

Avaliação das Condições de Estanqueidade das Fundações da Barragem de Laúca em Angola com Base em Ensaio Lugeon

Autor: Edson Bento Campos | ecambento@gmail.com | Mestre em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica PUC | Rio de Janeiro, Brasil

Autor: José Paulo Kai | jose.kai@uan.ao | Doutor em Mecânica das Estruturas, UDepartamento de Arquitectura, Faculdade de Engenharia da Universidade Agostinho Neto "FEUAN" | <https://orcid.org/0009-0006-3255-9900>

Recebido: Agosto, 2025 | **Aceite:** Setembro, 2025 | **Publicado:** Janeiro, 2026

RESUMO

A estanqueidade das fundações de barragens é um factor crítico para sua segurança e desempenho. Esta pesquisa avaliou as condições de estanqueidade das fundações e da ombreira da Hidroeléctrica de Laúca, Angola, utilizando ensaios de perda de água sob pressão (Ensaio Lugeon). O objectivo principal foi determinar a permeabilidade do maciço rochoso e identificar a necessidade de tratamentos de injeção. A metodologia consistiu na realização e interpretação de ensaios Lugeon em diferentes furos de sondagem, analisando o regime de escoamento, o grau de fraturamento e o comportamento do preenchimento das fraturas. Os resultados indicaram uma variabilidade significativa da permeabilidade, com valores de

Lugeon (U.L) desde 0 (estanque) até 400 U.L (muito alto) em diferentes trechos e litologias. A ombreira, composta por rochas metassedimentares, apresentou permeabilidade geralmente mais elevada, requerendo um programa de injeção mais robusto (três ou mais linhas), enquanto o eixo central no leito gnáissico mostrou-se predominantemente estanque ou com baixa permeabilidade, sugerindo uma intervenção menos intensiva. Conclui-se que a avaliação sistemática via ensaios Lugeon é fundamental para orientar decisões de projecto sobre a necessidade e o dimensionamento de cortinas de injeção, assegurando a estabilidade e redução de infiltrações na barragem.

Palavras-chave: Barragens; Ensaio de Lugeon; Permeabilidade; Fundações; Laúca.

ABSTRACT

The watertightness of dam foundations is a critical factor for their safety and performance. This research evaluated the seepage conditions in the foundation and abutment of the Laúca Hydroelectric Project in Angola using water pressure tests (Lugeon Test). The main objective was to determine the permeability of the rock mass and identify the need for grouting treatments. The methodology involved conducting and interpreting Lugeon tests in different boreholes,

analysing the flow regime, fracture degree, and fracture infill behaviour. The results indicated significant permeability variability, with Lugeon values (U.L) ranging from 0 (tight) to 400 U.L (very high) in different sections and lithologies. The abutment, composed of metasedimentary rocks, generally showed higher permeability, requiring a more robust grouting program (three or more lines), while the central axis on the gneissic riverbed was predominantly tight or

had low permeability, suggesting less intensive intervention. It is concluded that systematic evaluation via Lugeon tests is essential to guide project decisions on

the need and design of grout curtains, ensuring the dam's stability and seepage reduction.

Keywords: Dams; Lugeon Test; Permeability; Foundations; Laúca.

INTRODUÇÃO

A segurança e a durabilidade de barragens de grande porte estão intrinsecamente ligadas às condições geotécnicas e de estanqueidade de suas fundações (Romanel, 2014). Maciços rochosos fraturados podem apresentar elevados valores de permeabilidade, comprometendo a estabilidade da estrutura devido a infiltrações e subpressões. O Aproveitamento Hidroelétrico (AHE) de Laúca, localizado no rio Kwanza em Angola, é um empreendimento de grande magnitude, cuja barragem principal é de Concreto Compactado com Rolo (CCR). A avaliação da permeabilidade das suas fundações torna-se, portanto, uma etapa crucial no projecto.

A questão que norteia este trabalho é: Quais são as condições de estanqueidade das fundações e da ombreira da barragem de Laúca, e que implicações estas condições trazem para a definição de um programa de tratamento por injeção?

A relevância deste estudo está na sua contribuição para a segurança e eficácia do AHE Laúca. A correta avaliação da permeabilidade do maciço de fundação permite otimizar os programas de injeção, evitando custos desnecessários por superdimensionamento ou riscos de subdimensionamento. A pesquisa preenche uma lacuna prática ao aplicar e interpretar sistematicamente os ensaios Lugeon em um contexto geológico complexo e específico de Angola, fornecendo subsídios para decisões de engenharia fundamentadas.

Objectivos:

- Objectivo Geral: Avaliar as condições de estanqueidade das fundações e da ombreira da barragem de Laúca com base em ensaios de permeabilidade (Lugeon).

Objectivos Específicos:

- Executar e interpretar ensaios de perda d'água

sob pressão em diferentes furos de sondagem;

- Determinar os valores representativos de permeabilidade (em Unidades Lugeon) para diferentes litologias e zonas da fundação;
- Identificar o regime de escoamento e o comportamento do maciço durante os ensaios;
- Propor diretrizes para um programa de tratamento por injeção baseado nos resultados obtidos.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O ensaio Lugeon, desenvolvido por Maurice Lugeon na década de 1930, é um método consagrado para estimar a permeabilidade de maciços rochosos in situ (Lugeon, 1933). O teste mede a absorção de água em um trecho isolado de um furo de sondagem sob pressões controladas. Uma unidade Lugeon (1 U.L) equivale a uma absorção de 1 litro por minuto por metro de furo, sob uma pressão de 10 kgf/cm².

A interpretação dos resultados vai além do simples valor de permeabilidade, permitindo inferir sobre o tipo de escoamento (laminar, turbulento, dilatação, lavagem), o grau de fraturamento e o comportamento do material de preenchimento das fraturas (Houlsby, 1976; Quiñones-Rozo, 2010). Autores como Houlsby (1976) estabelecem diretrizes práticas, onde valores inferiores a 1 U.L indicam maciços estanques, valores entre 1 e 10 U.L podem requerer tratamento dependendo do contexto, e valores superiores a 10 U.L geralmente indicam a necessidade de injeção.

A permeabilidade em maciços rochosos é essencialmente controlada por descontinuidades (fraturas, falhas, juntas). Diferentes litologias e contextos geológicos respondem de maneira distinta aos ensaios e

tratamentos, tornando a caracterização geológico-geotécnica local um elemento indispensável para uma interpretação adequada (Bento, 2014).

3. METODOLOGIA

O estudo caracteriza-se como um estudo de caso aplicado, baseado em dados de campo e ensaios in situ.

3.1 ÁREA DE ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA

O AHE Laúca está localizado no rio Kwanza, província do Kwanza Norte, Angola. A barragem é do tipo CCR com altura máxima de 132 m. Geologicamente, a área do empreendimento é composta por:

Ombreiras (Margens): Rochas metassedimentares (arenitos silicificados, arenitos porosos e siltitos).

Eixo da Barragem (Leito do Rio): Embasamento cristalino (gnaisse).

Foram identificadas falhas geológicas e um fraturamento subvertical intenso, que condiciona a permeabilidade do maciço.

3.2 ENSAIOS DE PERMEABILIDADE

Foram realizados ensaios de perda de água sob pressão (Lugeon) em diversos furos de sondagem (SR-101, SR-104, SR-108, SR-109, SR-110, SR-203), seguindo a metodologia padrão (ABGE, 1975). Os ensaios foram conduzidos em múltiplos estágios de pressão (crescente e decrescente), permitindo a análise do comportamento hidráulico do maciço. Para cada trecho

ensaiado, foram calculados a vazão específica (Q_e) e o valor de Lugeon, e interpretados o regime de escoamento e o comportamento das fraturas com base nas relações entre vazão e pressão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados demonstraram uma grande variabilidade espacial da permeabilidade, correlacionada com a litologia e a intensidade de fraturamento.

4.1 ANÁLISE POR ZONA E LITOLOGIA

Zona da Ombreira (Metassedimentos - SR-101, SR-104, SR-108): Apresentou os valores mais elevados de permeabilidade. Por exemplo, no furo SR-101, trecho 78-79 m, registou-se 148.8 U.L, e no SR-104, trecho 32-35 m, 82.78 U.L. Estes valores, associados a regimes de escoamento turbulento e de lavagem, indicam maciços fraturados e com fraturas abertas, exigindo intervenção robusta.

Eixo da Barragem (Gnaisse - SR-109, SR-110, SR-203): Apresentou predominantemente baixa permeabilidade. Vários trechos, como em SR-110 (7.65-10.65 m e 19.70-22.28 m) e SR-203 (8-13 m e 18-23 m), registaram 0 U.L, caracterizando maciços estanques. Contudo, trechos pontuais, como em SR-110 (22.28-25.30 m) com 400 U.L, mostraram que mesmo no gnaisse podem existir zonas críticas, possivelmente associadas a zonas de falha ou fraturamento intenso localizado.

A Tabela 1 sintetiza resultados representativos, ilustrando o contraste entre as zonas.

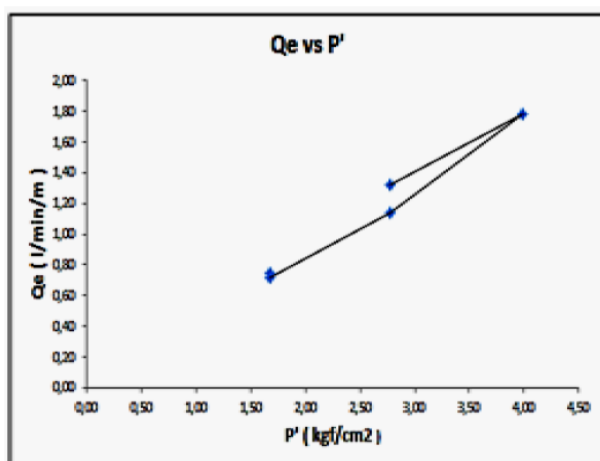
Tabela 1. Valores representativos de permeabilidade (Lugeon) por furo e trecho.

Furo Sondagem de	Trecho (m)	Litologia Predominante	Valor Lugeon (U.L)	Comportamento Observado
SR-101	78,00 - 79,00	Metassedimento	148,80	Turbulento / Lavagem
SR-104	32,00 - 35,00	Metassedimento	82,78	Turbulento
SR-108	14,40 - 17,20	Metassedimento	4,50	Laminar / Colmatação
SR-110	22,28 - 25,30	Gnaisse	~400,00	Turbulento
SR-110	19,70 - 22,28	Gnaisse	0,00	Estanque
SR-203	3,00 - 8,00	Gnaisse	5,20	Laminar

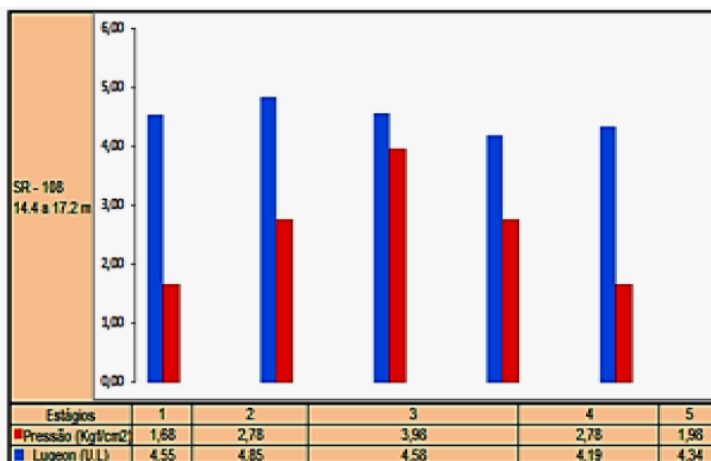
Fonte: Elaborado pelos autores (2024) com base em Bento (2014).

O Gráfico 1 exemplifica a relação entre vazão equivalente e pressão efetiva para um trecho com comportamento laminar (SR-108, 14.40-17.20 m).

Gráfico 1. Vazão Equivalente x Pressão Efetiva (SR-108, 14.40-17.20 m).



Vazão Equivalente x Pressão Efetiva ensaio número 1



Pressão Efetiva x Lugeon - ensaio número 1

Fonte: Adaptado de Bento (2014).

4.2 IMPLICAÇÕES PARA O TRATAMENTO POR INJEÇÃO

Com base na interpretação de Houlsby (1976) e nos resultados obtidos, propõem-se diferentes estratégias de tratamento:

Para a Ombreira (Área 1 - Alta Permeabilidade): Recomenda-se um programa de injeção intensivo, com três ou mais linhas de furos (primários, secundários e terciários), visando criar uma cortina de estanqueidade eficaz.

Para o Eixo da Barragem (Área 2 - Baixa Permeabilidade): Sugere-se uma intervenção mais localizada, com uma ou duas linhas de injeção (primários e secundários), focada nos trechos específicos que apresentaram permeabilidade elevada, combinada com um sistema de drenagem para alívio de subpressões.

A discussão técnica sobre a necessidade de injeção versus drenagem é pertinente. Embora as injeções sejam o método tradicional para reduzir a permeabi-

lidade, alguns autores defendem a combinação com drenagens para maior eficácia no controle de subpressões (Bento, 2014).

5. CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou as condições de estanqueidade das fundações da barragem de Laúca mediante a interpretação de ensaios Lugeon. Conclui-se que:

1. A permeabilidade do maciço rochoso é altamente heterogénea, variando de completamente estanque (0 U.L) a extremamente permeável (400 U.L).
2. Existe uma clara correlação entre litologia e permeabilidade: as ombreiras em rochas metassedimentares apresentam permeabilidade significativamente mais alta que o eixo da barragem em gnaisse.
3. A interpretação dos ensaios Lugeon, considerando não apenas o valor final de permeabilidade, mas também o regime de escoamento e o comportamento das fraturas, é uma ferramenta poderosa para orientar decisões de projeto.
4. É imprescindível a implementação de um programa de tratamento por injeção diferenciado, mais intensivo nas ombreiras e pontual no eixo da barragem, para garantir a segurança e durabilidade da estrutura.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Odebrecht Angola e à Interchne Consultores S.A. pelo fornecimento dos dados e suporte técnico, ao corpo docente do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, e à CAPES pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

ABGE. (1975). Ensaio de perda d'água sob pressão. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia.

Bento, E. C. (2014). Avaliação das Condições de Estanqueidade das Fundações e da Ombreira da Hidroelétrica de Laúca - Angola (Dissertação de Mestrado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Houlsby, A. C. (1976). Routine interpretation of the Lugeon water-test. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology.

Lugeon, M. (1933). Barrages et géologie. Dunod.

Quiñones-Rozo, C. A. (2010). Lugeon test interpretation, revisited. In Collaborative Management of Integrated Watersheds (USSD).

Romanel, C. (2014). Fundações de Barragens. Notas de Aula. Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio.