                     |                                    | ND (m)                           |                                      | Q (L/min) |                   |                                     |                         |
|                                    |                                   |                                    |                             |                  |                                     |                     | NE (m)                     |                                    | ND (m)                           |                                      | Q (L/min) |                   |                                     |                         |
| Pressão Manométrica (Pm - kgf/cm²) | VAZÕES                            |                                    |                             |                  |                                     | PRESSÕES            |                            |                                    |                                  |                                      | PE*       | K (cm/s) (PE x F) |                                     |                         |
|                                    | Absorção d'água a cada minuto (L) |                                    |                             |                  |                                     | Vazão Média (L/min) | Vazão Específica (L/min/m) | Pressão Manométrica (Pm - kgf/cm²) | Coluna d'água (kgf/cm²)          | Perda de Carga Distribuída (kgf/cm²) |           |                   | Perda de Carga Localizada (kgf/cm²) | Carga Efetiva (kgf/cm²) |
|                                    | 1                                 | 2                                  | 3                           | 4                | 5                                   |                     |                            |                                    |                                  |                                      |           |                   |                                     |                         |
|                                    | 6                                 | 7                                  | 8                           | 9                | 10                                  |                     |                            |                                    |                                  |                                      |           |                   |                                     |                         |
|                                    |                                   |                                    |                             |                  |                                     |                     |                            |                                    |                                  |                                      |           |                   |                                     |                         |
|                                    |                                   |                                    |                             |                  |                                     |                     |                            |                                    |                                  |                                      |           |                   |                                     |                         |
|                                    |                                   |                                    |                             |                  |                                     |                     |                            |                                    |                                  |                                      |           |                   |                                     |                         |
|                                    |                                   |                                    |                             |                  |                                     |                     |                            |                                    |                                  |                                      |           |                   |                                     |                         |

\*PE em [(L/min/m)/(kgf/cm²)]

**Figura 9** – Exemplo de tabela para registro dos dados obtidos durante a realização do ensaio de perda d'água sob pressão, incluindo os passos para o cálculo da Perda d'Água Específica e a Condutividade Hidráulica, para ensaio realizado com aquisição analógica de dados (modificado de Oliveira et al., 1975).



**Figura 10** – Exemplo de ensaios de perda d'água sob pressão com aquisição automática de dados (modificado de BS EN ISO 22282-3:2012, 2012).

## 8 DETERMINAÇÃO DOS RESULTADOS

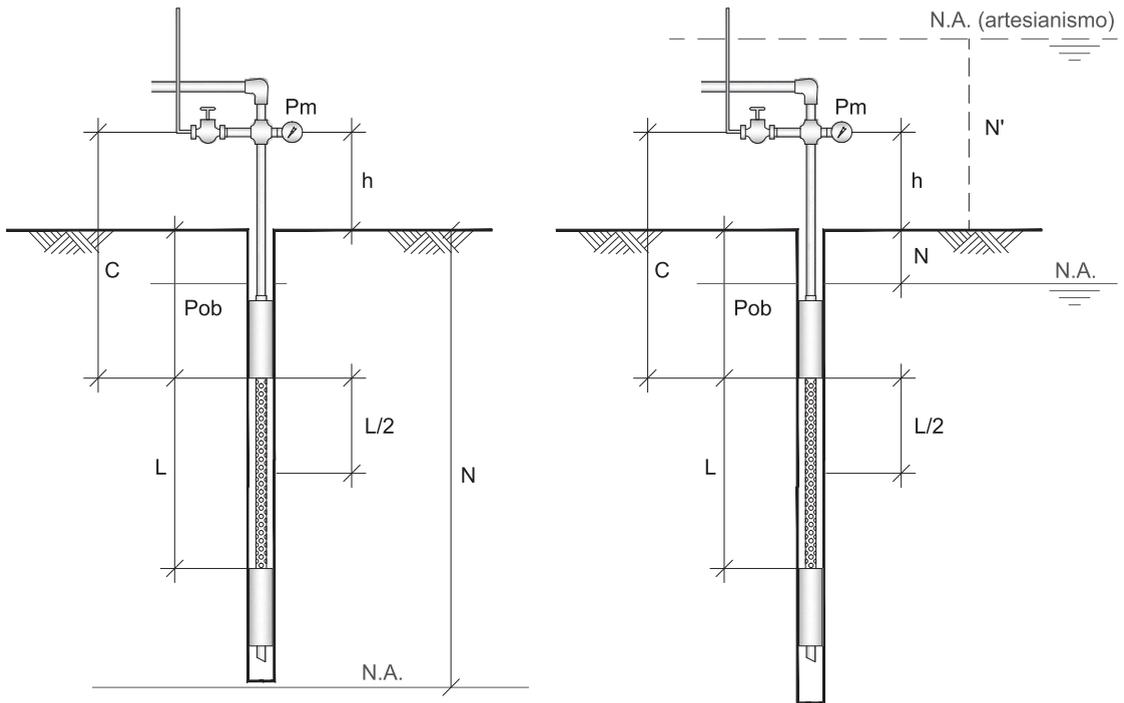
Há dois tipos de resultados que podem ser obtidos a partir da realização do ensaio.

Cada par de valor pressão x absorção possibilita o cálculo de um coeficiente que exprime a permeabilidade do trecho ensaiado. Por outro, os sucessivos pares de valores pressão X absorção obtidos em cada ensaio, nos ciclos ascendente e descendente de pressões, permitem a construção de um gráfico que possibilita a análise do comportamento do maciço durante a realização do ensaio.

O primeiro passo para se alcançar esses resultados é o cálculo da carga efetiva aplicada no trecho, necessário para se calcular a perda d'água específica (PE) e a condutividade hidráulica, para, posteriormente, elaborar os gráficos pressão X vazão específica para cada trecho ensaiado.

### 8.1 Cálculo da carga efetiva ( $C_e$ )

Para o caso dos ensaios realizados sem a utilização de transdutores de pressão instalados no trecho do ensaio, ou seja, com leitura analógica dos instrumentos de medida, é necessário realizar uma série de medidas no campo, conforme indicado na Figura 11, necessárias aos cálculos que se seguem aos ensaios, tanto para aqueles realizados acima como abaixo do nível d'água.



**Figura 11** – Parâmetros necessários para o cálculo da carga efetiva em ensaios realizados acima e abaixo do nível d'água, para obturadores simples ou duplos (Oliveira et al., 1975).

Para ambos os casos:

- $N$  = profundidade do nível d'água estático (m)
- $N'$  = altura do nível d'água estático acima da superfície do terreno, em casos de artesianismo (m)
- $d$  = diâmetro do furo (m)
- $C$  = comprimento da tubulação entre o manômetro e o obturador (m)

- $P_{ob}$  = profundidade do obturador (m)
- $L$  = comprimento do trecho ensaiado (m)
- $h$  = altura do manômetro (m)
- $H$  = carga devido à coluna d'água no interior da canalização (m)
- $P_m$  = pressão manométrica (kgf/cm<sup>2</sup>)
- $P_c$  = perda de carga distribuída na canalização (kgf/cm<sup>2</sup>)
- $P_L$  = perda de carga localizada (kgf/cm<sup>2</sup>)

A carga efetiva ( $C_e$ ) para o caso de obturadores simples (*Equação 2*):

$$C_e = \frac{H}{10} + P_m - P_c \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad \text{(Equação 2)}$$

No caso do uso de obturador duplo, deve ser acrescida à perda de carga na canalização (perda de carga distribuída), a perda de carga localizada do conjunto que conforma o obturador duplo, relativa à canalização ranhurada e/ou com orifícios entre os obturadores superior e inferior e demais particularidades que o compõe (*Equação 3*):

$$C_e = \frac{H}{10} + P_m - P_c - P_L \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad \text{(Equação 3)}$$

Para o cálculo da carga devido à coluna d'água no interior da canalização ( $H$ , em m), devem ser utilizadas as seguintes equações, para as diferentes condições em que o ensaio é realizado:

Para casos de ensaios em que o trecho ensaiado está acima do NA, deve-se utilizar a *Equação 4*

$$H = h + P_{ob} + \frac{L}{2} \quad (\text{m}) \quad \text{(Equação 4)}$$

Para os casos de ensaios em que o trecho ensaiado está abaixo do NA, deve-se utilizar a *Equação 5*

$$H = h + N \quad (\text{m}) \quad \text{(Equação 5)}$$

Para os casos de ensaios em que o trecho ensaiado está abaixo do NA, com artesianismo, deve-se utilizar a *Equação 6*

$$H = -N' + h \quad (m) \quad \text{(Equação 6)}$$

Quando se calcula a carga efetiva ( $C_e$ ) aplicada no trecho de ensaio, é possível que o resultado obtido seja nulo ou negativo. Altas absorções associadas a baixas pressões são as condições que, normalmente, resultam nessa incongruência, devido, principalmente, às elevadas perdas de carga na canalização. Outro aspecto que pode também levar a resultados incongruentes é o fato de as baixas pressões atuantes estarem contidas na margem de erro dos instrumentos de medida em uso.

Considerando estes aspectos, recomenda-se considerar os resultados do ensaio (perda d'água específica e o coeficiente de permeabilidade) como *indeterminados* sempre que  $C_e$  for inferior a 10% da soma  $Pm + \frac{H}{10}$ .

Tais considerações são desnecessárias quando o ensaio é realizado com medidas de pressão efetiva no trecho do ensaio, com o uso de transdutores de pressão.

## 8.2 Cálculo da perda d'água específica (PE)

A perda d'água específica (PE) é dada pela *Equação 7*:

$$PE = \frac{Q_E}{C_e} [(L/\text{min}/m)/(\text{kgf}/\text{cm}^2)] \quad \text{(Equação 7)}$$

Onde,

$$Q_E = \frac{Q}{L} (\text{L}/\text{min}/m)$$

A perda d'água específica é definida pelas variáveis principais do ensaio, ou seja, a vazão específica ( $Q_E$ ) e a pressão efetiva aplicada ( $C_e$ ), além do comprimento do trecho, e reflete a condutividade hidráulica do trecho ensaiado. Para o cálculo da “permeabilidade” a partir da PE basta a sua multiplicação por fatores que dependem das condições do ensaio e do método utilizado, assunto também abordado no item seguinte.

## 8.3 Cálculo da condutividade hidráulica

Dentre os diversos métodos de cálculo disponíveis para a determinação do coeficiente de permeabilidade dos maciços naturais “in situ”, poucos se

aplicam aos meios fissurados. Alguns autores recomendam o uso de um “equivalente” ao coeficiente de permeabilidade. Sugere-se o uso de métodos mais apropriados, como o proposto por BABOUCHKINE (1965), utilizado por FRANCISS (1970), que aplicou a *Equação 8*, sem limitações e sem adaptações.

$$K = \frac{Q}{2\pi HL} * Cf \quad \text{(Equação 8)}$$

onde o coeficiente de forma,  $Cf$ , adimensional, é definido conforme a *Equação 9*:

$$Cf = \text{Ln} \left[ 0,66 \frac{L}{d/2} \right] \quad \text{(Equação 9)}$$

sendo

$K$  = condutividade hidráulica (m/s)

$Q$  = vazão em (m<sup>3</sup>/s)

$H$  = carga hidráulica efetiva do trecho de ensaio (m)

$L$  = comprimento do trecho de ensaio (m)

$d$  = diâmetro do furo (m)

Ajustando a fórmula para perda d'água específica, em [(L/min/m)/(kgf/cm<sup>2</sup>)], e para um resultado de  $K$ , em cm/s, tem-se (*Equação 10*):

$$K = PE * \frac{1,66}{2\pi} * 10^{-4} * Cf \quad \text{(Equação 10)}$$

Onde,

$PE$  = Perda d'água específica (L/min/m)/(kgf/cm<sup>2</sup>)

$K$  = condutividade hidráulica (cm/s)

Considerando-se:

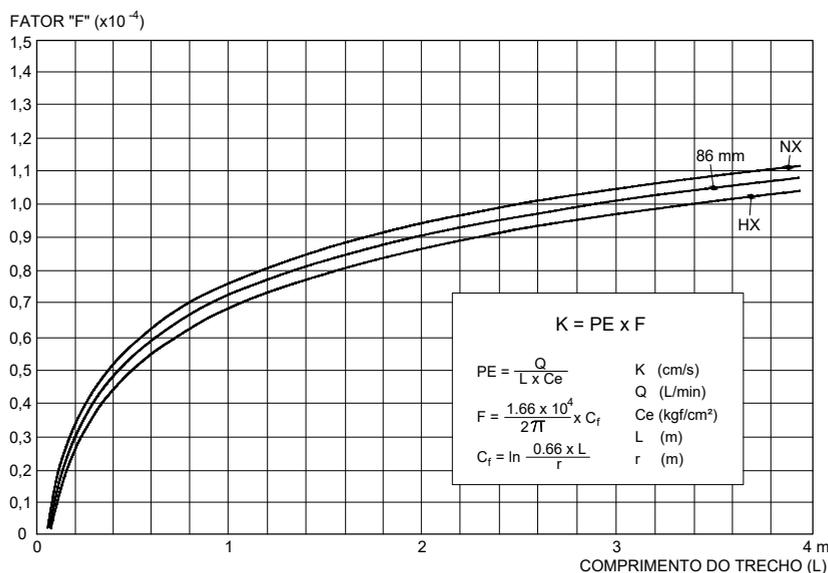
$$F = \frac{1,66}{2\pi} * 10^{-4} * Cf$$

tem-se:

$$K = PE * F \quad (\text{cm/s})$$

Para facilitar o acompanhamento do ensaio, quando realizado de modo analógico, e para facilitar os cálculos, a Figura 9 apresenta uma planilha que traz os dados coletados durante a realização dos ensaios e apresenta, de maneira ordenada, os elementos necessários para o cálculo da condutividade hidráulica.

Paralelamente, o ábaco apresentado na Figura 12 permite a determinação do fator F para os diâmetros de sondagens rotativas mais utilizadas em investigações geológico-geotécnicas (diâmetros NX, 86 mm, HX) e trechos de até 4 m.



**Figura 12** – Ábaco para determinação do fator F para os diâmetros NX, 86 mm, HX e comprimento dos trechos de ensaio de até 4 m (Oliveira et al., 1975).

A condutividade hidráulica calculada é válida para ensaios realizados sob um regime de escoamento laminar. Contudo, este regime é raramente alcançado, principalmente devido às altas pressões utilizadas nos ensaios de perda d'água sob pressão. Por esta razão, é conveniente analisar as curvas de pressão (carga efetiva –  $C_e$ ) X vazão específica para adotar os valores mais adequados aos cálculos.

A utilização do termo “condutividade hidráulica” em vez de “permeabilidade” ou “coeficiente de permeabilidade” é o mais adequado, conforme

comentado nessa Norma e em outras da ABGE (Norma 109/2024 – Descrição e Classificação de Sondagens). O símbolo “K” é de uso corrente para designar, em cm/s, tanto o coeficiente de permeabilidade de meios porosos, como a condutividade hidráulica de meios fissurados.

## 9 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO TRECHO ENSAIADO

A análise do comportamento do trecho ensaiado é realizada por meio de gráficos que relacionam a carga efetiva x vazão específica. Estes, permitem avaliar o modo como o escoamento da água se faz através das fissuras e como estas se comportam frente às pressões aplicadas. Do mesmo modo, permitem uma avaliação da condutividade hidráulica do maciço rochoso no trecho ensaiado, avaliar a necessidade de tratamento de fundações de barragens, ou ainda, avaliar a eficiência destes tratamentos.

Os comportamentos típicos observados nos ensaios podem ser enquadrados em cinco diferentes classes:

- Fluxo laminar: ocorre quando há uma relação linear entre as vazões específicas e a pressões efetivas, ou seja, o gráfico que relaciona as grandezas se aproxima de uma reta, indicando que a condutividade hidráulica do maciço rochoso no trecho ensaiado independe da pressão efetiva aplicada. É um comportamento observado quando as velocidades de infiltração são relativamente baixas, frequentemente obtidas com a utilização de pressões efetivas baixas;
- Fluxo turbulento: ocorre quando não é observada a linearidade entre as vazões específicas e as pressões efetivas aplicadas, podendo ser o resultado das perdas de carga que ocorrem durante o fluxo. A condutividade hidráulica do maciço rochoso no trecho ensaiado diminui à medida que a pressão efetiva aumenta. É um comportamento característico de maciços rochosos cujas discontinuidades encontram-se parcialmente abertas, com aberturas relativamente grandes;

- **Deformação:** ocorre quando a pressão aplicada é maior do que a tensão principal mínima atuante no maciço rochoso, o que pode causar uma deformação temporária das discontinuidades (abertura). É identificado quando as condutividades hidráulicas obtidas nos estágios crescentes de pressão são menores que aquelas obtidas nos estágios decrescentes. Condutividades hidráulicas semelhantes podem ser obtidas nos estágios de pressão efetivas mínima e intermediárias, mas, apresenta um aumento desse valor no estágio de pressão efetiva máxima. Tal fato pode ser interpretado como sendo resultado de um comportamento elástico ideal e indicativo da ocorrência do fenômeno denominado “hidrojacking”, que é uma situação em que a água, sob pressão, penetra nas discontinuidades, fazendo com que se propaguem (em abertura e extensão), com consequências que podem ser graves para o maciço rochoso.
- **Remoção do preenchimento ou deformação permanente:** ocorre quando se observa um aumento progressivo da vazão específica com o desenvolvimento do ensaio, independentemente do estágio de pressão. Tal comportamento sugere que o fluxo de água induziu modificações permanentes e irrecuperáveis no maciço rochoso, geralmente devido à remoção dos preenchimentos e/ou devido a deformações permanentes no maciço rochoso, que podem ter sido causadas pelo uso de pressões excessivas no ensaio. **Este comportamento pode ser indicativo da ocorrência do fenômeno denominado faturamento hidráulico do maciço rochoso.**
- **Preenchimento das discontinuidades:** as vazões específicas diminuem com o desenvolvimento do ensaio, independentemente do estágio de pressão em que o ensaio se encontra. Este comportamento indica que:
  1. a água preenche progressivamente discontinuidades isoladas, não persistentes;
  2. expansão de argilominerais presentes em discontinuidades, quando expostos à presença da água;
  3. carreamento progressivo de finos para as discontinuidades, preenchendo-as e obstruindo o fluxo de água.

Uma conjugação das duas diferentes condições de fluxo (laminar e turbulento) com as três diferentes classes de comportamento (abertura das descontinuidades – por deformação, remoção do preenchimento e preenchimento das descontinuidades) permite uma definição dos casos típicos, teoricamente esperados (Figura 13).

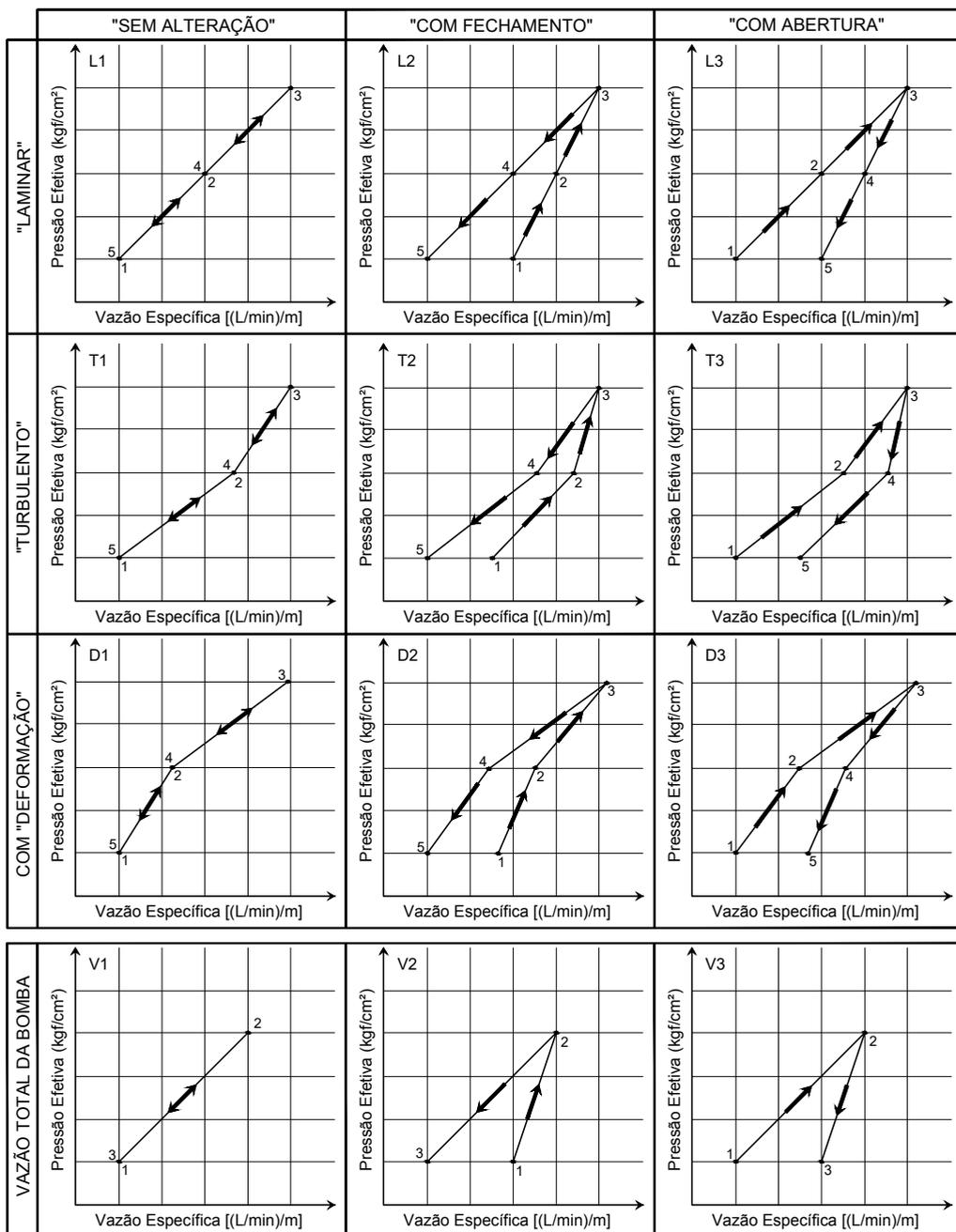
Para a construção da Figura 13, foram, inicialmente, definidos os quatro casos teoricamente esperados (fluxo laminar, fluxo turbulento”, com deformação do maciço e de vazão total da bomba), com subdivisões relativas aos comportamentos das descontinuidades (sem alteração, com fechamento e com abertura), constituindo-se em uma orientação para analisar o comportamentos dos fluxos d’água durante os ensaios, principalmente por se considerar que, usualmente, o número de estágios de pressão aplicados nos ensaios de rotina é insuficiente.

Assim, tendo por base esta orientação, a análise do comportamento deve, sempre, ser adaptada aos casos de ensaios de perda d’água sob pressão realmente realizados em uma campanha de ensaios.

Destaca-se que, para o cálculo da condutividade hidráulica do maciço rochoso, é essencial que as condições de fluxo implantadas durante a realização do ensaio seja a de um regime linear, sem alteração nas condições físicas das fissuras/ descontinuidades. O único caso que se enquadra nessa condição é o caso de fluxo laminar, sem alteração (caso L1 da Figura 13). Para todos os demais casos sugere-se adotar os valores do primeiro estágio de pressão.

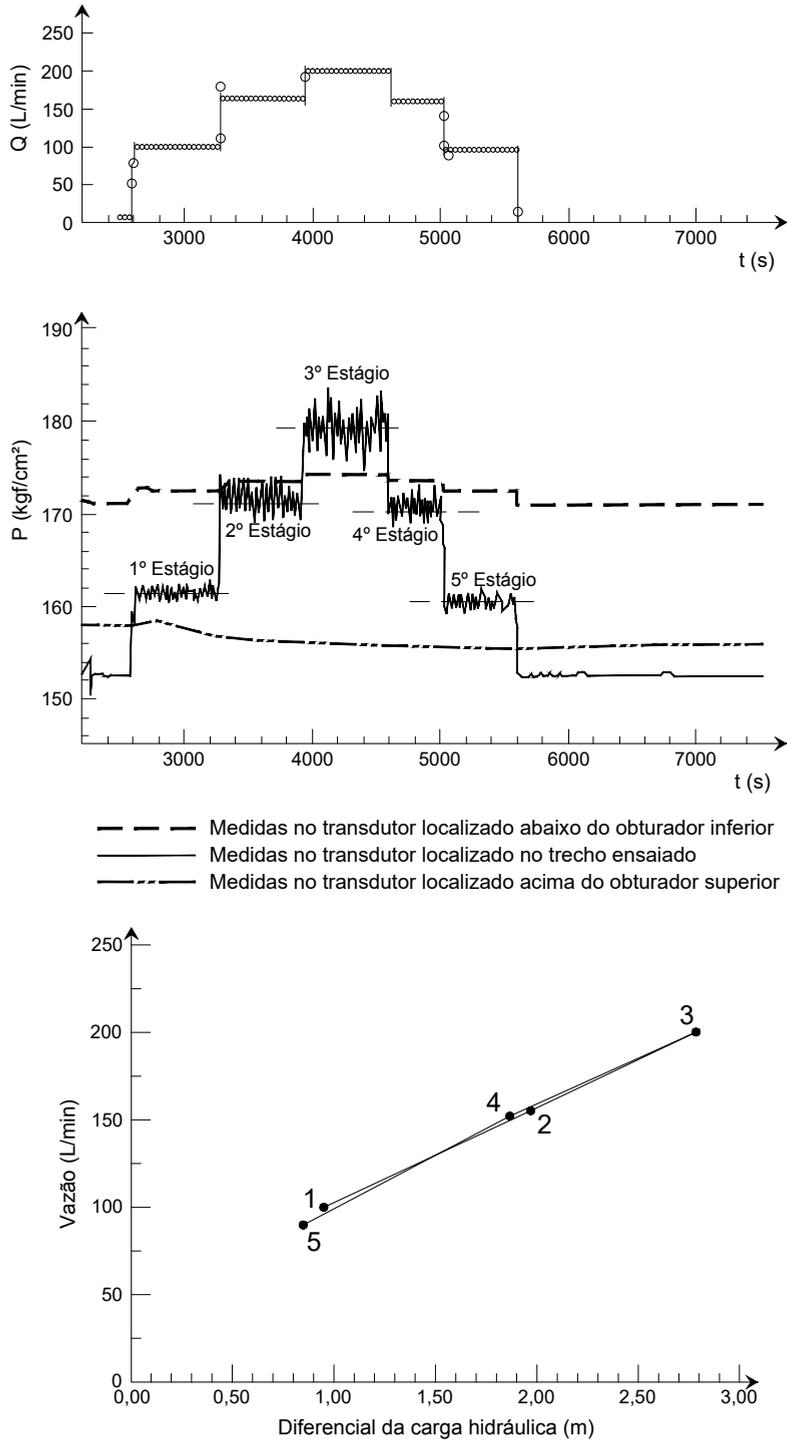
Uma aplicação direta dos resultados desta análise pode ser a determinação de valores limites de pressão para tratamento de fundação de barragens por meio de injeção de cimento.

A Tabela 2 e a Figura 14 apresentam os resultados de ensaios de perda d’água realizados com cinco estágios de pressão, com aquisição automática de dados em maciço muito fraturado. O diferencial de pressão máxima em relação à pressão inicial é da ordem de apenas 2,7 m, observando-se que o acréscimo das vazões é não linear, pois o aumento da vazão pode induzir a fluxos turbulentos, que cria resistências ao fluxo, em especial nas imediações das paredes da perfuração/entrada das descontinuidades (BS EN ISO 22282-3:2012, 2012).



As setas indicam os sucessivos estágios (1, 2, 3, 4 e 5) das pressões aplicadas

**Figura 13** – Comportamentos típicos observados nos ensaios de perda d'água sob pressão (modificado de Oliveira et al., 1975).



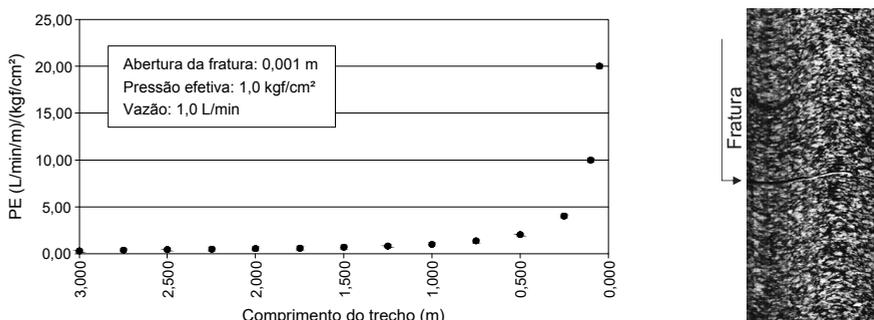
**Figura 14** – Resultados de ensaios de perda d’água sob pressão obtidos em rocha muito fraturada utilizando aquisição automática de dados (modificado de BS EN ISO 22282-3:2012, 2012).

**Tabela 2** – Ensaios de perda d'água sob pressão em maciços muito fraturados (modificado de BS EN ISO 22282-3:2012, 2012).

| Estágio de Pressão | $\Delta h$ (m) | Vazão (L/min) | PAE (L/min/m/kgf/cm <sup>2</sup> ) | K (cm/s)              |
|--------------------|----------------|---------------|------------------------------------|-----------------------|
| 1                  | 0,95           | 100           | 20,2                               | $2,02 \times 10^{-3}$ |
| 2                  | 1,97           | 155           | 29,0                               | $2,90 \times 10^{-3}$ |
| 3                  | 2,78           | 200           | 36,4                               | $3,64 \times 10^{-3}$ |

A interpretação dos ensaios de perda d'água sob pressão é baseada na suposição de que o meio é contínuo ou de que as características estruturais do maciço são igualmente distribuídas ao longo do trecho de ensaio. A condutividade hidráulica do maciço rochoso é definida pelas características de suas descontinuidades, como a abertura e a distribuição espacial. Assim, a condutividade hidráulica e a transmissividade\* são propriedades que dependem das características das fraturas. Como exemplo, se um maciço rochoso tem descontinuidades que somam 0,1 m (100 mm) de abertura, o resultado do ensaio será diferente se o trecho de ensaio tiver 0,1, 1,0 ou 10 m de comprimento, sendo impermeável o restante do trecho de ensaio. A condutividade hidráulica relativa é 1,0 se o trecho de ensaio for de 0,1 m, 0,10 para trecho de ensaio de 1,0 m e 0,01 para ensaios realizados em trechos com 10 m de comprimento (BS EN ISO 22282-3:2012, 2012).

A Figura 15 ilustra a importância do comprimento do trecho na definição da perda d'água específica.



**Figura 15** – Variação da Perda d'Água Específica com a diminuição da extensão do trecho do ensaio em um maciço rochoso pouco fraturado, conforme ilustração à direita.

\* Transmissividade – É um parâmetro hidráulico que exprime a quantidade de água que flui horizontalmente por toda a espessura saturada do aquífero.

## 10 ESPECIFICAÇÕES DOS TRABALHOS E IMPORTÂNCIA DO REGIME LAMINAR

Na prática, a elaboração das Especificações para reger os trabalhos em uma campanha de investigação, incluindo os ensaios de perda d'água sob pressão, fica a cargo de profissional legalmente habilitado, que terá a incumbência de cotejar e harmonizar da melhor maneira possível a presente Norma com outras normas, diretrizes e demais publicações sobre o tema, adequando-as às investigações e às necessidades de projeto.

A caracterização hidrogeotécnica, como qualquer outra caracterização dos maciços naturais, está fundamentada no quadro geológico local, considerando-se, sempre, as solicitações a serem impostas pela obra a ser executada, em execução, ou mesmo em operação. Sob este aspecto, alguns critérios (especificações) podem ser adequados à uma aplicação mais apropriada dos ensaios, como segue:

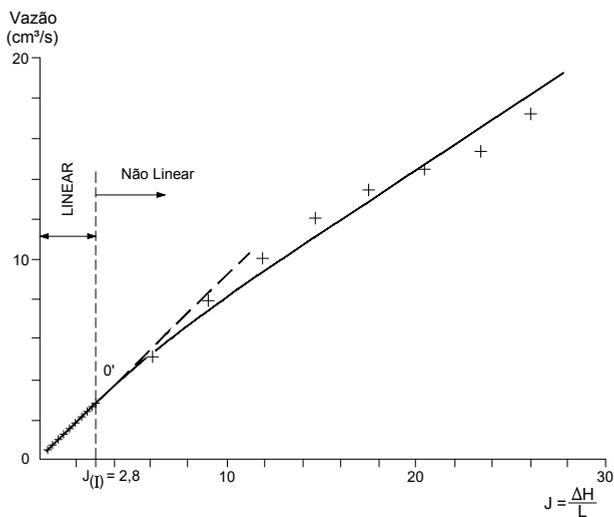
- 1) Os **trechos de ensaio** devem, na medida do possível, ser escolhidos em função das heterogeneidades e descontinuidades do maciço, visando caracterizar, individualmente, cada compartimento geológico-estrutural do maciço rochoso. A adoção deste critério exige, evidentemente:
  - a) uma observação adequada durante a execução da sondagem, assinalando alguns aspectos importantes como: profundidades onde ocorreram mudanças nas características litoestruturais do maciço rochoso, perdas, ou ganhos, de água de circulação, artesianismo, flutuações bruscas do nível d'água etc.
  - b) uma análise detalhada dos testemunhos da sondagem à medida que vão sendo recuperados.
  - c) um conhecimento adequado da geologia do local (litologias, estratigrafia e estruturas geológicas, principalmente) onde estão sendo realizados os ensaios.
  - d) Recomenda-se não executar ensaios em trechos muito pequenos, pois podem introduzir um detalhamento desnecessário

para a maioria dos problemas nas escalas usuais de trabalho. Somente em casos específicos, os trechos podem ser menores que 1,0 m. Por outro lado, trechos superiores a 6,0 m ultrapassam o limite superior da faixa que permite estudos estatísticos das características hidrogeotécnicas do maciço (Oliveira et al., 1975) e podem envolver mais de um litotipo e/ou maciços com características geológico-estruturais muito distintos entre si, dificultando a determinação dos parâmetros necessários ao projeto.

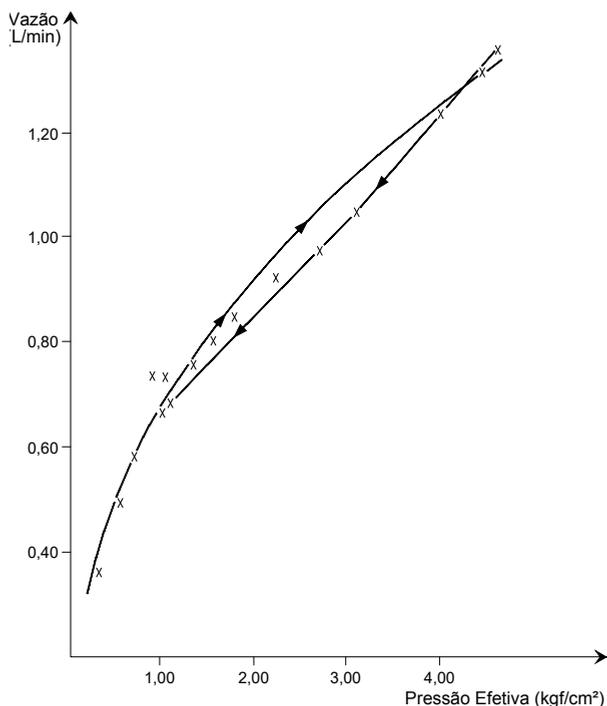
- 2) A adoção de **pressões de ensaios** deve considerar, além da profundidade do obturador, as condições topográficas e as condições geológicas locais. Como são inúmeros os fatores a serem considerados (litotipos, graus de alteração, graus de faturamentos, topografia etc.), considera-se plausível a execução de ensaio prévios a fim de obter dados concretos para embasar a adoção dos critérios a serem utilizados na campanha de ensaios. Tais ensaios, executados em trechos representativos dos maciços, deverão ser de longa duração, com a realização de maior gama de estágios de pressão. Este número maior de estágios de pressão possibilitará caracterizar, de modo mais detalhado, o comportamento de cada um dos compartimentos geológico-estruturais, possibilitando fixar bases mais criteriosas para a adoção das pressões para os ensaios sistemáticos no restante do maciço.

É importante destacar que a condição necessária para o cálculo a condutividade hidráulica é a existência de um **regime laminar**, percebido nos ensaios de perda d'água sob pressão pela relação linear entre vazão e pressão.

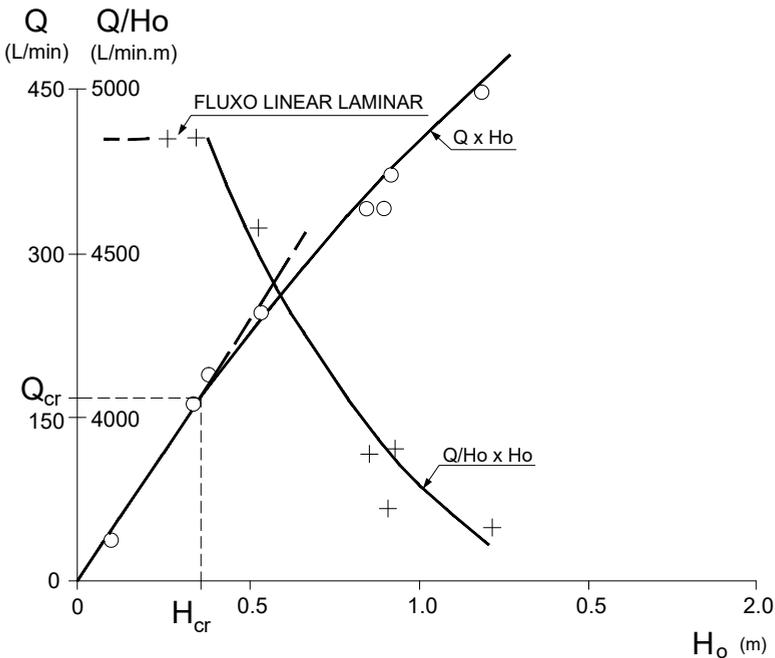
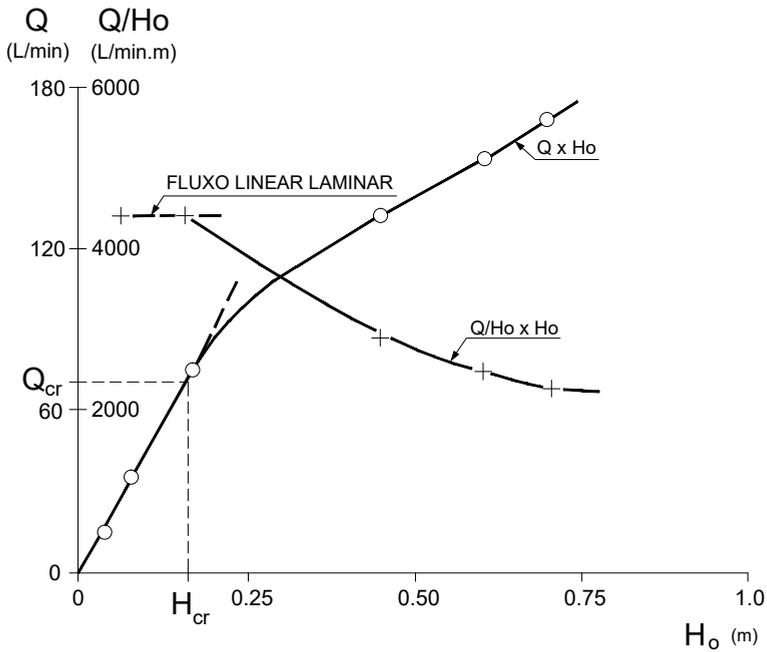
O regime laminar é obtido quando as pressões são suficientemente baixas para não alterarem as condições naturais do maciço rochoso pela pressão aplicada. Tal comportamento foi observado por Quadros (1982) em estudos de laboratório (Figura 16), bem como em ensaios realizados no campo, em fundações de barragens (Figura 17 e Figura 18).



**Figura 16** – Relação entre vazão e gradiente. Resultados obtidos em ensaios e laboratório (Quadros, 1982).



**Figura 17** – Relação entre vazão e gradiente em ensaios de infiltração realizados em múltiplos estágios nas fundações da barragem de Nova Avanhandava (Cruz et al., 1982).



**Figura 18** – Ensaios de infiltração (acima) e de descarga (abaixo) realizados em múltiplos estágios nas fundações da barragem de Taquaruçu (Azevedo, 1993).

O regime de fluxo pode passar de laminar para turbulento em baixas vazões ou em pressões muito baixas, por vezes da ordem de apenas alguns poucos decímetros (Figura 17 e Figura 18).

Quando as condições de fluxo laminar não forem alcançadas, sugere-se, para todos os demais casos descritos na Figura 13, a adoção dos valores obtidos no primeiro estágio de pressão.

Destaca-se a existência de uma série de equações disponíveis para estimar a condutividade e demais parâmetros hidráulicos de maciços rochosos com base nos resultados obtidos nos ensaios de perda d'água sob pressão, como é o caso daquelas apresentadas na norma inglesa (BS EN ISO 22282-3:2012, 2012). Nestes casos, é necessário que o ensaio seja realizado adotando-se uma série de sucessivos estágios com a aplicação de pressões muito baixas, visando a obtenção da relação linear entre vazão e pressão.

Nazareth (1987) propõe, com o uso dos mesmos equipamentos atualmente utilizados, que o ensaio seja subdividido em três partes: a primeira parte seria responsável pela avaliação da permeabilidade do maciço rochoso, com a aplicação de pressões de injeção tão baixas quanto possível; a segunda parte do ensaio seria utilizada para avaliar as alterações da permeabilidade do maciço rochoso decorrentes da aplicação de pressões crescentes, sem ultrapassar, no entanto, os critérios de pressão máxima que consideram o peso próprio do maciço rochoso; e, finalmente, a terceira etapa, seria utilizada para avaliar a susceptibilidade do maciço à ruptura hidráulica ou para o projeto de tratamento de fundações de barragens por injeção de cimento.

## 11 PADRONIZAÇÃO E DIGITALIZAÇÃO DE RESULTADOS

A presente “ABGE NORMA 108/2024 – Ensaio de perda d'água sob pressão”, bem como as demais da série 100, referentes às sondagens mecânicas, justificam a importância do planejamento, da digitalização e da padronização das campanhas de sondagens e ensaios, e que pode ser estendida a outros tipos de investigações geológico-geotécnicas (mapeamentos, por exemplo), utilizando-se softwares disponíveis no mercado, que possibilitem

intercâmbio de informações da campanha, segundo uma linguagem comum, a qualquer tempo, entre os diversos envolvidos nos serviços, principalmente Investidor, Projetista, Fiscalização e Executor. Isso adquire importância ainda maior ao longo do tempo ao assegurar:

- a) rapidez e eficiência, mesmo que sejam alterados os entes envolvidos durante o período de vida do empreendimento, desde os estudos iniciais, projeto, construção, operação e até o descomissionamento; e,
- b) construção de bancos de dados.

A Figura 19 apresenta modelo de classificação da condutividade hidráulica/permeabilidade utilizada na padronização, digitalização de resultados e modelagem geológico-geotécnica.

| Sigla | Perda d'Água Específica – PE<br>(L/min . m . kgf/cm <sup>2</sup> ) | Permeabilidade / Condutividade Hidráulica – K<br>(cm/s) |
|-------|--|---|
| H1    | < 0,1  | < 10 <sup>-5</sup>                                      |
| H2    | 0,1 – 1,0  | 10 <sup>-5</sup> – 10 <sup>-4</sup>                     |
| H3    | 1,0 – 5,0  | 10 <sup>-4</sup> – 5,0 x 10 <sup>-4</sup>               |
| H4    | 5,0 – 10,0   | 5,0 x 10 <sup>-4</sup> – 10 <sup>-3</sup>               |
| H5    | > 10,0   | > 10 <sup>-3</sup>                                      |

Correlação aproximada entre PE e K.

**Figura 19** – Classificação de condutividade hidráulica/permeabilidade

Fonte: Norma ABGE 109/2024 – Descrição e classificação de sondagens

## 12 PRINCIPAIS PARTICIPANTES

**Editor:** João Jeronimo Monticelli

**Revisores:** Adalberto Aurélio Azevedo e Antonio Manoel dos Santos Oliveira

**Autores e colaboradores das versões anteriores:**

*1ª edição:* autores: Antonio Manoel dos Santos Oliveira, Ricardo Fernandez da Silva e Jayme Ferreira Júnior. Boletim 02, 1ª edição: “Ensaio de perda d’água sob pressão – Diretrizes”, editado pela ABGE, em 1974.

2ª edição: Comissão formada por Adalberto Aurélio Azevedo (Coodenador), Alessandro Jésus Guimarães e Pedro Paulo Freiheit Côrtes. Revisores e colaboradores: Antonio Manoel dos Santos Oliveira, Antonio Marrano, Fábio Soares Guimarães, José Luiz Albuquerque Filho, Malva Mancuso e Marcelo Denser Monteiro. Boletim 02, 2ª edição: “Ensaio de perda d’água sob pressão – Diretrizes” Corresponde ao livro 5, da publicação “Investigações geológico-geotécnicas – Guia de boas práticas, editado pela ABGE, em 2021.

Edição da Norma ABGE 108/2024: Para a presente Norma, o Editor (João Jeronimo Monticelli) e os Revisores (Adalberto Aurélio Azevedo e Antonio Manoel dos Santos Oliveira) mantiveram o texto original do Boletim da 2ª Edição, porém reescrito segundo nova itemização, compatível às demais Normas e Diretrizes Normativas da ABGE.

## 13 REFERÊNCIAS NORMATIVAS E DIRETIVAS

É importante que os usuários das informações dessa publicação a conheçam e a harmonizem com outras sobre o mesmo tema, assim possibilitando maior consistência nas especificações, nos termos de referências e contratos e maior eficácia, segurança e economicidade nos estudos, projetos e obras. Dentre outras, as seguintes publicações devem ser levadas em consideração:

ASTM D4630-19 (2019). **Standard test method for determining transmissivity and storage coefficient of low-permeability rocks by in situ measurements using the constant head injection test**, American Society for Testing and Materials – ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019. 8p. [www.astm.org](http://www.astm.org).

ASTM D4631 – 18 (2018). **Standard Test Method for Determining Transmissivity and Storativity of Low Permeability Rocks by In Situ Measurements Using Pressure Pulse Technique**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, 9p. [www.astm.org](http://www.astm.org).

ASTM D5855 / D5855M-20 (2020). **Standard Practice for (Analytical Procedure) Determining Transmissivity and Storage Coefficient of Confined**

**Nonleaky or Leaky Aquifer by Constant Drawdown Method in Flowing Well**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, 6p. [www.astm.org](http://www.astm.org).

**ASTM D6029 / D6029M-20 (2020) Standard Practice for (Analytical Procedures) Determining Hydraulic Properties of a Confined Aquifer and a Leaky Confining Bed with Negligible Storage by the Hantush-Jacob Method**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020. 11p. [www.astm.org](http://www.astm.org).

**BS EN ISO 22282-3:2012 (2012) Geotechnical investigation and testing. Geohydraulic testing. Water pressure tests in rock**. British Standards Institution. ISBN 9780580761522. 36p.

**ISO 22282-3:2012 (2012). Geotechnical Investigation and Testing – Geohydraulic Testing – Part 3: Water Pressure Tests in Rock**. International Organization for Standardization. 1st Ed. Review in 2017. 26p.

**Norma ABGE 104/2023 – Sondagem rotativa e mista**. São Paulo: ABGE. Vários colaboradores. Disponível em [www.abge.org.br](http://www.abge.org.br)

**Norma ABGE 109/2024 – Descrição e classificação de sondagens**. Vários colaboradores. São Paulo: ABGE. Disponível em [www.abge.org.br](http://www.abge.org.br)

**USBR. (1951). Permeability tests using drill holes and wells**. Bureau of Reclamation Geology Report nº G-97, January 3, p. 43.

**VASKOU, P.; QUADROS, E. F.; KANJI, M.A.; JOHNSON, T.; EKMEKCI, M. (2019). ISRM Suggested Method for the Lugeon Test. Rock Mechanics and Rock Engineering**. v. 52, Issue 10, p. 4155–4174. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01954-x>.

## **14** REFERÊNCIAS/LEITURAS RECOMENDADAS

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5626 (1998). Instalação Predial de Água Fria**, 41p.

AMARO, A.C.P. (2015). **Interpretação de ensaios Lugeon para a caracterização hidráulica de maciços rochosos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Portugal. 162p.

ASTM D4630-19 (2019). **Standard test method for determining transmissivity and storage coefficient of low-permeability rocks by in situ measurements using the constant head injection test**, American Society for Testing and Materials – ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019. 8p. [www.astm.org](http://www.astm.org).

ASTM D4631 – 18 (2018). **Standard Test Method for Determining Transmissivity and Storativity of Low Permeability Rocks by In Situ Measurements Using Pressure Pulse Technique**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, 9p. [www.astm.org](http://www.astm.org).

ASTM D5855 / D5855M-20 (2020). **Standard Practice for (Analytical Procedure) Determining Transmissivity and Storage Coefficient of Confined Non-leaky or Leaky Aquifer by Constant Drawdown Method in Flowing Well**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, 6p. [www.astm.org](http://www.astm.org).

ASTM D6029 / D6029M-20 (2020) **Standard Practice for (Analytical Procedures) Determining Hydraulic Properties of a Confined Aquifer and a Leaky Confining Bed with Negligible Storage by the Hantush-Jacob Method**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020. 11p. [www.astm.org](http://www.astm.org).

AZEVEDO, A.A. (1993). **Análise do fluxo e das injeções nas fundações da Barragem de Taquaruçú, Rio Paranapanema, São Paulo**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil, 201p.

BOGOMOLOV, G.V. (1965). **Hydrogéologie et notions de géologie de l'ingénieur**. Ed. de la Paix. Moscow. 278p.

BS EN ISO 22282-3:2012 (2012) **Geotechnical investigation and testing. Geohydraulic testing. Water pressure tests in rock**. British Standards Institution. ISBN 9780580761522. 36p.

CAMBEFOR, H. (1972). **Geotechnique de l'ingénieur et reconnaissance des sols**. Éditions Eyrolles. 345p.

CRUZ, P. T.; QUADROS, E.F.; CORRES F°, D.; MARRANO, A. (1982). **Evaluation of opening and hydraulic conductivity of rock discontinuities**. 23° U.S Symposium on Rock Mechanics. Berkeley, 1982. p. 769-777.

DE MIO, G. (2024). **Níveis de confiabilidade para o Bim Geotécnico**. Diretriz Normativa ABGE 300/2024. Vários colaboradores. São Paulo: ABGE. Disponível em [www.abge.org.br](http://www.abge.org.br)

FELL, R.; MacGregor, P.; STAPLEDON, D.; BELL, G. (2005). **Geotechnical Engineering of Dams**. London. CRC Press. 1ts Ed. ISBN: 9780429107498. 930p. <https://doi.org/10.1201/NOE0415364409>.

FRANCISS, F. O. (1970) **Contribution a l'étude du mouvement de l'eau à travers les milieu fissures** (Thèse à la Faculté des Sciences de L'université de Grenoble). 184p. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00814358>. Acesso em: 08 dez. 2020.

ISO 22282-3:2012 (2012). **Geotechnical Investigation and Testing – Geohydraulic Testing – Part 3: Water Pressure Tests in Rock**. International Organization for Standardization. 1st Ed. Review in 2017. 26p.

LONDE, P.; SABARLY, F. (1966). **La distribution des permeabilités dans les foundations des barrages voûte en fonction du champ de contraintes**. In: Congress of the International Society of Rock Mechanics, 1, Lisboa, 1966. Proceedings, Lisboa, LNEC, v.2, p. 517-522.

LOUIS, C. (1974) **Hydraulique des roches**. Thèse Doct. es Sc. Université de Paris.

LUGEON, M. (1933) **Barrages et Geologie**. Dunod, Paris.

NAZARETH, A. (1987). **Proposta de alteração do ensaio Lugeon**. Geotecnia. Revista Portuguesa de Geotecnia, nº 50. 1987. p. 43-62.

OLIVEIRA, A.M.S; MONTICELLI, J. J. (2018). **Geologia de Engenharia e Ambiental**. V. 1, 2, 3. São Paulo: ABGE, 916 p.

OLIVEIRA, A. M. S.; SILVA, R.F.; FERREIRA JUNIOR, J. (1975). **Ensaio de perda d'água sob pressão; diretrizes**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, ABGE, Boletim nº 2.

QUIÑONES-ROZO, C.P.E. (2010) **Lugeon test interpretation: revisited**. In: 30th ANNUAL USSD CONFERENCE, April 12-16, 2010, Sacramento, California. Proceedings... . [s. l.]: United States Society of Dams. p.405-414. Disponível em: <[https://www.usstdams.org/wp-content/uploads/2016/05/AbstractsBook\\_2010.pdf](https://www.usstdams.org/wp-content/uploads/2016/05/AbstractsBook_2010.pdf) >. Acesso em: 08 dez. 2020.

Quadros, E. F. (1982). **Estudo das características do fluxo em fraturas de rocha**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SABARLY, F. (1974). **Engineering geology and dam foundation**. 2nd International Congress of the International Association of Engineering Geology. Brazil, Vol. 2, VI-GR1.

SILVA, R. F. da. (1969). **Perda de carga na canalização utilizada nos ensaios de perda d'água sob pressão na obra de Ilha Solteira**. In: 1ª Semana Paulista de Geologia Aplicada. Anais da 1ª Semana Paulista de Geologia Aplicada, APGA. p. 309-316.

USBR. (1951). **Permeability tests using drill holes and wells**. Bureau of Reclamation Geology Report nº G-97, January 3, p. 43.

VASKOU, P.; QUADROS, E. F.; KANJI, M.A.; JOHNSON, T.; EKMEKCI, M. (2019). **ISRM Suggested Method for the Lugeon Test**. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. v. 52, Issue 10, p. 4155–4174. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01954-x>.

## ANEXO ÚNICO: ENSAIO DE PERDA D'ÁGUA NO BRASIL – BREVE HISTÓRICO

**Adalberto Aurélio Azevedo**

Em novembro de 1975 a ABGE apresentou ao meio técnico o seu Boletim nº 2, de título “Ensaio de perda d’água sob pressão – Diretrizes”. O objetivo dessas Diretrizes, conforme explicitado por seus autores -- Antonio Manoel dos Santos Oliveira, Ricardo Fernandez da Silva e Jayme Ferreira Júnior -- foi o de preencher uma lacuna que se caracterizava pela falta de publicações que apresentassem “os diversos aspectos do ensaio, desde a sua realização até a apreciação dos resultados”.

A justificativa para a publicação do Boletim foi a de que o ensaio de perda d’água sob pressão “é um dos mais frequentes ensaios realizados, acompanhando, em geral, todas as sondagens rotativas para investigação de fundação de barragens”.

O produto apresentado ao meio técnico representava, à época, “a experiência de longos anos de atividades do corpo técnico do IPT”, desde as primeiras notas trazidas por Ernesto Pichler – criador, em 1937, da Seção de Geologia e Petrografia do IPT, e que havia estagiado no *United States Bureau of Reclamation (USBR)* no início dos anos 1950.

Esse trabalho se constituiu em uma concretização dos esforços de pesquisa que tinham, por missão, estrategicamente planejada pelo Agrupamento de Geologia Aplicada do IPT, de promover o avanço tecnológico brasileiro no campo da construção das barragens.

Como primeira etapa desse plano, um dos autores do Boletim (Antônio Manoel dos Santos Oliveira) foi enviado à França para conhecer e trazer para o Brasil tecnologias da denominada “escola francesa” em pesquisa e tratamento de fundações de grandes barragens, tendo em vista que aquele país se destacava, na década dos anos de 1970, como um dos mais avançados nesse campo.

Tendo como base de pesquisa a Division Géologique-Géotechnique da EDF – Eletricité de France, foram consultados especialistas, expoentes na época, na prática da hidrogeotecnia dos maciços de fundação das grandes barragens: Henri

Cambefort (Cambefort, 1972), Sabarly (Sabarly, 1974), Pierre Londe (Londe, Sabarly, 1966) e Claude Louis (Louis, 1974). Tais especialistas eram os herdeiros de Maurice Lugeon, pioneiro em hidráulica de fundações de barragens, cujo legado está sintetizado no livro *Barrages et Geologie* (Lugeon, 1933).

A segunda etapa da estratégia, que foi a responsável direta pela edição do Boletim, foi a criação da Seção de Hidrogeotecnia no referido Agrupamento, de maneira a consolidar a produção de tecnologia brasileira para as fundações das barragens que estavam sendo construídas no país.

Os primeiros estudos dessa Seção foram dirigidos para um levantamento de toda a prática brasileira no campo da Hidrogeotecnia a fim de conhecer as lacunas existentes. Uma das lacunas identificadas foi a falta de orientações fundamentais, criteriosamente estabelecidas, para a realização dos ensaios de permeabilidade, dentre os quais, o de perda d'água sob pressão. O resultado obtido foi editado e disponibilizado pelos autores para a ABGE difundir para todo o meio técnico brasileiro. Isso foi feito pela ABGE em 1975, quatro anos após o estabelecimento da estratégia de desenvolvimento tecnológico para o Brasil, pelo Agrupamento de Geologia Aplicada do IPT. Percebe-se assim, que o Boletim é fruto da determinação estratégica dos pesquisadores do IPT, quando se tem uma meta definida com objetividade: desenvolver e tornar o Brasil, no campo da construção das barragens, um país autônomo e tecnologicamente independente.

Segundo seus autores, o trabalho visava caracterizar o estado da arte da técnica do ensaio de perda d'água sob pressão, permitindo o seu uso como um manual e abrindo perspectivas para seu contínuo aprimoramento. Nesse sentido, evocava o meio técnico a emitir críticas e sugestões ao Boletim, de modo a mantê-lo sempre atualizado.

Passados 45 anos (2021), percebe-se que o Boletim ainda permanece bastante atual, o que justificaria, em parte, o não recebimento de nenhuma sugestão para a sua atualização ao longo de todo esse tempo.

Após um grande progresso teórico no estudo da percolação d'água em meios fissurados, ocorrido até meados da década de 1980, observa-se que, nas últimas duas décadas, foram introduzidas algumas modificações no modo de realização do ensaio de perda d'água sob pressão, denominado de Lugeon em quase todos os países do mundo. Tais alterações são decorrentes das

oportunidades oferecidas pelos avanços tecnológicos atuais, como: a possibilidade de uso de obturadores hidráulicos ou pneumáticos (simples e duplos), mais confiáveis que os tradicionais obturadores mecânicos (de cruzeta); o uso de transdutores de pressão, tanto no trecho do ensaio como acima e abaixo dele, permitindo, além de medidas de pressão efetiva realizadas diretamente no trecho ensaiado, a verificação do seu efetivo isolamento pelos obturadores; o uso de bombas do tipo centrífugas, helicoidais, ou semelhantes, que, ao contrário das bombas do tipo triplex, minimizam de modo significativo as variações das pressões e das vazões durante a realização dos ensaios; e a possibilidade de registrar os dados do ensaio (vazões e pressões efetivas) de modo contínuo, em tempo real, por meio do uso de sistemas de aquisição de dados.

Em conformidade com a tendência internacional (ISO 22282-3:2012, BS EN ISO 22282-3:2012; ASTM D4630-2019 e ISRM – 2019 in: Vaskou et al., 2019), a diretoria da ABGE, gestão 2021-2022, resolveu prover o meio técnico de um “Boletim de Ensaio de Perda d’Água sob Pressão” revisado e atualizado, visto que, atualmente, tal ensaio é realizado também para outros fins (mineração, obras subterrâneas etc.), extrapolando a sua finalidade primordial que foi a de verificar a estanqueidade de fundações de barragens e como ferramenta auxiliar no projeto e na previsão de absorções de cimento em cortinas de vedação. Essa tarefa, concluída e publicada em 2021 e base para a presente Norma, coube à comissão citada no item 10 – Principais Participantes.

A adoção das adaptações proporcionadas pelas novas tecnologias não altera o conceito original e nem a simplicidade do ensaio, mas apenas permite que seja possível usufruir dos benefícios que essas novas tecnologias proporcionam, incluindo a possibilidade de obtenção de novos parâmetros hidráulicos do meio nos quais os ensaios são realizados.

Por ser um manual para uso prático em escritório e no campo, agora reeditado na forma de Norma de entidade técnica-científica, tanto a edição de 2021, como a presente Norma, absteve-se de apresentar muitas referências bibliográficas ao longo do texto, visando torná-lo mais prático e dinâmico. Absteve-se, ainda, de discutir aspectos teórico-conceituais envolvidos no tema, pois todas as referências técnicas que o fundamentam estão apresentadas no item 11 – Referências/Leituras Recomendadas, sendo também suficientes para aqueles que desejarem se aprofundar no assunto.