

Análise do comportamento de maciços rochosos com base em ensaios de perda d'água executados no Quadrilátero Ferrífero (MG)

Arthur Hideo Pereira Toyoshima

Geólogo, Chammas Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, arthur.toyoshima@chammas.com.br

Caroline Campos Soares

Geóloga, Chammas Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, caroline.soares@chammas.com.br

Giovani Cecatto Lopes Ribeiro da Costa

Engenheiro Civil, Chammas Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, giovani.costa@chammas.com.br

RESUMO: Os ensaios de perda d'água são investigações geotécnicas que fornecem informações sobre a condutividade hidráulica de um maciço rochoso. O método de execução consiste na injeção de água sob pressão em um trecho isolado do maciço rochoso, por meio de um furo de sondagem, em cinco estágios de pressão efetiva (mínimo, intermediário, máximo, intermediário e mínimo), e medir o volume de água absorvido. Porém, o coeficiente de permeabilidade não é o único dado obtido no ensaio de perda d'água. Houslby (1976) propôs um estudo do comportamento do trecho ensaiado baseado na análise de gráficos de pressão efetiva *versus* vazão específica. O autor classificou os diferentes comportamentos observados em cinco grupos distintos: fluxo laminar, fluxo turbulento, deformação das descontinuidades, lavagem e preenchimento das descontinuidades. O presente estudo teve como objetivo aplicar a classificação proposta por Houslby (1976) em 108 ensaios de perda d'água, realizados no contexto da província geológica do Quadrilátero Ferrífero (MG). Os resultados mostraram que os comportamentos mais comuns foram a ausência de absorção de água, fluxo turbulento e lavagem das descontinuidades.

PALAVRAS-CHAVE: Ensaio de Perda d'Água, Coeficiente de Permeabilidade, Maciço Rochoso, Condutividade Hidráulica, Quadrilátero Ferrífero.

ABSTRACT: Water Pressure Tests, also known as Lugeon Tests, are geotechnical investigations that provide information of rock-masses hydraulic conductivity. The execution method consists of injecting water into the isolated portion of the rock mass through a borehole, using five different pressure steps (minimum, medium, maximum, medium, and minimum), as the water volume absorbed is measured. However, the hydraulic conductivity is not the only data provided by the test. Houslby (1976) proposed a behavior analysis of isolated boreholes portions in which the tests are executed, based on average flow rate versus pressure diagram interpretation. The author classified those patterns into five different behaviors: laminar flow, turbulent flow, dilation, wash-out and void filling. The present study intends to apply the classification proposed by Houslby (1976) to analyze 108 different Water Pressure Tests results, executed at Quadrilátero Ferrífero (MG) geological province. The results show that most of the tests did not present any water absorption. Furthermore, the most common behaviors are turbulent flow and wash-out.

KEYWORDS: Water Pressure Test, Permeability Coefficient, Rock Mass, Hydraulic Conductivity, "Quadrilátero Ferrífero".

1 INTRODUÇÃO

Os ensaios de perda d'água sob pressão são realizados em maciços rochosos por meio de furos de sondagens, com o objetivo de estimar a condutividade hidráulica média equivalente e o comportamento dos maciços rochosos frente à percolação da água através de suas fissuras (ABGE, 2020). Os resultados permitem

estimar as propriedades hidráulicas, além de verificar comportamentos geomecânicos, como de deformações que o maciço rochoso pode vir a sofrer durante a execução do ensaio (ABGE, 2020).

O método executivo consiste em injetar água sob pressão em um determinado intervalo de profundidade do furo de sondagem, isolado por obturadores, medindo-se a absorção d'água pelo maciço ao longo do tempo. O ensaio é dividido em 5 estágios de pressão, medidos em kgf/cm^2 : pressão mínima, intermediária, máxima, intermediária e mínima. As pressões em cada estágio deverão obedecer aos seguintes critérios: pressão máxima de $0,25 \text{ kgf/cm}^2$ ou $0,15 \text{ kgf/cm}^2$ na vertical, considerando na boca do furo até a metade do trecho ensaiado ou profundidade do obturador (a depender da especificação do cliente); pressão intermediária igual à metade da pressão máxima, e; pressão mínima equivalente a um metro de coluna d'água acima da boca do furo ($0,10 \text{ kgf/cm}^2$). As pressões máximas e intermediárias deverão ter seus valores arredondados até a divisão mais próximas do manômetro.

A análise do comportamento do trecho ensaiado é realizada por meio de gráficos que relacionam a pressão 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 (ABGE, 2020).

A atual prática de interpretação dos ensaios de perda d'água é derivada principalmente do trabalho realizado por Houlby (1976). Em seu trabalho, voltado para o estabelecimento de requisitos de cimentação, Houlby (1990) propôs que valores representativos de permeabilidade devem ser selecionados com base no comportamento observado nos valores de Lugeon calculados para os diferentes estágios de pressão. Houlby (1976) classificou os comportamentos típicos observados na prática em cinco grupos diferentes, como se segue: fluxo laminar, fluxo turbulento, deformação, remoção do preenchimento e preenchimento das descontinuidades.

O presente trabalho tem como objetivo analisar o comportamento dos maciços rochosos baseados nos ensaios de perda d'água realizados no Quadrilátero Ferrífero, localizado no estado de Minas Gerais, Brasil. Com essa análise será capaz de observar possíveis tendências de comportamentos dos maciços quando submetidos a diferentes pressões aplicadas e com isso, auxiliar em pré-avaliações de projetos de engenharia, como as barragens.

2 GEOLOGIA REGIONAL

Regionalmente, a área de estudo em questão encontra-se situada no contexto do Quadrilátero Ferrífero. Ocupando uma área aproximada de 7.000 km^2 na porção centro-sudeste do estado de Minas Gerais, o Quadrilátero Ferrífero é internacionalmente reconhecido como um importante terreno pré-cambriano com significativos recursos minerais, em especial ouro e ferro (CPRM, 2012). A geologia do Quadrilátero Ferrífero compreende uma sequência de *greenstone belt* arqueana, representado pelo Supergrupo Rio das Velhas, cercada por terrenos granito-gnaissicos arqueanos, que são sobrepostos por uma sucessão de rochas sedimentares de idade paleoproterozoica, o Supergrupo Minas (CPRM, 2012).

3 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS TRECHOS ENSAIADOS

A análise do comportamento do trecho ensaiado é realizada por meio de gráficos que relacionam a pressão 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. De mesmo modo, permitem avaliação da condutividade hidráulica do maciço rochoso no trecho ensaiado, avaliar a necessidade de tratamento de fundações de barragem, ou ainda, avaliar a eficiência destes tratamentos (ABGE, 2020).

A atual prática de interpretação dos ensaios de perda d'água, apresentada pela ABGE (2020) e modificada de Oliveira *et al.* (1975) deriva principalmente dos trabalhos realizados por Houlby (1976; 1990). Em seu estudo, voltado para o estabelecimento de requisitos de cimentação, Houlby (1990) propôs que valores representativos de permeabilidade devem ser selecionados com base no comportamento observado nos valores de Lugeon calculados para os diferentes estágios de pressão. Houlby (1976) classificou os comportamentos típicos observados na prática em cinco grupos diferentes, como se segue.

3.1 Fluxo Laminar

Ocorre quando há uma relação linear entre as vazões específicas e as pressões efetivas, indicando que a condutividade hidráulica do maciço rochoso ensaiado independe da pressão efetiva aplicada. É um comportamento observado quando as velocidades de infiltração são relativamente baixas, frequentemente obtidas com utilização de pressões efetivas baixas.

3.2 Regime Turbulento

Ocorre quando não é observada linearidade entre as vazões específicas e as pressões efetivas aplicadas, podendo ser decorrente 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 nos quais as descontinuidades encontram-se parcialmente abertas.

3.3 Deformação das Descontinuidades

Presente nas situações em que a pressão aplicada é maior do que a tensão principal mínima atuante no maciço rochoso, o que pode causar uma deformação temporária das descontinuidades. Este comportamento também pode ser observado nos estágios de média pressão, quando a pressão da água aplicada é superior à tensão principal mínima do maciço rochoso, provocando assim uma dilatação temporária das fissuras no interior do maciço. A dilatação causa um aumento na área da seção transversal disponível para o fluxo de água e, desse modo, aumenta a permeabilidade.

3.4 Remoção do Preenchimento

Nos casos em que se observa um aumento progressivo da vazão específica com o desenvolvimento do ensaio, independentemente do estágio de pressão, há a formação deste padrão. Este comportamento indica que a infiltração induz danos permanentes e irreversíveis ao maciço rochoso, geralmente devido a presença de preenchimentos e/ou movimentos permanentes da rocha.

3.5 Preenchimento de Vazios

A permeabilidade diminui à medida que o teste avança, independentemente das mudanças observadas na pressão da água. Esse comportamento pode indicar três cenários: 1) a água preenche progressivamente as descontinuidades isoladas/não persistentes; 2) a expansão de argilominerais presentes nas descontinuidades, quando expostos à presença de água; 3) o carreamento progressivo de finos para as descontinuidades, preenchendo-as e obstruindo o fluxo de água.

4 RESULTADOS

Foram analisados 108 ensaios de perda d'água, realizados em 9 complexos diferentes, dentro do contexto da província geológica do Quadrilátero Ferrífero (MG). Os trechos dos diferentes maciços rochosos abrangeram diferentes litotipos, sendo estes: gnaisses, filito, xisto, itabirito, anfíbolitos e rochas metabásicas. Aos resultados obtidos, aplicou-se a classificação proposta por Oliveira *et al.* (1975). Os resultados podem ser visualizados na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1. Comportamentos dos ensaios de acordo com Oliveira *et al.* (1975).

Comportamento	Total	%
Sem absorção	70	65%
Deformação da descontinuidade com abertura	9	8%
Fluxo turbulento com fechamento	7	6%
Fluxo turbulento com abertura	7	6%
Deformação da descontinuidade com fechamento	5	5%
Deformação da descontinuidade sem alteração	3	3%

Comportamento	Total	%
Vazão total da bomba com fechamento	3	3%
Fluxo laminar sem alteração	2	2%
Fluxo laminar com abertura	1	1%
Vazão total da bomba sem alteração	1	1%
Fluxo laminar com fechamento	0	0%
Fluxo turbulento sem alteração	0	0%
Vazão total da bomba com abertura	0	0%

Com os resultados obtidos, observa-se que em 65% dos ensaios realizados (70 ensaios) não houve absorção de água. Ademais, em 8% (9 ensaios) o comportamento observado foi classificado como deformação da descontinuidade com abertura e em 6% (7 ensaios), como fluxo turbulento com fechamento e fluxo turbulento com abertura. A Figura 1 abaixo ilustra o quantitativo observado para cada comportamento presente nos ensaios.

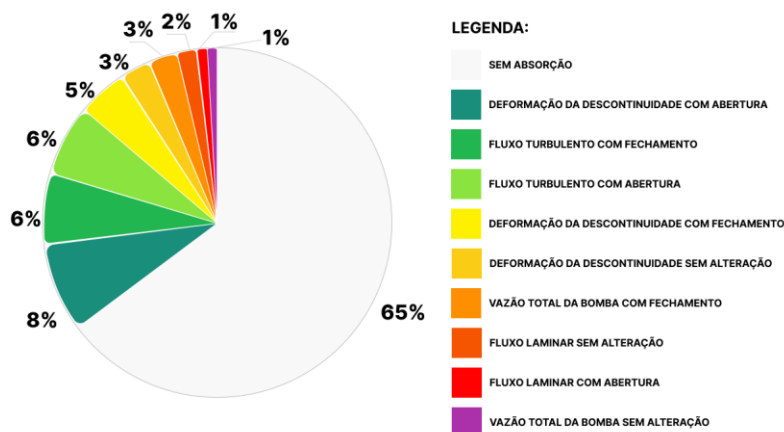


Figura 1. Resultados dos comportamentos dos ensaios por Oliveira *et al.*, 1975.

Para melhor interpretação dos comportamentos dos ensaios, os resultados foram analisados desconsiderando os ensaios onde não houve absorção de água durante a execução. Os resultados são apresentados na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2. Comportamentos dos ensaios de acordo com Oliveira *et al.*, 1975. Foram desconsiderados os ensaios onde não houve absorção de água.

Comportamento	Total	%
Deformação da descontinuidade com abertura	9	24%
Fluxo turbulento com fechamento	7	18%
Fluxo turbulento com abertura	7	18%
Deformação da descontinuidade com fechamento	5	13%
Deformação da descontinuidade sem alteração	3	8%
Vazão total da bomba com fechamento	3	8%
Fluxo laminar sem alteração	2	5%
Fluxo laminar com abertura	1	3%
Vazão total da bomba sem alteração	1	3%
Fluxo laminar com fechamento	0	0%
Fluxo turbulento sem alteração	0	0%
Vazão total da bomba com abertura	0	0%

Observa-se que os principais comportamentos observados são deformação das descontinuidades com abertura, fluxo turbulento com fechamento e fluxo turbulento com abertura. Esses três comportamentos predominam sobre os demais, representando 24% (9 ensaios), 18% (7 ensaios) e 18% (7 ensaios) dos ensaios executados, respectivamente.

5 CONCLUSÕES

A interpretação dos resultados permitiu mapear as tendências de comportamento dos maciços quando submetidos a diferentes estágios de pressão. De modo geral, foi possível concluir que a principal tendência observada foi a ausência de absorção d'água do maciço rochoso, representando 65% do espaço amostral. Nesses casos, o resultado do coeficiente de permeabilidade zero, apesar da presença de fraturas e das condições das descontinuidades. Essa ausência de absorção pode ser entendida como uma inércia do maciço rochoso no que diz respeito a sua resposta ao estímulo causado pelo aumento de pressão, visto que não há alteração do estado natural dos maciços durante o ensaio.

Ao desconsiderar da análise os ensaios sem absorção de água, pode-se analisar 38 ensaios e observar as tendências predominantes. Foi possível concluir que o comportamento do tipo deformação das descontinuidades representa uma tendência forte entre os ensaios. Este comportamento indica que a permeabilidade aumenta à medida que o teste avança, independentemente das mudanças observadas na pressão da água. Também mostra que quando o maciço é condicionado a pressões elevadas, a infiltração induz danos permanentes ao material rochoso, geralmente devido a preenchimentos e/ou movimentos permanentes da rocha, a permeabilidade do maciço rochoso diminui. Comportamento característico de maciços rochosos que exibem descontinuidades parcialmente abertas a moderadamente largas.

Outra tendência destacada é a frequência do fluxo turbulento. A permeabilidade do maciço rochoso diminui à medida que a pressão da água aumenta. Este comportamento é característico de maciços rochosos que exibem descontinuidades parcialmente abertas a moderadamente largas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Chammas Engenharia por fornecer os dados utilizados no presente estudo e pelo incentivo em iniciativas de pesquisa e desenvolvimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (2020). *Ensaio de perda d'água sob pressão*. 2ª ed., São Paulo.
- Houlsby, A. (1976). Routine interpretation of the Lugeon water-test. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 9 (4), p. 303-313.
- Houlsby, A. (1990). *Construction and Design of Cement Grouting: A guide to grouting in Rock Foundations*, John Wiley & Sons, USA, 442p.
- Oliveira, A.; Silva, R.; Ferreira Junior, J. (1975). *Ensaio de Perda d'Água sob Pressão: diretrizes*. In: Boletim nº 2, São Paulo, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, ABGE.
- Serviço Geológico do Brasil (2012). *Geoparque Quadrilátero Ferrífero (MG): proposta*. Disponível em: <http://dspace.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/17149/1/quadrilatero.pdf>. Acesso em: 18/01/2024.