



NORMA DA ASSOCIAÇÃO
BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE
ENGENHARIA E AMBIENTAL

NÚMERO DE REFERÊNCIA:
DIRETRIZ NORMATIVA
ABGE 111/2025
1ª Edição, 2025

**ENSAIO DE PERDA D'ÁGUA SOB
PRESSÃO EM FUROS PROFUNDOS**

Diretriz Normativa ABGE 111
1ª Edição, 2025

ABGE – AJUDANDO AS EMPRESAS A TRABALHAREM MELHOR



Copyright 2025. 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)

Guimarães, Alessandro Jésus
Diretriz normativa ABGE 111/2025 : ensaio de
perda d'água sob pressão em furos profundos /
Alessandro Jésus Guimarães. -- 1. ed. --
São Paulo : ABGE, 2025.

Vários colaboradores.
Bibliografia.
ISBN 978-65-88460-43-6

1. Investigação geológica 2. Investigações
geotécnicas 3. Normas técnicas I. Título.

25-268077

CDD-624.151
-624.15

Índices para catálogo sistemático:

1. Geologia de engenharia 624.151
2. Geotecnia 624.15

Aline Grazielle Benitez - Bibliotecária - CRB-1/3129

Sugestão de referência bibliográfica:

NORMA ABGE 111/2025: Ensaio de Perda D'água Sob Pressão em Furos Profundos.
Vários colaboradores. 1ª edição. São Paulo: ABGE, 2025.

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
1. INTRODUÇÃO	6
2. DEFINIÇÃO.....	7
3. FINALIDADE.....	8
4. CRITÉRIOS DE PRESSÃO.....	8
5. EQUIPAMENTO UTILIZADO.....	11
6. ENSAIO DE PERDA DE CARGA.....	17
7. PRÁTICA DO ENSAIO.....	18
7.2 Medida do nível d'água.....	19
7.3 Realização do ensaio.....	20
8. DETERMINAÇÃO DOS RESULTADOS	25
8.1 Cálculo da carga efetiva (Ce)	26
8.2 Cálculo da perda d'água específica (PE).....	27
8.3 Cálculo da condutividade hidráulica	28
9. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO TRECHO ENSAIADO.....	30
10. ESPECIFICAÇÕES DOS TRABALHOS E IMPORTÂNCIA DO REGIME LAMINAR.....	37
11. PADRONIZAÇÃO E DIGITALIZAÇÃO DE RESULTADOS.....	42
12. PRINCIPAIS PARTICIPANTES	43
13. REFERÊNCIAS DIRETRIZES NORMATIVAS E DIRETIVAS.....	43
14. REFERÊNCIAS/LEITURAS RECOMENDADAS	45

APRESENTAÇÃO

Essa Diretriz Normativa 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 Diretriz Normativa ABGE 111/2025 trata do **Ensaio de Perda D'água sob Pressão EPA**, realizado em furos de sondagens rotativas ou rotopercussivas profundos.

A presente Diretriz Normativa 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. Outra referência foi a NORMA 108/2024 que, inclusive, apontou para a necessidade de uma Diretriz Normativa específica para os ensaios EPA executados em furos de sondagem ou rotopercussivos com profundidades superiores a 30 metros. Os critérios e procedimentos metodológicos já foram testados e aprovados ao logo de mais de 45 anos de história de desenvolvimento da geotecnia brasileira, em especial da geologia de engenharia sendo que a necessidade desta Diretriz Normativa advém de impasses técnicos insanáveis em campo principalmente entre o fiscalizador e o prestador de serviços, pois o aumento na profundidade versus o rigor com que se exige manter os procedimentos e cálculos do texto principal embora a NORMA 108/2024 cite diversas vezes que mudanças podem ser adotadas na condução do ensaios EPA, estabelece a execução destes de modo que o resultado, final das campanhas, retornam dados inaceitáveis para os objetivos pretendidos pelo cliente e pelo consultor.

A exemplo da primeira rodada de Diretriz Normativas da ABGE publicadas em 2024 segue-se a itemização proposta de modo a manter o padrão que foi estabelecido com a introdução de tópico, que visa contemplar as tecnologias de digitalização, padronização e de modelagem geológico-geotécnica informatizadas.

A Diretriz Normativa ABGE possui formato próprio, mas semelhante ao publicado por entidades civis e associações técnicas e profissionais, nacionais ou estrangeiras como ABNT (Associação Brasileira de Diretriz Normativas 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 Diretrizes Normativas (Standards), Diretrizes (Guidelines), Boletins (Bulletins), Regras (Codes) e outros documentos assemelhados, com a finalidade de ajudar empresas e profissionais a trabalharem melhor.

As Diretrizes Normativas e as publicações técnicas editadas pelas entidades acima citadas, assim como a presente DIRETRIZ NORMATIVA ABGE, são de aceitação voluntária. A sua aplicação somente passará a ter caráter vinculante no plano legal/Diretriz Normativo, caso seja reconhecida e de alguma forma chancelada/acolhida pelo poder público (por exemplo, se a adoção de alguma DIRETRIZ NORMATIVA ABGE for exigida ou referida por algum dispositivo legal); e, no plano privado, caso seja mencionada em um contrato como Diretriz Normativa 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 Luiz Armelin

Editor

Erik Wunder

Presidente da ABGE – Gestão 2024-2026

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 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 Diretriz Normativa, é uma extensão do ensaio EPA proposto pela NORMA 108/2024, visando adequações obrigatórias para que o mesmo possa ser conduzido com sucesso.

Continuará sendo realizado em vários estágios de pressão e continuará dentro da proposta de sua execução, como um ensaio bastantes simples. Porém, devido à sua ampla utilização, nos dias atuais, na mineração e obras subterrâneas principalmente, passou a ser executado em profundidades superiores a 30 metros e isso exige, como exigiu no passado, ao ser adaptado para a obtenção de estimativa da permeabilidade dos maciços rochosos, que na atual demanda esta Diretriz Normativa venha a preencher as lacunas da execução do ensaio EPA que tem colocado em campos opostos a fiscalização e o prestador de serviços e muita vezes tornando a campanha de ensaio inexecutável ou mesmo, gerando dados que o cliente e o consultor se recusam a usar.

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 fissurais, 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 eliminar tanto em tempo real quanto por armazenagem com posterior descarregamento dos dados para a análise apropriada, 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 Diretrizes Normativas internacionais (*International Organization for Standardization-ISO; British Standard – BS EM ISO 222823:2012; 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 kgf/cm². 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 (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 fundações 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 fraturamento 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.

Para esta Diretriz Normativa, diferente do que preconiza NORMA 108/2024 serão executados no mínimo sete estágios 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.

Para o Ensaio de Perda D'água Sob Pressão em furos com profundidade superior a 30 metros conforme já mencionado acima, iremos adotar o mínimo de 7 estágios, com o seguinte critério para escolha das pressões de ensaio (a serem lidas no manômetro):

O ensaio será executado com um ciclo de 7 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/cm² (correspondente a 1 m de coluna d'água), pois o objetivo aqui é ter uma avaliação a baixíssima pressão na obtenção da estimativa da permeabilidade do maciço rochoso equivalente a um Ensaio de Infiltração à Carga Hidráulica Constante.

2º estágio: primeira pressão intermediária ascendente ($P_{\text{int. asc.}}$) – obtida a partir da pressão máxima do ensaio, conforme indicado podendo-se realizar arredondamento nos valores calculados.

$$P_{\text{int.asc.}} = \frac{P_{\text{máx}}}{4}$$

3º estágio: segunda pressão intermediária ascendente ($P_{\text{int. asc.}}$) – obtida a partir da pressão máxima do ensaio, conforme indicado podendo-se realizar arredondamento nos valores calculados.

$$P_{\text{int.asc.}} = \frac{P_{\text{máx}}}{2}$$

4º estágio: pressão máxima ($P_{\text{máx}}$) – que é obtida, quando se pretende alcançar com o ensaio EPA a tensão máxima de confinamento, aplicando

0,25 kgf/cm² por metro de profundidade do obturador. Ao passo que se o objetivo dos estudos é obter a estimativa de permeabilidade do maciço rochoso (**K**) recomenda-se aplicar de 0,068 a 0,115 kgf/cm² por metro de profundidade do obturador. Existe ainda recomendação de abater em 15% o valor da pressão máxima calculada a partir da profundidade de 100,00 metros e ensaios executados em altas profundidades fixam a pressão máxima no limite de 10kgf/cm², não importando a profundidade do obturador. Um exemplo seria um intervalo com ponto médio a 150,00 metros. Teríamos $150 * 0,068 = 10,2 \approx 10$ kgf/cm² a ser estabelecida como pressão máxima. Logo, $10,2 * 0,85 = 8,67 \approx 9,00$ kgf/cm² para a pressão máxima, considerando-se o abatimento de 15% conforme orienta o livro Guidelines for Open Pit Slope Design. Note que, em apenas 150,00 metros já se atinge a pressão máxima do trabalho pioneiro de Lugeon, 1933. Atualmente, não é incomum ensaios de EPA em profundidades superiores a do exemplo usado.

5º estágio: primeira pressão intermediária descendente ($P_{int. asc.}$) – obtida a partir da pressão máxima do ensaio, conforme indicado podendo-se realizar arredondamento nos valores calculados.

$$P_{int.asc.} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{2}$$

6º estágio: segunda pressão intermediária descendente ($P_{int. asc.}$) – obtida a partir da pressão máxima do ensaio, conforme indicado podendo-se realizar arredondamento nos valores calculados.

$$P_{int.asc.} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{4}$$

7º estágio: pressão mínima (P_{min}) – adota-se como mínima a pressão de 0,10 kgf/cm², considerada como estágio de pressão final do ensaio

A adoção destes novos critérios para a determinação da pressão máxima é um dos motivos pelo qual a DIRETRIZ NORMATIVA 111/2025 se

faz necessária uma vez que os ensaios EPA que ora vem sendo executados em profundidades superiores a 30,00 metros, não pode mais se basear na densidade média dos maciços rochosos, da ordem de 2,7 t/m³ conforme a NORMA 108/2024 que adota fator de 0,25 kgf/cm² por metro de profundidade do obturador (em cota), se objetivo é determinar estimativa de permeabilidade do maciço rochoso.

Esta Diretriz Normativa torna obrigatório o emprego do transdutor de pressão que possibilita a leitura da pressão efetiva diretamente no trecho do ensaio sendo que as configurações para emprego de transdutor de pressão acima do obturador ou abaixo do segundo obturador (configuração de obturador duplo) podem ser solicitados pela fiscalização desde que prevista a sua aplicação na especificação técnica para a realização do ensaio e tem o objetivo de verificar a estanqueidade da(s) borracha(s) inflada(s) para o 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 fraturamento do maciço etc.

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 serem 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

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 140L/min a uma pressão de 15 Kgf/cm² (≈1,5Mpa). 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 filtração 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 em relação ao fundo de escala 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. A presente Diretriz Normativa proíbe o uso de obturadores de compressão mecânica e pressão pneumática com aplicação de gás ou ar comprimido, devendo-se adotar os modernos obturadores de expansão hidráulica e também os pneumáticos mas com a expansão deste, utilizando apenas água que é incompressível. 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 1,00 metro, 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.

Essa Diretriz Normativa estabelece que o ensaio EPA tem que, obrigatoriamente, ser executado com pelo menos um transdutor de pressão instalado no trecho de ensaio determinado. Assim, a montagem do equipamento utilizado para realização do ensaio com o uso de sistema digital para aquisição dos dados é apresentado de modo esquemático na Figura 1 e Figura 2.

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:

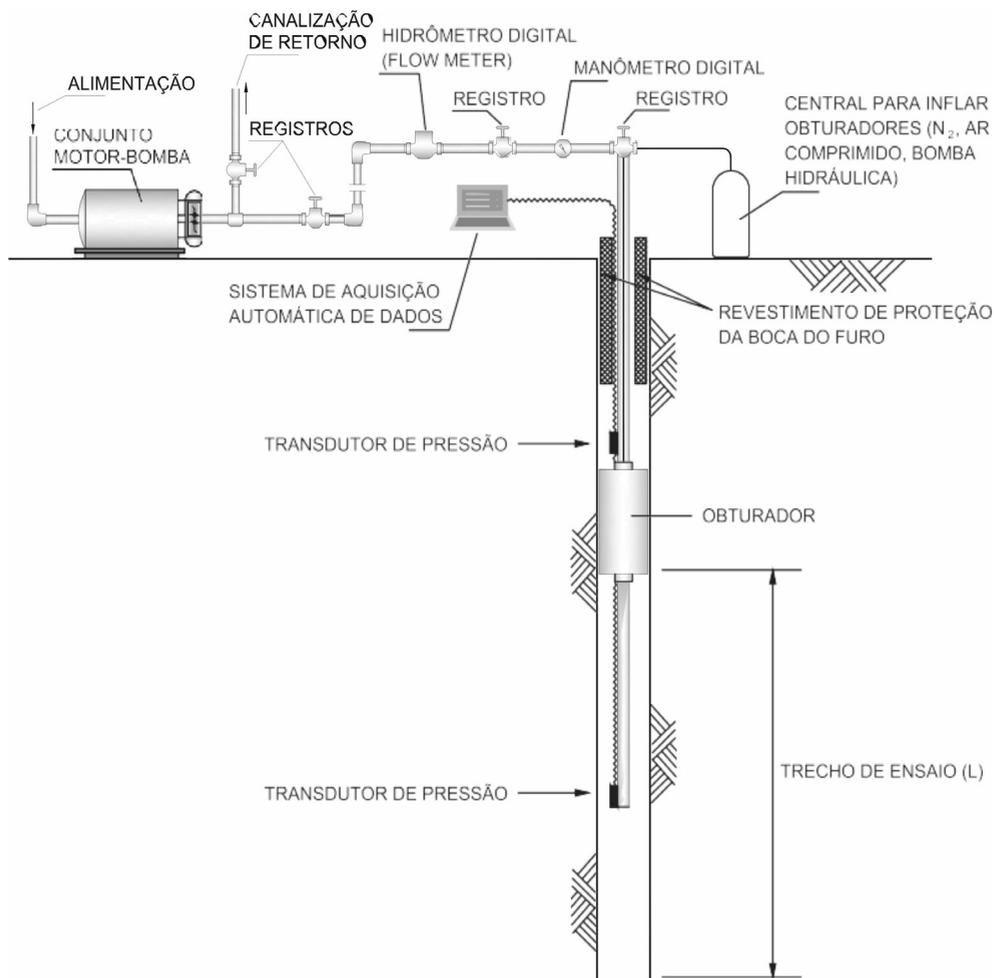


Figura 1 – Montagem típica de equipamento para realização do ensaio de perda d'água sob pressão, com uso de obturadores simples e sistema digital para aquisição automática de dados de absorção e pressão (modificado de Vaskou et al., 2019)

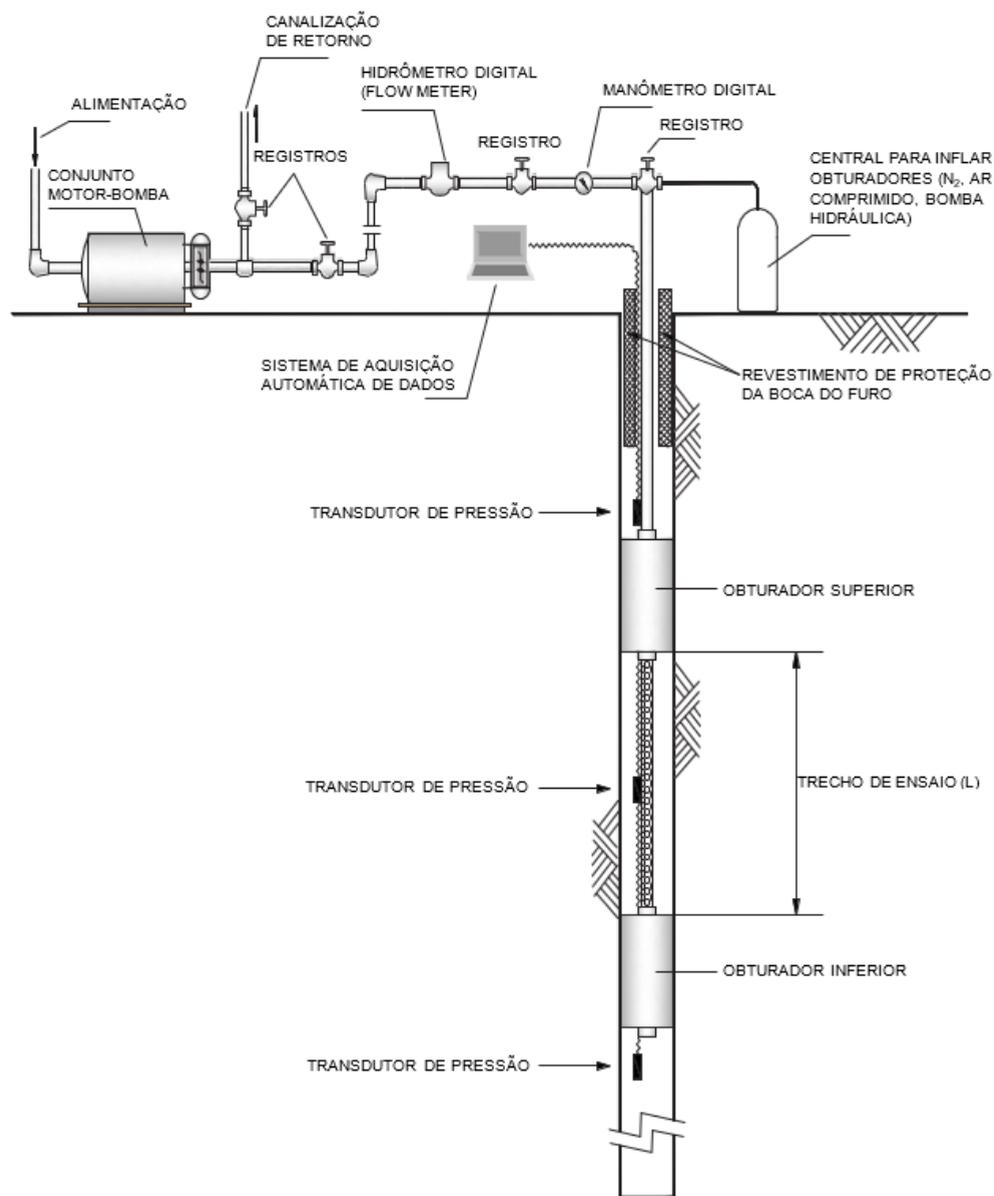


Figura 2 – Montagem típica de equipamento para realização do ensaio de perda d'água sob pressão, com uso de obturador duplo e sistema digital para aquisição automática de dados de absorção e pressão (modificado de Vaskou et al., 2019).

- *Hidrômetros digitais (flow meter, fluxômetrosopcional)*: 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/cm² (≈2,5 Mpa), para conexão dos equipamentos em superfície com o trecho do ensaio.
- *Obturador*: é vedada a utilização de gases ou ar comprimido nos obturadores, devendo-se adotar água. Fica vedada também a utilização de obturador por expansão mecânica. O usual é a realizar o ensaio com os obturadores de acionamento pneumático ou hidráulico (onde o fluido de expansão a ser aplicado deve ser obrigatória a água, pois a mesma é incompressível ao passo que ar-comprimido e outros gases não o são e prejudicam o ensaio para as altas profundidades), com comprimento mínimo da ordem de 10 vezes o diâmetro da perfuração, não sendo recomendável que seja menor do que 1,00 metro.
- *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.
Os transdutores de pressão para o controle da pressão acima e abaixo do trecho ensaiado, podem ser exigidos pela fiscalização observado se a especificação técnica do ensaio prevê a sua aplicação.
- *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 que infla os obturadores.

- *Cilindros de gás*: é vedado o uso de nitrogênio (N_2) ou ar comprimido para inflar os obturadores que se destinam a executar ensaios EPA em conformidade com a presente Diretriz Normativa. A justificativa técnica advém dos modernos obturadores de acionamento pneumático e hidráulico que proporcionam o efeito da vedação dinâmica dado que a água é incompressível e em profundidade superiores a 30 metros onde as pressões para a execução do ensaio se tornam maiores, o ar-comprimido e gases que são normalmente utilizados para inflar as borrachas (no caso, o mais comum é o N_2) não oferecem a estanqueidade, pois são compressíveis.
- *Sistema para aquisição para leitura em tempo real ou gravação com posterior descarregamento dos dados*: constituído por sistema de armazenagem de dados, placas de conversão A/D, cabos de transmissão de dados dos transdutores e ou das absorções.
- *Válvula de pé*: necessária para desinflar os obturadores e recomenda-se que sejam adotados os obturadores que possuem sistema de emergência (último recurso de liberação do obturador de acionamento hidráulico).

6 ENSAIO DE PERDA DE CARGA

A presente Diretriz Normativa tem por objetivo eliminar por completo a necessidade do ensaio de perda de carga uma vez que a partir de 30,00 metros de profundidade, seguir as recomendações da NORMA 108/2024 torna a metodologia indicada impraticável em campo, dado que as condições requeridas para que a composição seja montada em superfície é de difícil execução (composições de cinquenta , oitenta ou mesmo cem metros ou mais esticadas e perfeitamente niveladas em campo).

Assim, essa Diretriz Normativa é um convite a que o cliente, fiscalizador, executor e projetista desenvolvam interesse pelas inovações tecnológicas

que permitem executar ensaios EPA com maior facilidade na aquisição dos dados e segurança para as operações. A questão do transdutor de pressão é um exemplo. Conhecida e citada já no Boletim N°2 da ABGE de 1975, essa solução, em conjunto com a evolução tecnológica dos atuais sistemas obturadores vem para contribuir e melhorar os procedimentos da prática do ensaio em face das novas demandas para a sua execução.

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 centro do trecho ensaiado. 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. Apesar 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.

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 apresentada na Figura 2.

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 1,00 metro, 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:

7.2 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, mesmo que sejam utilizados transdutores de pressão. Os transdutores de pressão, quando empregados 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 paralisação 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.

A vantagem de se utilizar os transdutores de pressão elimina por completo as dificuldades que a tomada de medidas no NA apresenta para os meios fissurados.

7.3 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 apenas por

- ação hidráulica. Obturadores por acionamento hidráulico, conforme já explicado, 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 podem trazer dificuldades para a sua contração, quando usado(s) em furos muito profundos, com altas cargas hidráulicas a que pode(m) estar(em) submetido(s).
 - » 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).
- 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 1,00 metro 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 (primeira intermediária ascendente, segunda intermediária ascendente, máxima, primeira intermediária descendente, segunda intermediária descendente e mínima igual a 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). Como o ensaio EPA proposto nesta Diretriz Normativa serão realizados com o uso de sistemas digitais para aquisição de dados em tempo real ou armazenados para posterior descarregamento, os procedimentos são semelhantes, destacando-se, no entanto, que os ensaios jamais devem ser interrompidos, pois mesmo nas situações 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 5).

OBRA _____ EXECUTORA _____	
SONDAGEM _____	INÍCIO _____ TÉRMINO _____
DIÂMETRO DO FURO (mm) _____	COTA DA BOCA (m) _____
COTA DO FUNDO (m) _____	INCLINAÇÃO COM A VERTICAL (°) _____
PROFUNDIDADE _____	Nº DE ENSAIOS _____ LOCAL _____
LOCALIZAÇÃO _____	

DATA E HORA	PROF. DO FURO (m)	PROF. DO N.A. (m)		Nº, TIPO, TESTE DE VAZÃO, ETC.
			BOMBA	
			MANÔMETRO	Nº, LEIT. MAX., DIV. DE ESCALA, DATA DE AFERIÇÃO, ETC.
			HIDRÔMETRO	Nº, TIPO, DATA DE AFERIÇÃO, ETC.
			OBTURADOR	TIPO, ETC.
				CANALIZAÇÃO
			OBSERVAÇÕES	
FISCAL. DATA	VERIF. DATA	RESP. DATA	SONDAGEM Nº	

Figura 3 – Exemplo de tabela para acompanhamento dos ensaios de perda d’água sob pressão com aquisição analógica de dados (Oliveira et al., 1975).

SONDAGEM n°		ENSAIO DE PERDA D'ÁGUA SOB PRESSÃO												
ENSAIO n°	Profundidade do Obturador (m)				Comprimento do Trecho de Ensaio (m)	ϕ do furo (m)	ϕ 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/cm ²)	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/cm ²)	Coluna d'água (kgf/cm ²)	Perda de Carga Distribuída (kgf/cm ²)			Perda de Carga Localizada (kgf/cm ²)	Carga Efetiva (kgf/cm ²)
	1	2	3	4	5									
6	7	8	9	10										

*PE em [(L/min/m)/(kgf/cm²)]

Figura 4 – 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).

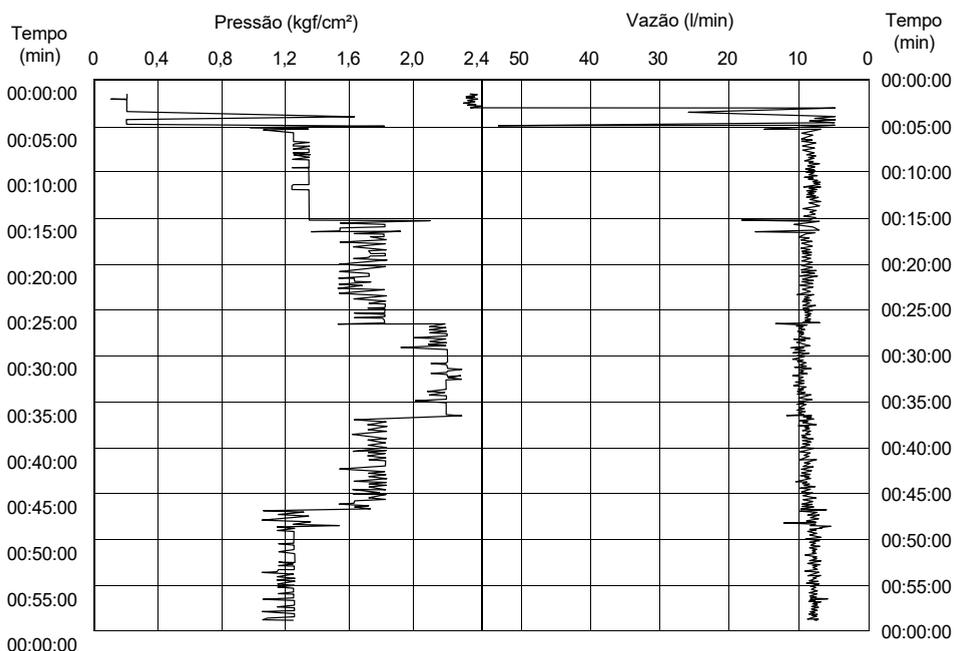


Figura 5 – Exemplo de ensaios de perda d’água sob pressão com aquisição automática de dados (modificado de BS EN ISO 22282-3:2012, 2012).

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 condutividade hidráulica 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)

Esta Diretriz Normativa manterá obrigatório o cálculo da carga efetiva para o trecho do ensaio EPA a ser devidamente registrada em tabela de campo. É necessário realizar uma série de medidas no campo, conforme indicado na Figura 6, para os cálculos que se seguem aos ensaios, tanto para aqueles realizados acima como abaixo do nível d'água.

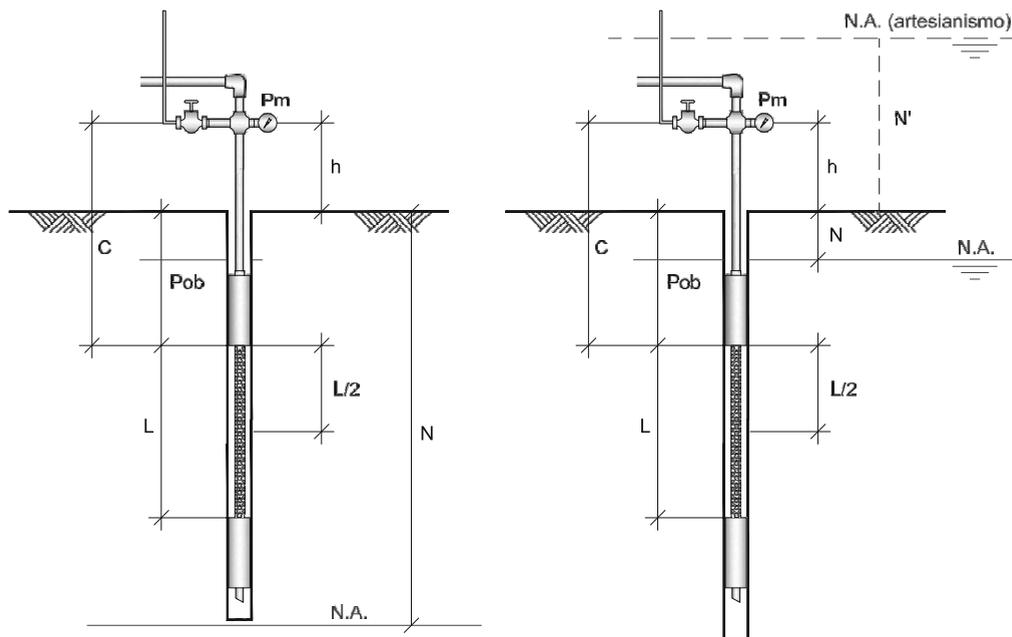


Figura 6 – Parâmetros necessários para o cálculo da carga efetiva em ensaios realizados acima e abaixo do nível d'água, para obturadores simples ou duplos (Oliveira et al., 1975).

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/cm²)

P_c = perda de carga distribuída na canalização (kgf/cm²)

P_L = perda de carga localizada (kgf/cm²)

A carga efetiva (C_e) para o caso de obturadores simples (*Equação 1*):

$$C_e = \frac{H}{10^+} P_m - P_c \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (\text{Equação 1})$$

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 2*

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

Para os casos de ensaios em que o trecho ensaiado está abaixo do NA, deve-se utilizar a *Equação 3*

$$H = h + N \quad (\text{m}) \quad (\text{Equação 3})$$

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

$$H = -N' + h \quad (\text{m}) \quad (\text{Equação 4})$$

8.2 Cálculo da perda d'água específica (PE)

A perda d'água específica (PE) é dada pela *Equação 5*:

$$PE = \frac{Q_E}{C_e} [(L/\text{min}/\text{m})/(\text{kgf}/\text{cm}^2)] \quad (\text{Equação 5})$$

Onde,

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

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 6*, sem limitações e sem adaptações.

$$K = \frac{Q}{2\pi HL} * Cf \quad (\text{Equação 6})$$

onde o coeficiente de forma, Cf , adimensional, é definido conforme a *Equação 7*:

$$Cf = \text{Ln} \left[0,66 \frac{L}{d/2} \right] \quad (\text{Equação 7})$$

sendo

K = condutividade hidráulica (m/s)

Q = vazão em (m^3/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/cm²)], e para um resultado de K , em cm/s, tem-se (Equação 8):

$$K = PE * \frac{1,66}{2\pi} * 10^{-4} * Cf \quad \text{(Equação 8)}$$

Onde,

PE = Perda d'água específica (L/min/m)/(kgf/cm²)

K = condutividade hidráulica (cm/s) Considerando-se:

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

tem-se:

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

Para facilitar o acompanhamento do ensaio, a Figura 4 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 7 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 4,00 metros.

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.

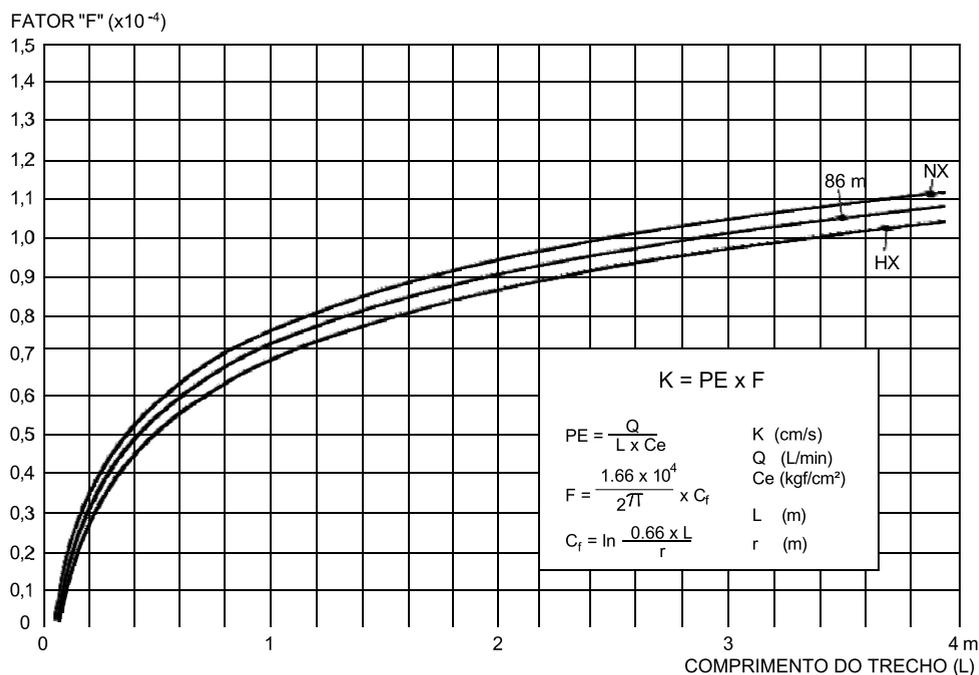


Figura 7 – Ábaco para determinação do fator F para os diâmetros NX, 86 mm, HX e comprimento dos trechos de ensaio de até 4 m (Oliveira et al., 1975).

A utilização do termo “condutividade hidráulica” em vez de “permeabilidade” ou “coeficiente de permeabilidade” é o mais adequado, conforme comentado nessa Diretriz Normativa 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 descontinuidades 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 descontinuidades (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

descontinuidades, 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 fraturamento hidráulico do maciço rochoso.
- *Preenchimento das descontinuidades*: 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 descontinuidades isoladas, não persistentes;
 2. expansão de argilominerais presentes em descontinuidades, quando expostos à presença da água;
 3. carreamento progressivo de finos para as descontinuidades, 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 8).

Para a construção da Figura 8, 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

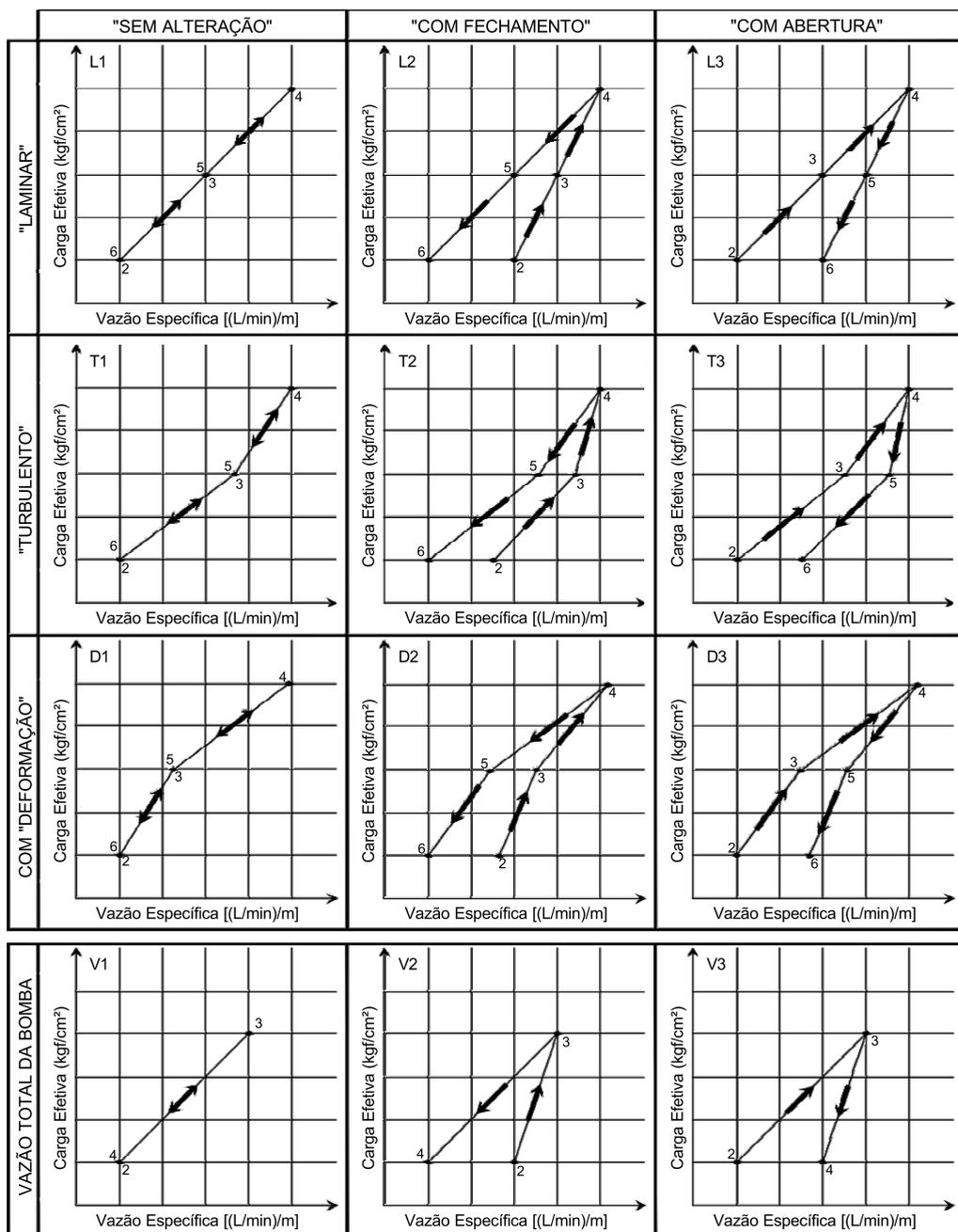
comportamentos das descontinuidades (sem alteração, com fechamento e com abertura), constituindo-se em uma orientação para analisar o comportamento dos fluxos d'água durante os ensaios, principalmente por se considerar que, usualmente, o número de estágios de pressão aplicados nos ensaios de rotina é 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 8). Para todos os demais casos sugere-se adotar os valores do primeiro estágio de pressão. Nesta Diretriz Normativa como estamos adotando 7 estágios sendo que o 1º e o 7º estágios permanecem com o valor 0,1 Kgf/cm², para manter a coerência e facilitar a análise foram mantidos 5 estágios plotados na Figura 8 representados pelos estágios 2, 3,4,5 e 6.

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 9 apresentam os resultados de ensaios de perda d'água realizados com sete 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 metros, 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 222823:2012, 2012).



As setas indicam os sucessivos estágios (2, 3, 4, 5 e 6) das pressões aplicadas. Estágios 1 e 7 não participam da análise.

Figura 8 – Comportamentos típicos observados nos ensaios de perda d'água sob pressão (modificado de Oliveira et al., 1975).

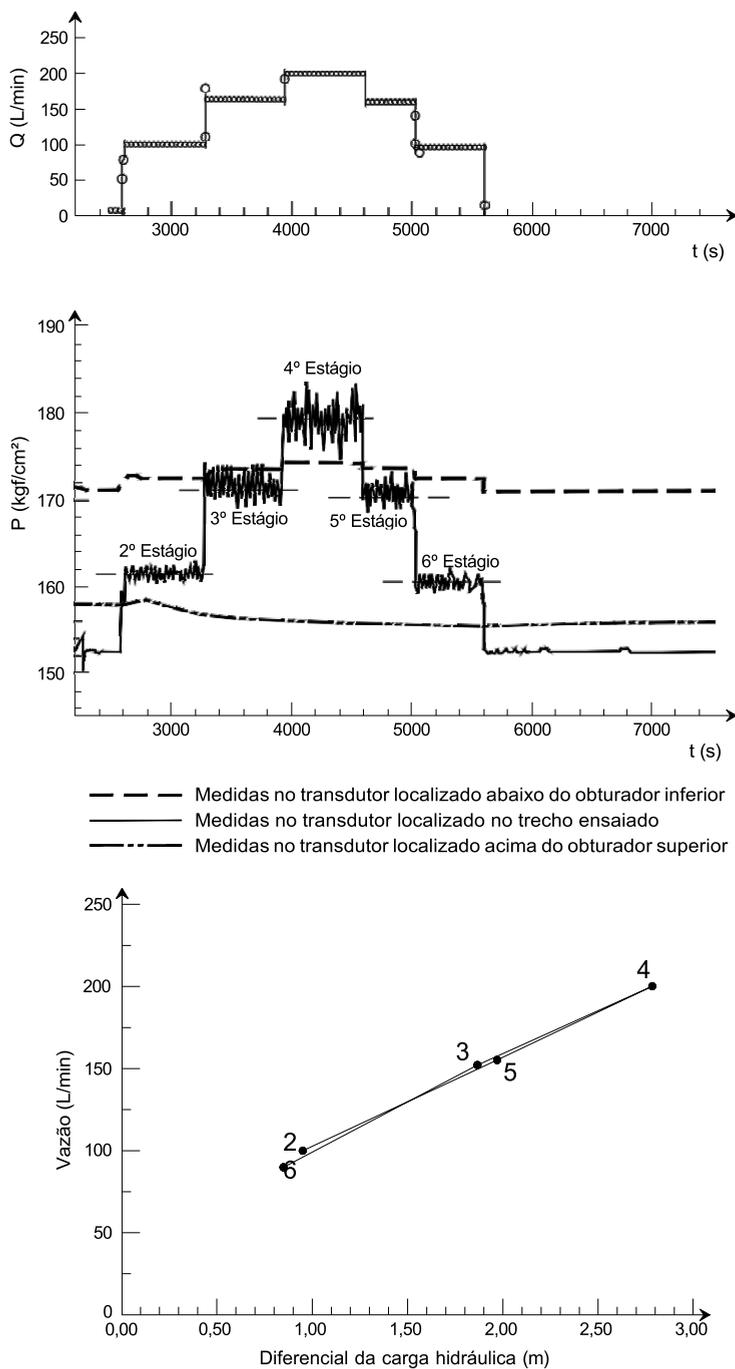


Figura 9 – Resultados de ensaios de perda d'água sob pressão obtidos em rocha muito fraturada utilizando aquisição automática de dados (modificado de BS EN ISO 22282-3:2012, 2012).

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	Δh (m)	Vazão (L/min)	PAE (L/min/m/kgf/cm ²)	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 0,10 metro (100 mm) de abertura, o resultado do ensaio será diferente se o trecho de ensaio tiver 0,10, 1,00 ou 10,00 metros de comprimento, sendo impermeável o restante do trecho de ensaio. A condutividade hidráulica relativa é 1,0 se o trecho de ensaio for de 0,10 metro, 0,10 para trecho de ensaio de 1,00 metro e 0,01 para ensaios realizados em trechos com 10,00 metros de comprimento (BS EN ISO 22282-3:2012, 2012).

A Figura 10 ilustra a importância do comprimento do trecho na definição da perda d'água específica.

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

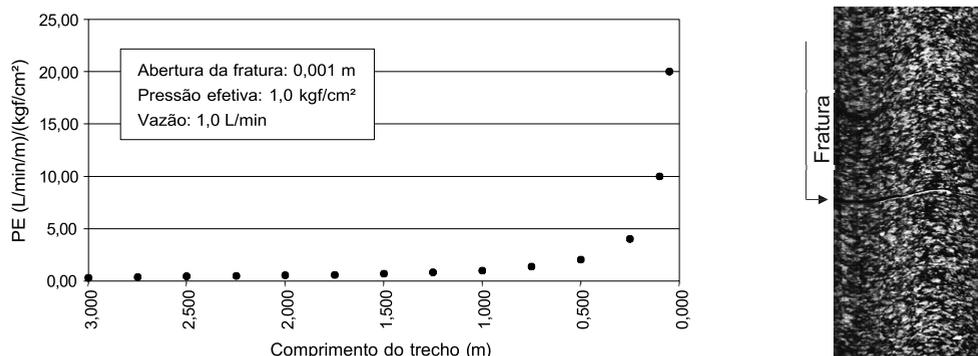


Figura 10 – Variação da Perda de Água Específica com a diminuição da extensão do trecho do ensaio em um maciço rochoso pouco fraturado, conforme ilustração à direita.

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 de água sob pressão, fica a cargo de profissional legalmente habilitado, que terá a incumbência de cotejar e harmonizar da melhor maneira possível a presente Diretriz Normativa 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 1,00 metro. Por outro lado, trechos superiores a 6,00 metros 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 fraturamentos, topografia etc.), considera-se plausível a execução de ensaios 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 da 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 11), bem como em ensaios realizados no campo, em fundações de barragens (Figura 12 e Figura 13).

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 12 e Figura 13).

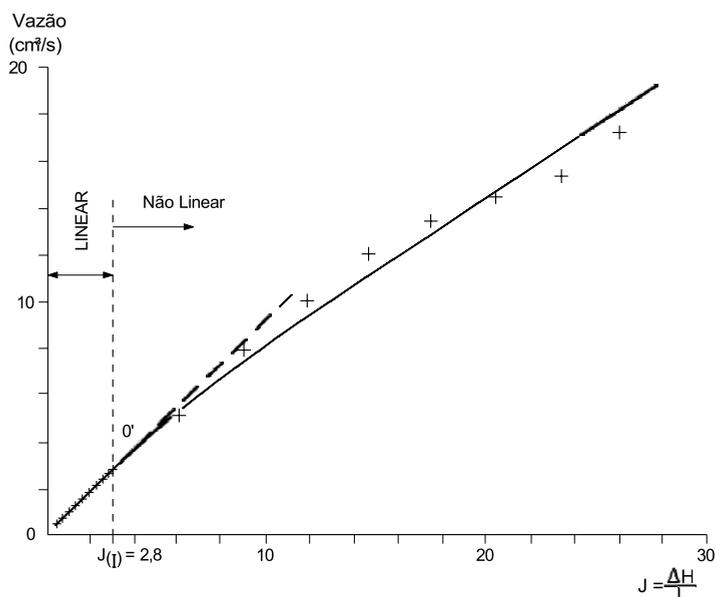


Figura 11 – Relação entre vazão e gradiente. Resultados obtidos em ensaios e laboratório (Quadros, 1982).

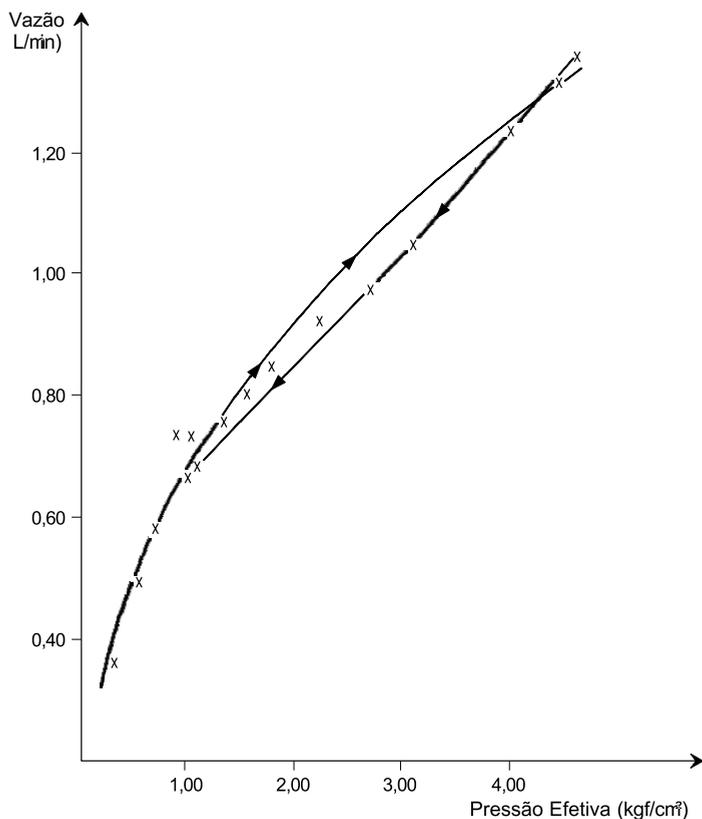


Figura 12 – Relação entre vazão e gradiente em ensaios de infiltração realizados em múltiplos estágios nas fundações da barragem de Nova Avanhandava (Cruz et al., 1982).

Quando as condições de fluxo laminar não forem alcançadas, sugere-se, que seja adotado o valor obtido no primeiro estágio que sempre é executado com pressão inicial de 0,1 Kgf/cm².

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 Diretriz Normativa 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.

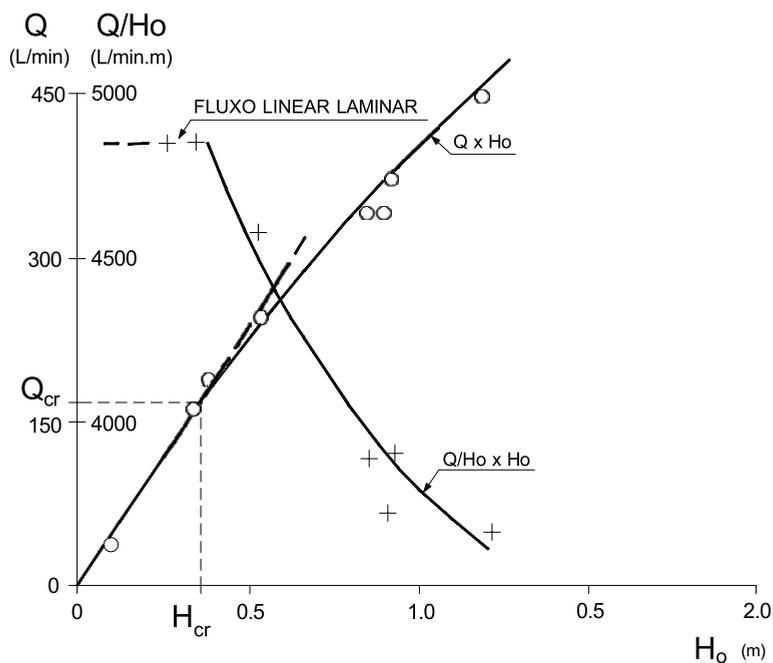
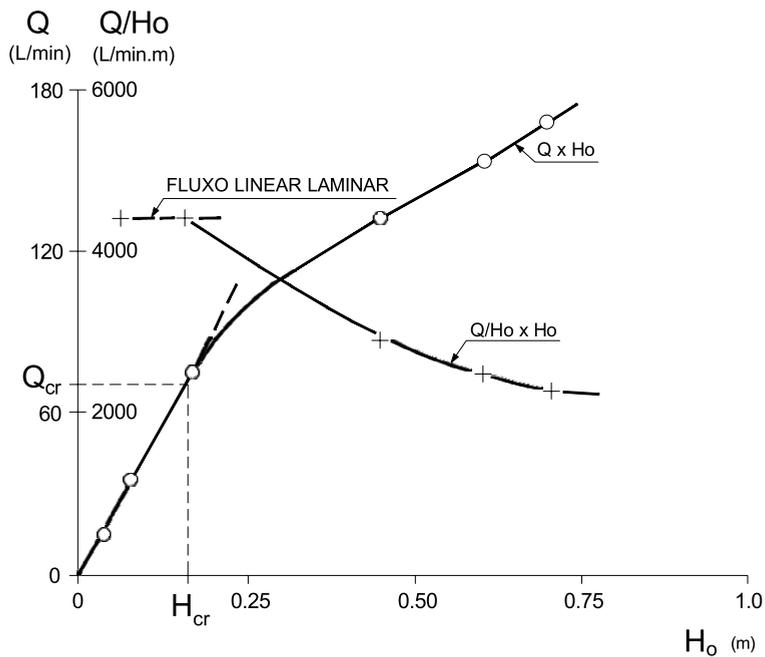


Figura 13 – Ensaios de infiltração (acima) e de descarga (abaixo) realizados em múltiplos estágios nas fundações da barragem de Taquaruçu (Azevedo, 1993).

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 condutividade hidráulica 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 condutividade hidráulica 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 DIRETRIZ NORMATIVA 111/2025 – Ensaio de perda d’água sob pressão em furos profundos”, 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 14 apresenta modelo de classificação da condutividade hidráulica/permeabilidade utilizada na padronização, digitalização de resultados e modelagem geológico-geotécnica.

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

Correlação aproximada entre PE e K.

Figura 14 – Classificação de condutividade hidráulica/permeabilidade

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

12 PRINCIPAIS PARTICIPANTES

Editor: João Luiz Armelin

Revisor(es): João Luiz Armelin

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.

13 REFERÊNCIAS DIRETRIZES NORMATIVAS E DIRETIVAS

É importante que os usuários das informações dessa publicação a co-temem 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.

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.

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.

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.

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.

Diretriz Normativa ABGE 104/2023 – **Sondagem rotativa e mista**. São Paulo: ABGE. Vários colaboradores. Disponível em www.abge.org.br

Diretriz Normativa ABGE 108/2024 – **Ensaio de perda d'água sob pressão**. Vários colaboradores. São Paulo: ABGE. Disponível em www.abge.org.br

Diretriz Normativa ABGE 109/2024 – **Descrição e classificação de sondagens**. Vários colaboradores. São Paulo: ABGE. Disponível em 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 DIRETRIZES NORMATIVAS 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.

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.

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.

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.

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'ingenieur et reconnaissance des sols**. Éditions Eyrolles. 345p.

CRUZ, P. T.; QUADROS, E.F.; CORRES Fº, D.; MARRANO, A. (1982). Evaluation of opening and hydraulic conductivity of rock discontinuities. 23º 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

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.

READ, JOHN & STACEY, PETER (2022). **Guia para projetos de taludes de minas a céu aberto = Guidelines for open pit slope design**. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental – 1ª ed. – São Paulo: ABGE, 2022.

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.usdams.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>.