

Análise geotécnica de tratamento para túnel de adução em maciço rochoso gnáissico

Geotechnical treatment analysis for headrace tunnel in gneissic rock mass

Soraia Bastos Katereniuk¹; Alessander C. M. Kormann²; Vítor Pereira Faro³; Pedro de Carvalho Thá⁴

¹ Universidade Federal do Paraná (UFPR), Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, Curitiba/PR, Brasil. Email: eng.sbk@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1019-3829>

² Universidade Federal do Paraná (UFPR), Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, Curitiba/PR, Brasil. Email: alessander@ufpr.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4512-3763>

³ Universidade Federal do Paraná (UFPR), Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, Curitiba/PR, Brasil. Email: vitorpereirafaro@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0001-5459>

⁴ Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, Rio de Janeiro/RJ, Brasil. Email: pedro.tha@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0006-1274-1502>

Resumo: Este artigo apresenta a metodologia adotada para o dimensionamento do tratamento geotécnico dos túneis de adução do Aproveitamento Hidroelétrico (AHE) Laúca, localizado em Angola. O circuito de adução da usina compreende seis túneis paralelos, com extensão média de 1900 metros cada, escavados em um maciço gnáissico. Para determinar os suportes necessários à manutenção da estabilidade das escavações durante a fase construtiva e a operação da usina, foram realizados ensaios e investigações geológico-geotécnicas. Os resultados dessas investigações fundamentaram os estudos apresentados, fornecendo parâmetros como resistência à compressão e deformabilidade do maciço rochoso, além da resistência ao cisalhamento das descontinuidades. A definição do suporte adequado para garantir a estabilidade das escavações foi baseada no sistema de classificação de maciços rochosos Q-system. Após o pré-dimensionamento do suporte para as escavações em maciço rochoso competente, classificado como Classe I a III, o tratamento proposto foi submetido a verificações e validações por meio de análises de estabilidade local. Essas análises foram realizadas utilizando o software Unwedge para condições de carregamento de final da construção, e uma abordagem combinada de estabilidade local e fluxo acoplado, com os softwares Unwedge e Phase, para o carregamento correspondente à fase de operação. Os resultados demonstraram a necessidade de um sistema de drenagem composto por drenos perfurados no maciço rochoso, associado ao tratamento padrão composto por ancoragens e concreto projetado. Esse sistema foi essencial para reduzir as poropressões atuantes em possíveis cunhas instáveis ao redor das escavações, especialmente em cenários nos quais um túnel permanecesse vazio enquanto os demais estivessem em operação. Atualmente, todos os túneis do empreendimento encontram-se em operação e já foram submetidos ao processo de esvaziamento em função de demandas operacionais. Em nenhuma dessas ocasiões foram observados problemas no piso, tampouco houve registro de queda de blocos nas paredes ou abóbada.

Palavras-chave: Túnel; Maciço rochoso; Tratamento.

Abstract: This article presents the methodology adopted for the geotechnical design of the support applied to the headrace tunnels of the Laúca Hydropower Plant (AHE Laúca), located in Angola. The plant's headrace system consists of six parallel tunnels, each with an average length of 1900 meters, excavated in a gneissic rock mass. To determine the supports required to maintain excavation stability during the construction phase and the plant's operation, geological and geotechnical tests and investigations were conducted. The results of these investigations supported the studies presented here, providing parameters such as compressive strength and deformability of the rock mass, as well as shear strength of the rock mass discontinuities. The definition of appropriate support to ensure excavation stability was based on the Q-system rock mass classification. After the preliminary design of the support for excavations in competent rock mass, classified as Classes I to III, the proposed support was subjected to verification and validation through local stability analyses. These analyses were performed using the Unwedge software for the End of Construction load case, and a combined approach of local stability and coupled flow analysis using the Unwedge and Phase software for the operational phase load condition. The results highlighted the necessity of a drainage system consisting of perforated drains in the rock mass, in addition to the standard treatment comprising anchors and shotcrete. This system was crucial for reducing pore pressures acting on potentially unstable wedges around the excavations, particularly in scenarios where one tunnel remained empty while the others were in operation. Currently, all tunnels in the project are in operation and have undergone emptying processes due to operational demands. On none of these occasions were issues observed with the tunnel floor, nor were there any reports of block falls from the walls or crown.

Keywords: Tunnel; Rock Mass; Geotechnical Treatment.

Recebido: 30/09/2024; Aceito: 14/02/2025; Publicado: 07/03/2025.

1. Introdução

Em grandes projetos, como usinas hidrelétricas, às vezes é necessário escavar túneis, seja durante a fase de desvio do rio ou para configurar o circuito hidráulico. Diferentes tipos de suporte são comumente requisitados para a escavação de túneis, a fim de estabilizar as escavações durante a construção e a operação do projeto.

A engenharia de escavação de túneis evoluiu devido à crescente compreensão do comportamento das massas rochosas e sua interação com as estruturas. O desenvolvimento de métodos de classificação de massas rochosas, como o Sistema Q proposto por Barton et al. em 1974, contribuiu para o projeto racional de sistemas de suporte para escavações subterrâneas (ALEJANO, 2024).

Além disso, os avanços na computação e nos métodos numéricos agora permitem a modelagem mais precisa do comportamento do maciço rochoso e das interações entre sistemas de suporte e túneis. Métodos como o Método dos Elementos Finitos (MEF) e o Método dos Elementos Distintos (MED), descritos por autores como Zienkiewicz et al. (2005) e Cundall & Hart (1992), fornecem análises detalhadas, permitindo a previsão do desempenho estrutural sob várias condições de carregamento. Essas ferramentas têm sido fundamentais no desenvolvimento de soluções geotécnicas otimizadas e na mitigação dos riscos associados às escavações.

O presente artigo foca no dimensionamento do tratamento geotécnico necessário para estabilizar escavações de túneis em maciços rochosos gnáissicos competentes na Usina Hidrelétrica de Laúca. No contexto deste estudo, entende-se por maciços rochosos competentes aqueles em que a falha ocorre ao longo dos planos de fraqueza, também conhecidos como descontinuidades (KATERENIUK, 2022; WYLLIE; MAH, 2004).

A Usina Hidrelétrica de Laúca, cujos dados foram usados no presente estudo de caso, está localizada na Província de Malange, em Angola, e seu circuito de geração é configurado com seis tomadas d'água, poços circulares, túneis de adução com uma média de 1900 metros de comprimento cada, e uma caverna de casa de força abrigando seis unidades geradoras (THÁ, et al., 2017).

Os túneis de adução têm 11,33 m de altura e 10,10 m de largura, com um pilar de rocha de 20 m entre eles. Na maior parte de sua extensão, os túneis não possuem revestimento de concreto, mesmo quando submetidos a uma pressão externa de 240 m.c.a do reservatório. O revestimento de concreto armado foi necessário apenas em seções onde as escavações no gnaisse atravessaram zonas de falha, onde o maciço rochoso estava em condições piores.

Em 2017, ano de operação da sua primeira unidade, a capacidade instalada do projeto Laúca representava mais de 30% de todo o sistema elétrico angolano (MINEA, 2014). Dada a sua alta importância, garantir um sistema de geração robusto e obras de construção seguras foi essencial para o sucesso do projeto.

O conhecimento sobre o comportamento do maciço rochoso onde a construção será implementada desempenha um papel fundamental no sucesso de um projeto geotécnico. Assim, a caracterização do maciço rochoso e das descontinuidades existentes é uma etapa fundamental durante o dimensionamento de uma escavação subterrânea.

Em maciços rochosos competentes, os planos de descontinuidade são os principais elementos que podem causar instabilidade nas escavações. Nestes tipos de maciços rochosos, a resistência ao cisalhamento das descontinuidades é o parâmetro a ser considerado nas análises (KATERENIUK, 2022; WYLLIE; MAH, 2004). Descontinuidades são definidas como planos dentro do maciço rochoso que separam os blocos da matriz rochosa (VALLEJO et al., 2002). Com base nas características desses planos, as descontinuidades podem ser classificadas em falhas, juntas, planos de acamamento ou foliação (FIORI; CARMIGNANI, 2015).

A caracterização da resistência ao cisalhamento das descontinuidades do maciço rochoso é tipicamente realizada por meio de mapeamento geológico de campo e/ou ensaios de laboratório. O mapeamento de campo, conduzido por geólogos, envolve a identificação, orientação e caracterização das descontinuidades, bem como a avaliação de sua geometria e condições de preenchimento, parâmetros utilizados para estimar a resistência ao cisalhamento (BARTON et al., 1974; HOEK; MARSHALL, 1976). Paralelamente, ensaios de laboratório, como testes de cisalhamento direto ou testes de cisalhamento triaxial, permitem a quantificação das propriedades mecânicas das descontinuidades (BARTON; CHOU, 1979; GRAY; PARRY, 1999).

A caracterização dos parâmetros de resistência ao cisalhamento das descontinuidades do maciço rochoso serve como insumo para análises de engenharia e dimensionamento de estruturas subterrâneas. Isso é relevante em projetos de túneis, onde a estabilidade e os requisitos de suporte são influenciados pelo comportamento mecânico do maciço rochoso circundante (HOEK et al., 1995; WITTKÉ, 1990). No caso da Usina Hidrelétrica de Laúca, o dimensionamento de seus túneis baseou-se no Sistema Q.

O Sistema Q é um método de classificação de maciços rochosos amplamente utilizado internacionalmente. Este sistema integra dados geológicos e geotécnicos, incluindo as propriedades das descontinuidades, para fornecer um guia para o

dimensionamento de escavações e a especificação de suportes, garantindo a estabilidade das obras subterrâneas (HOEK, 2007; ALEJANO, 2024). O sistema foi desenvolvido no Instituto Geotécnico da Noruega (NGI) e foi publicado pela primeira vez em 1974 por Barton, Lien e Lunde.

Neste artigo, os autores apresentam a metodologia de dimensionamento utilizada para definir os sistemas de suporte necessários para os túneis de adução da Usina Hidrelétrica de Laúca, bem como as informações básicas que sustentam essas avaliações, obtidas através de mapeamento de campo e ensaios de laboratório. Os autores também destacam o que consideraram os aspectos mais críticos a serem abordados no projeto para garantir o desempenho satisfatório da estrutura.

2. Metodologia

As seguintes seções fornecerão uma visão geral da Usina Hidrelétrica de Laúca, com foco nos principais aspectos da caracterização do maciço rochoso para o projeto do suporte dos túneis de adução. Além disso, será discutida a metodologia empregada no pré-dimensionamento e validação do tratamento geotécnico recomendado para escavações em maciços rochosos gnáissicos das classes II e III, onde o comportamento é predominantemente governado por discontinuidades.

2.1 Descrição do empreendimento

A Usina Hidrelétrica de Laúca está localizada no Rio Kwanza, na província de Malange, em Angola. O projeto compreende uma barragem de concreto compactado com rolo de 156 m de altura e um circuito hidráulico composto por seis tomadas d'água, poços circulares, túneis de adução com um comprimento médio de 1900 m cada e uma caverna da casa de força com seis unidades geradoras. A Figura 1 ilustra o circuito hidráulico do projeto e a posição dos túneis de adução.

A capacidade total instalada é de 2070 MW, dos quais 2004 MW são gerados na casa de força principal e 70 MW na casa de força ecológica, localizada na base da barragem.

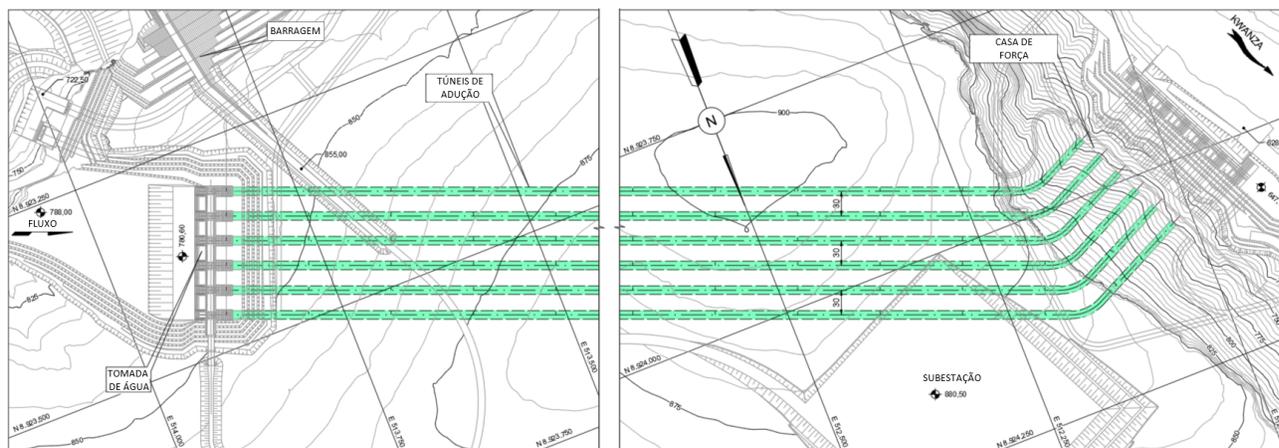


Figura 1 – Túneis de Adução da UHE Laúca.
Fonte: Modificado de Intertechne (2014).

A geologia regional é composta por um pacote de rochas metassedimentares, com aproximadamente 100 m de espessura, depositadas em contato sub-horizontal formado por uma inconformidade sobre uma base de gnaisse do Pré-Cambriano.

A sequência metassedimentar é composta por metarenitos, metasiltitos e brechas conglomeráticas. Na região da barragem, em ambas as margens do rio, existem escarpas de rochas metassedimentares formando paredes subverticais de até 100 m de altura. Ao pé das escarpas, há depósitos de taludes e colúvios com espessuras decamétricas. Alguns metros acima do leito do rio, aproximadamente na cota EL. 750 m, os gnaissees do embasamento Pré-Cambriano afloram.

O contato entre o gnaisse e o pacote metassedimentar sobrejacente sobe gradualmente em direção à área da usina principal, onde aflora aproximadamente na cota EL. 800 m. Todo o complexo de túneis e cavernas da usina principal está posicionado em um maciço de gnaisse.

Os túneis de adução tiveram seu suporte geotécnico e revestimento definidos de acordo com as classes de maciços rochosos. Para as classes I, II e III, o tratamento consiste em concreto projetado reforçado com fibras de aço, chumbadores passivos e drenos radiais. Nos maciços rochosos da classe IV, está previsto, além do tratamento geotécnico com concreto projetado e chumbadores, um revestimento de concreto armado com 98 cm de espessura. A geometria da seção transversal da escavação é mostrada na Figura 2. Os túneis possuem 11,33 m de altura e 10,10 m de largura.

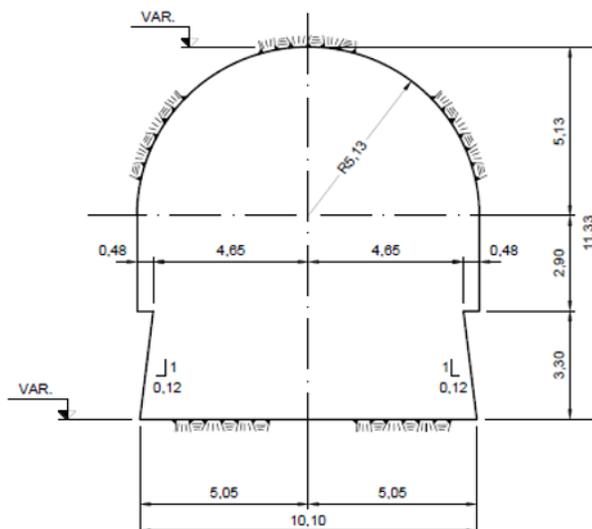


Figura 2 – Seção transversal da escavação.
Fonte: Intertechne (2014).

Próximo à caverna da casa de força, os túneis de adução possuem uma blindagem de aço de 40 m de comprimento, seguida por um revestimento de concreto com 20 m de comprimento e 80 cm de espessura, independentemente da classificação do maciço rochoso.

Os túneis de adução estão integralmente inseridos em um maciço rochoso gnáissico. Na região da tomada d'água, os túneis possuem a menor cobertura, de aproximadamente 140 m. Já na área da caverna da casa de força, ocorre a maior cobertura, que é de aproximadamente 240 m.

2.2 Caracterização do maciço rochoso

Para o presente estudo, foram considerados os resultados de testes laboratoriais e informações coletadas durante o mapeamento de campo realizado em afloramentos rochosos, bem como nas escavações dos túneis de adução.

As informações coletadas durante os mapeamentos foram processadas utilizando o software Dips 6.0 (ROSCIENCE, 2025a), que gerou um estereograma e identificou as famílias de descontinuidades a serem considerados no projeto. O estereograma resultante é apresentado na Figura 3.

As famílias mapeadas com maior frequência nas escavações, J1 e J1', correspondem à foliação gnáissica e às falhas regionais. Essas famílias apresentam orientações semelhantes, mas com mergulhos acentuados em quadrantes opostos. A seguir, são apresentadas as atitudes (mergulho e direção de mergulho) das principais famílias de descontinuidades identificadas durante o mapeamento:

- J1:021/78 – fraturamento subvertical com mergulho para NE, associado à foliação gnáissica e ao falhamento regional;
- J1': 218/81 - fraturamento subvertical com mergulho para SW, associado à foliação gnáissica e ao falhamento regional;
- J2: 132/75 - fraturamento subvertical com mergulho para SE;
- J3: 307/73 - fraturamento subvertical com mergulho para NW;
- J4: 080/76 - fraturamento subvertical com mergulho para NE;

- J5: 116/17 - fraturamento subhorizontal com mergulho para SE.

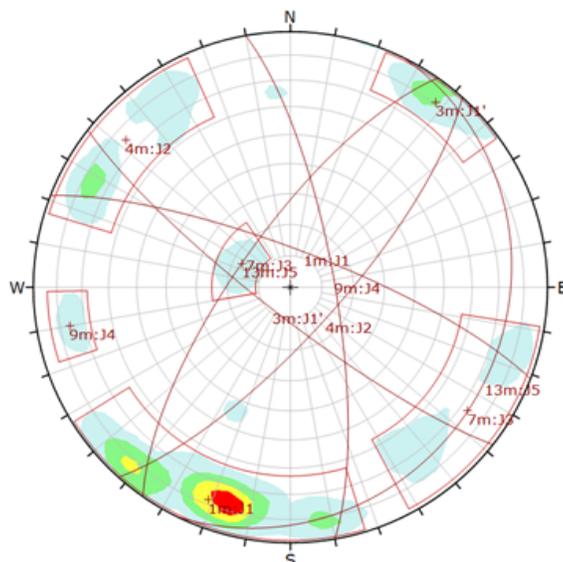


Figura 3 – Estereograma de descontinuidades .
Fonte: Intertechne (2014).

Para permitir túneis sem revestimento de concreto armado na maior parte de sua extensão é necessário que o maciço rochoso apresente propriedades adequadas. Para evitar o fraturamento hidráulico o maciço rochoso não pode estar sujeito a processos de dissolução e deve ter resistência mecânica apropriada, um estado de tensão adequado e baixa permeabilidade.

A permeabilidade da rocha e a resistência ao fraturamento hidráulico foram determinadas com base nos resultados de 256 testes de Lugeon e 149 testes de macaqueamento hidráulico realizados em fraturas existentes, em alguns trechos dos seis túneis. A pressão máxima aplicada nos testes de Lugeon foi de 2,4 MPa, que corresponde à pressão interna máxima operacional dos túneis. Dos testes realizados, apenas 26 apresentaram absorção de água, com valores muito baixos (menores que 1 Lugeon na maioria dos casos). Nos outros 230 testes, a absorção foi zero. A permeabilidade definida para o maciço rochoso gnáissico foi de $3,10^{-8}$ m/s.

A caracterização mecânica do maciço rochoso foi feita através de testes de compressão simples, triaxiais e de cisalhamento direto em testemunhos de sondagem e testes de dilatômetro realizados *in situ*. Medições da rugosidade das descontinuidades da escavação também foram realizadas. O resumo das características mecânicas do maciço rochoso está apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Resumo das propriedades do maciço rochoso.

Descontinuidades			UCS (MPa)	Módulo de Young (GPa)
ϕ_r (°)	JRC	JCS (MPa)		
30	8,7	105	105	28

Fonte: Intertechne (2014).

Nas análises realizadas neste estudo, para maciços rochosos de Classe II, o ângulo de atrito das descontinuidades foi assumido como 30°. Para as descontinuidades relacionadas às zonas de falha, a faixa de valores de ângulo de atrito correspondentes às condições observadas, conforme a proposta de Barton et al. (1974), varia entre 14° e 27°. Assim, foi adotado um valor intermediário de ângulo de atrito de 21° para as análises do projeto em maciços rochosos de Classe III, onde foi considerada a influência de uma zona de falha.

Quanto ao mapeamento geológico-geotécnico, em todos os avanços das escavações, foi realizado o mapeamento e a classificação do maciço rochoso de acordo com o sistema Q (NGI, 2022). A porcentagem de cada classe de maciço rochoso

que efetivamente ocorreu durante as escavações é apresentada na Tabela 2, juntamente com a faixa de valores de Q que representa cada classe de maciço rochoso no projeto.

Tabela 2 – Classes de Maciço – Túneis de Adução.

Classe	%	Q
I	0,04	> 20
II	71,03	3 < Q < 20
III	28,30	0,3 < Q < 3
IV	0,63	0,01 < Q < 0,3
V	0,00	< 0,01

Fonte: Intertechne (2014).

2.3 Dimensionamento de suporte geotécnico

O suporte necessário para garantir a estabilidade de uma escavação subterrânea, como túneis, pode ser preliminarmente definido com base em sistemas de classificação de maciços rochosos. Esses sistemas de classificação são métodos empíricos, baseados em um extenso banco de dados de projetos existentes, que correlacionam as condições do maciço rochoso com o suporte necessário. Entre os diversos métodos existentes, os mais amplamente utilizados são: RQD (Rock Quality Designation), RMR (Rock Mass Rating) e o sistema Q (A'ssim; Xing, 2010).

Para o projeto executivo da Usina Hidrelétrica de Laúca, o método de classificação do sistema Q foi empregado, que será brevemente apresentado neste capítulo.

O método de classificação do sistema Q, também conhecido como sistema NGI, foi originalmente proposto em 1974 por N. Barton, R. Lien e J. Lunde. Essa metodologia de classificação considerou seis parâmetros que poderiam ser obtidos a partir do mapeamento de campo e da avaliação de um geólogo sobre as condições do maciço rochoso (Barton et al., 1974). Desde sua criação, o sistema passou por duas grandes revisões (1993 e 2002) com o objetivo de incorporar novos tipos de suporte, bem como dados de mais de 1950 obras subterrâneas (NGI, 2022).

A classificação do sistema Q fornece uma descrição da estabilidade de um maciço rochoso em uma escavação subterrânea. Valores altos indicam boa estabilidade, enquanto valores baixos sugerem baixa estabilidade. A equação que define o valor de Q é apresentada abaixo (NGI, 2022):

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF}$$

Os parâmetros que constituem a equação acima são:

- RQD – Grau de Fraturamento;
- J_n – Número de famílias de descontinuidades;
- J_r – Índice de rugosidade das descontinuidades;
- J_a – Índice de alteração das descontinuidades;
- J_w – Fator de redução de presença de água.

O projeto do tratamento geotécnico necessário para os túneis da Usina Hidrelétrica de Laúca considerou, para as diferentes classes de maciços rochosos, a lógica do comportamento geomecânico esperado.

As descontinuidades das rochas controlam a estabilidade das cunhas em escavações de maciços das classes I, II e III. Para esses casos, o suporte foi definido por métodos empíricos, baseados no sistema de classificação geomecânica de Barton, utilizando o sistema Q e o ESR (Excavation Support Ratio) (NGI, 2022). O fator ESR (Excavation Support Ratio) depende do tipo de escavação, variando de 0,9 a 1,1 para usinas subterrâneas, túneis principais de rodovias, abrigos civis subterrâneos, junções e interseções de túneis (VALLEJO, 2002). Para os túneis de Laúca, foi adotado o valor de 1,0.

Para os maciços rochosos da classe IV, o comportamento geomecânico não é determinado pela orientação das descontinuidades, mas sim pela resistência do maciço rochoso. A validação do suporte foi realizada por meio de análise numérica utilizando o software Phase (ROCSCIENCE, 2025b). Contudo, o projeto do suporte necessário para essa classe de maciço rochoso não está dentro do escopo deste artigo.

O projeto de suporte para escavações em maciços de classe V não foi previsto, pois essa classe não era esperada e efetivamente não ocorreu durante a construção.

Além das diferentes classes de maciços rochosos, o suporte necessário deve garantir a segurança da escavação para os diferentes casos de carregamento previstos para os túneis. Os casos de carregamento considerados neste projeto foram:

- Caso de carregamento I: Final de construção;
- Caso de carregamento II: Fluxo Permanente, considerando o Túnel 4 vazio e os demais em operação.

No primeiro caso, os túneis estão vazios, e as cunhas potenciais formadas na escavação estão submetidas apenas ao seu próprio peso. Não foi considerada a presença de água, pois todas as escavações abertas durante a construção estavam secas.

O segundo caso de carregamento corresponde ao mais crítico para os túneis. Nesse cenário, quando um dos túneis está vazio e os outros estão operando, as poro-pressões atuando no maciço rochoso ao redor do túnel vazio geram uma carga que atua sobre as cunhas, causando instabilidade. Para este caso, as análises realizadas foram para o Túnel 4, em uma seção logo a montante da blindagem do túnel (Figura 4), onde a carga hidráulica estática atinge seu valor máximo. Esse túnel foi escolhido porque, quando os Túneis 3 e 4 estão vazios, são eles que apresentam maiores poro-pressões por serem os túneis internos.

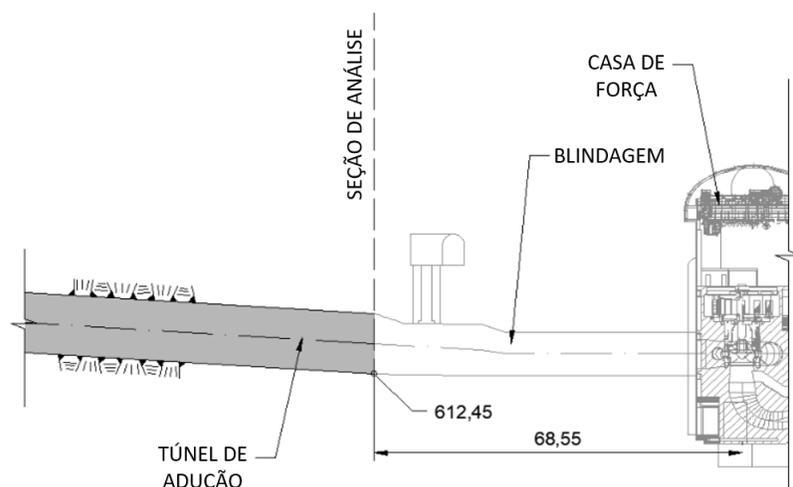


Figura 4 – Indicação da seção de análise.

Fonte: Modificado de Intertechne (2014).

2.3.1 Projeto de suporte para maciços rochosos de classes I, II e III

O pré-dimensionamento dos tratamentos para as seções dos túneis escavados em maciços rochosos de classes I, II e III foi realizado utilizando o gráfico de suporte apresentado na Figura 5. O gráfico de suporte faz parte do sistema Q e permite determinar, com base na qualidade do maciço rochoso, o suporte necessário, detalhando o comprimento dos chumbadores, o espaçamento entre eles e a espessura do concreto projetado.

O suporte resultante para os túneis de adução é indicado abaixo:

- Classe I ($Q > 20$): Nenhum suporte é necessário, exceto chumbadores pontuais.
- Classe II ($3.0 < Q < 20$): Concreto projetado sistemático com 8 cm de espessura, reforçado com fibras, combinado com chumbadores de 4 m de comprimento, $\varnothing 25$ mm, e espaçamento de 2,3 m.
- Classe III ($0.3 < Q < 3.0$): Concreto projetado sistemático com 8 cm de espessura, reforçado com fibras, combinado com chumbadores de $\varnothing 25$ mm, 4 m de comprimento, e espaçamento de 1,7 m.

A validação do suporte mencionado acima foi realizada por meio de análises de estabilidade de cunhas utilizando o software Unwedge (ROCSCIENCE, 2025c). O Unwedge é um software desenvolvido pela Rocscience que permite análises de escavações subterrâneas de túneis com descontinuidades que se intersectam, determinando a estabilidade das cunhas tetraédricas formadas ao longo do perímetro do túnel. O software também permite que o usuário calcule os requisitos de suporte para alcançar o fator de segurança desejado.

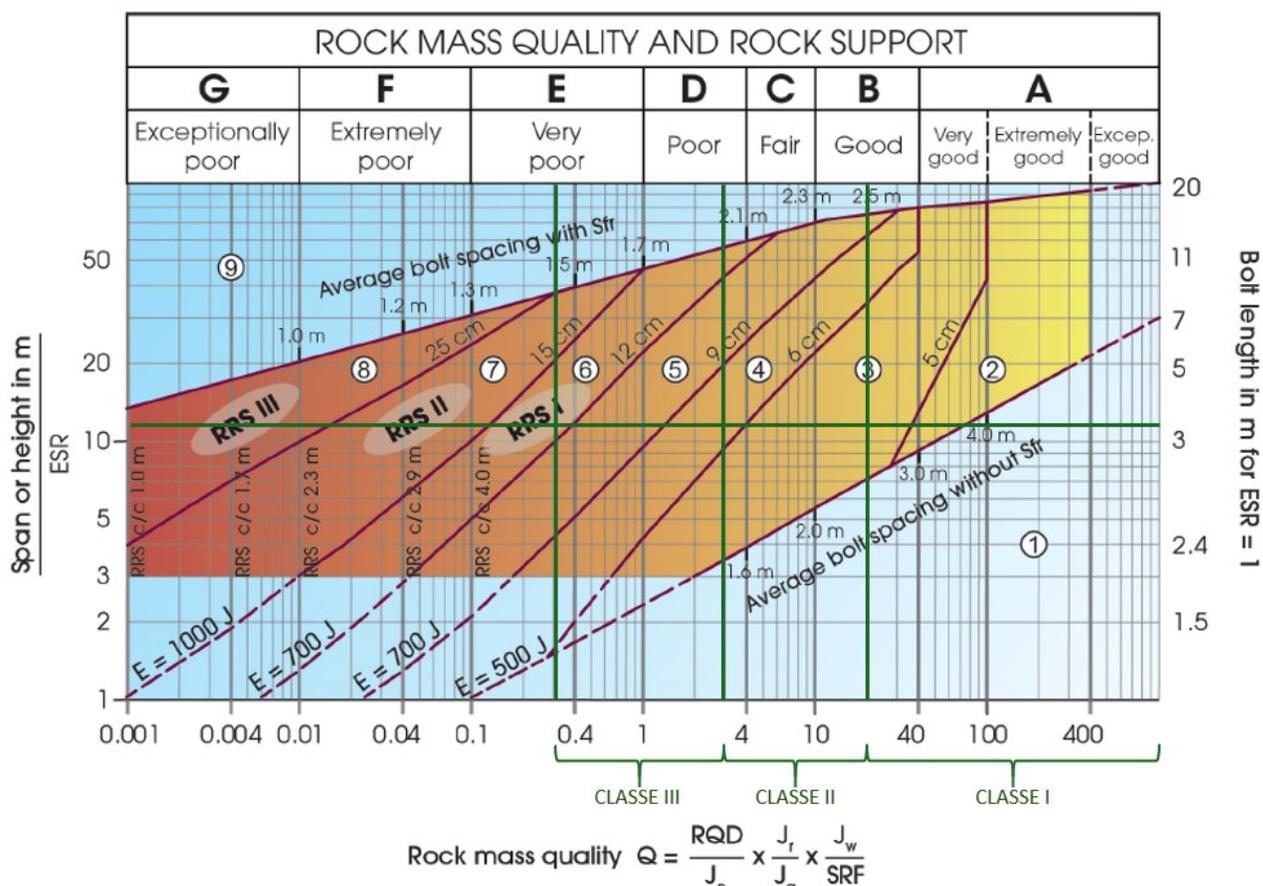


Figura 5 – Gráfico de suporte do sistema Q com estimativa do tratamento necessário para os túneis de adução com diâmetro equivalente de 10,10 m para maciços rochosos das classes I a III.
 Fonte: Modificado de NGI (2022).

A análise de estabilidade das cunhas potenciais foi realizada considerando a orientação das descontinuidades apresentadas na Figura 3 e as orientações dos túneis de adução (N291° e N244°).

Para o Caso de Carregamento I - Final de Construção, as cunhas potenciais que podem se formar ao redor das escavações dos túneis foram analisadas, considerando apenas a ação de seu próprio peso. Nesse caso de carregamento, o objetivo foi verificar se o tratamento pré-estabelecido proporcionaria um fator de segurança mínimo aceitável de 1,50.

Haverá um certo momento durante a vida útil dos túneis de adução em que será necessária a manutenção de um deles. Essa condição operacional resultará em um caso especial de carregamento, sendo a situação mais desfavorável quando o Túnel 3 ou o Túnel 4 estiver em manutenção (vazio) enquanto os outros túneis estão em operação. Essa situação levará ao desenvolvimento de poro-pressões ao redor do túnel em manutenção e, conseqüentemente, a um aumento da carga sobre as cunhas potencialmente instáveis. Essa situação foi considerada como Caso de Carregamento II. Sendo um carregamento operacional de natureza excepcional, o fator de segurança mínimo aceitável é 1,30.

A determinação do aumento das poro-pressões ao redor do túnel em manutenção foi feita utilizando um modelo numérico no software Phase. A análise começa com a determinação das poro-pressões atuando ao redor da escavação, para uma seção transversal logo a montante do trecho blindado (no qual túnel leva um revestimento em aço), onde o piso de todos os túneis está na cota 612,45 m, conforme mostrado na Figura 6.

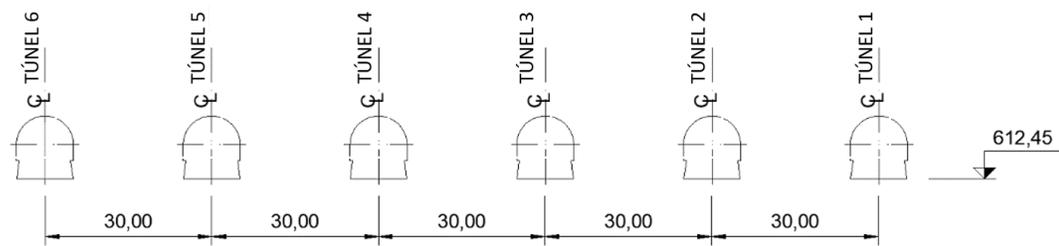


Figura 6 – Seção de análise de fluxo permanente.

Fonte: Modificado de Intertechne (2014).

Como condições de contorno, o Túnel 4 apresentou a condição de pressão zero aplicada ao seu contorno de escavação. Nos demais túneis, foi aplicada uma carga hidráulica do reservatório no nível EL. 850 m, correspondente ao nível operacional normal.

O modelo numérico dos túneis de adução, criado no software Phase, incluindo a malha de elementos finitos gerada e as condições de contorno aplicadas, é apresentado na Figura 7. As poro-pressões obtidas nesse modelo foram diretamente importadas para o programa Unwedge, onde as análises de estabilidade foram realizadas.

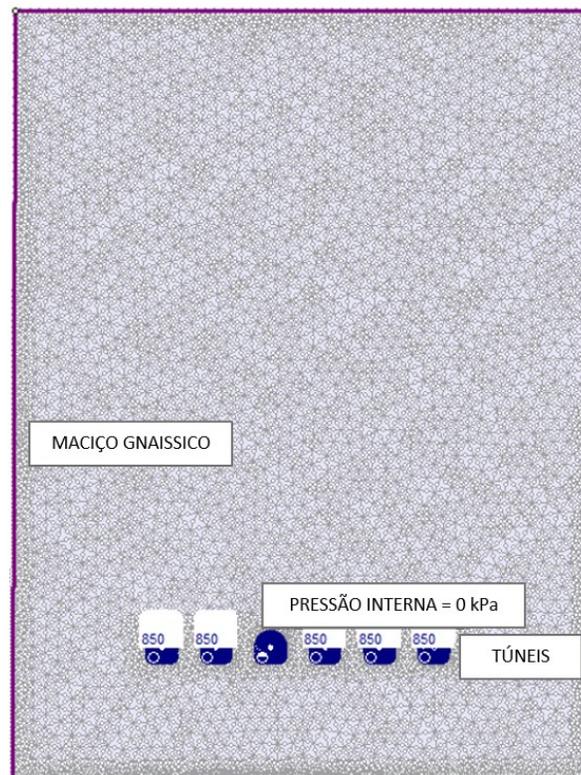


Figura 7 – Malha de elementos finitos e condições de contorno.

Fonte: Modificado de Intertechne (2014).

2.3.2 Projeto de suporte para maciços rochosos classes IV e V

O pré-dimensionamento dos tratamentos para as seções dos túneis escavados em maciços rochosos de classes IV e V foi realizado utilizando o gráfico de suporte mostrado anteriormente na Figura 5. O maciço de classe IV é caracterizado, neste projeto específico, por valores de Q variando de 0,01 a 0,3 e corresponde aos maciços em zonas de falha. Um maciço de classe V apresenta um valor de Q inferior a 0,01.

O suporte resultante para os túneis de adução é indicado abaixo:

- Classe IV ($0,01 < Q < 0,3$): Concreto projetado sistemático com 15 cm de espessura, reforçado com malha de aço, combinado com chumbadores de $\varnothing 25$ mm, 4 m de comprimento, espaçados a 1,4 m.

O projeto de suporte para escavações em maciços rochosos de classe V não foi previsto, pois essa classe não era esperada e efetivamente não ocorreu durante a construção.

É importante destacar que o tratamento pré-dimensionado tem como objetivo garantir a estabilidade das escavações durante a fase de construção. Para a fase operacional, as seções dos túneis escavados em maciços rochosos de classe IV foram projetadas para receber um revestimento estrutural composto de concreto armado. No entanto, o detalhamento do projeto do revestimento estrutural, assim como a verificação da adequação do suporte pré-dimensionado para a fase de construção, está fora do escopo deste estudo.

3. Resultados e discussão

As análises indicaram que o suporte previsto para os maciços rochosos de classes II e III é suficiente para estabilizar todas as cunhas potenciais, no caso de carregamento de final de construção, alcançando fatores de segurança superiores a 1,50, o fator de segurança mínimo exigido para o Caso de Carregamento I. A análise foi realizada utilizando o software Unwedge mencionado anteriormente.

O programa Unwedge realiza análises de estabilidade de cunhas para todas as combinações possíveis de descontinuidades. No estudo de caso, considerando as descontinuidades apresentadas no estereograma da Figura 3, foram obtidas um total de 20 combinações.

Cada combinação, composta por três famílias de descontinuidades, gera uma ou mais cunhas potenciais formadas nas paredes, na abóbada ou no piso do túnel. A posição da cunha depende da orientação das descontinuidades e da direção e inclinação do túnel. Um exemplo da formação de cunhas fornecido pelo software Unwedge é mostrado na Figura 7. A análise apresentada refere-se às cunhas formadas pela combinação das famílias de descontinuidades J1', J1 e J4, para a seção do túnel orientada a N291°.

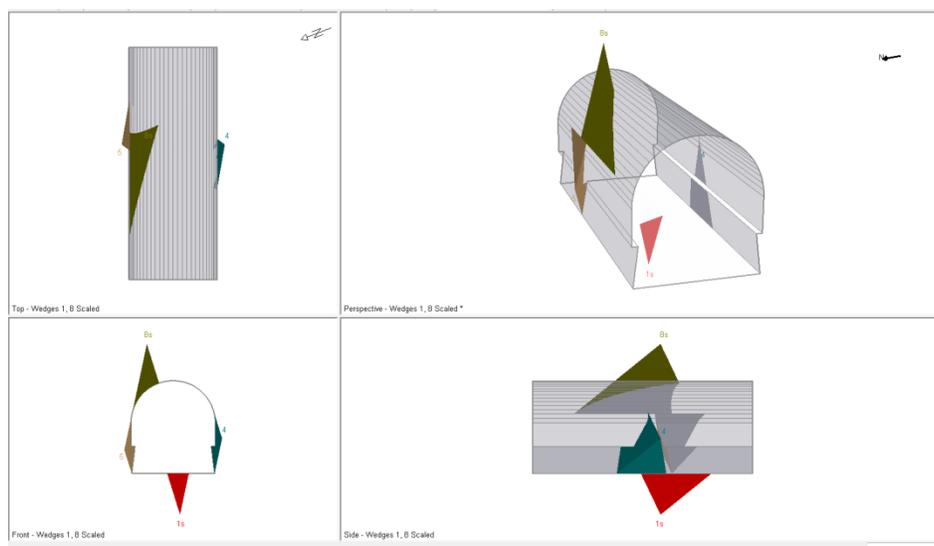


Figura 7 – Análise de cunha no Unwedge – famílias de descontinuidades J1', J1 e J4 – túnel N291°
Fonte: Intertechne (2014).

Para cada combinação de famílias de descontinuidades, há uma cunha crítica que, dependendo de seu tamanho e posição ao longo do perímetro da escavação, exige a maior pressão de suporte para ser estabilizada. Essas cunhas são formadas na abóbada e nas porções superiores das paredes do túnel.

Um resumo dos resultados obtidos para o caso de carregamento de final de construção, apresentando a porcentagem de formação de cunhas em cada porção da seção transversal do túnel, é mostrado na Figura 8.

Como pode ser observado nos resultados apresentados na Figura 8, para os túneis de adução de Laúca, a maioria das cunhas críticas é formada na abóbada e nas partes mais altas das paredes. Para o túnel orientado a N 291°, a região superior esquerda da seção transversal é a zona crítica. Quando o túnel está orientado a N 244°, a zona crítica se concentra na área da abóbada e na parede superior direita.

Para a porção dos túneis orientada a N 291°, independentemente da classe do maciço rochoso, a cunha que determinou o tratamento geotécnico, devido à necessidade de maior pressão de suporte para estabilizar o bloco rochoso, foi a formada pelas descontinuidades J1'-J3-J4, localizada na abóbada. Para as seções do túnel orientadas a N 244°, a cunha crítica foi formada pelas descontinuidades J1-J4-J2, localizada na porção superior direita da seção transversal.

Como se observa, o local com o maior número de formações de cunhas não corresponde necessariamente ao local onde ocorre a cunha mais crítica.

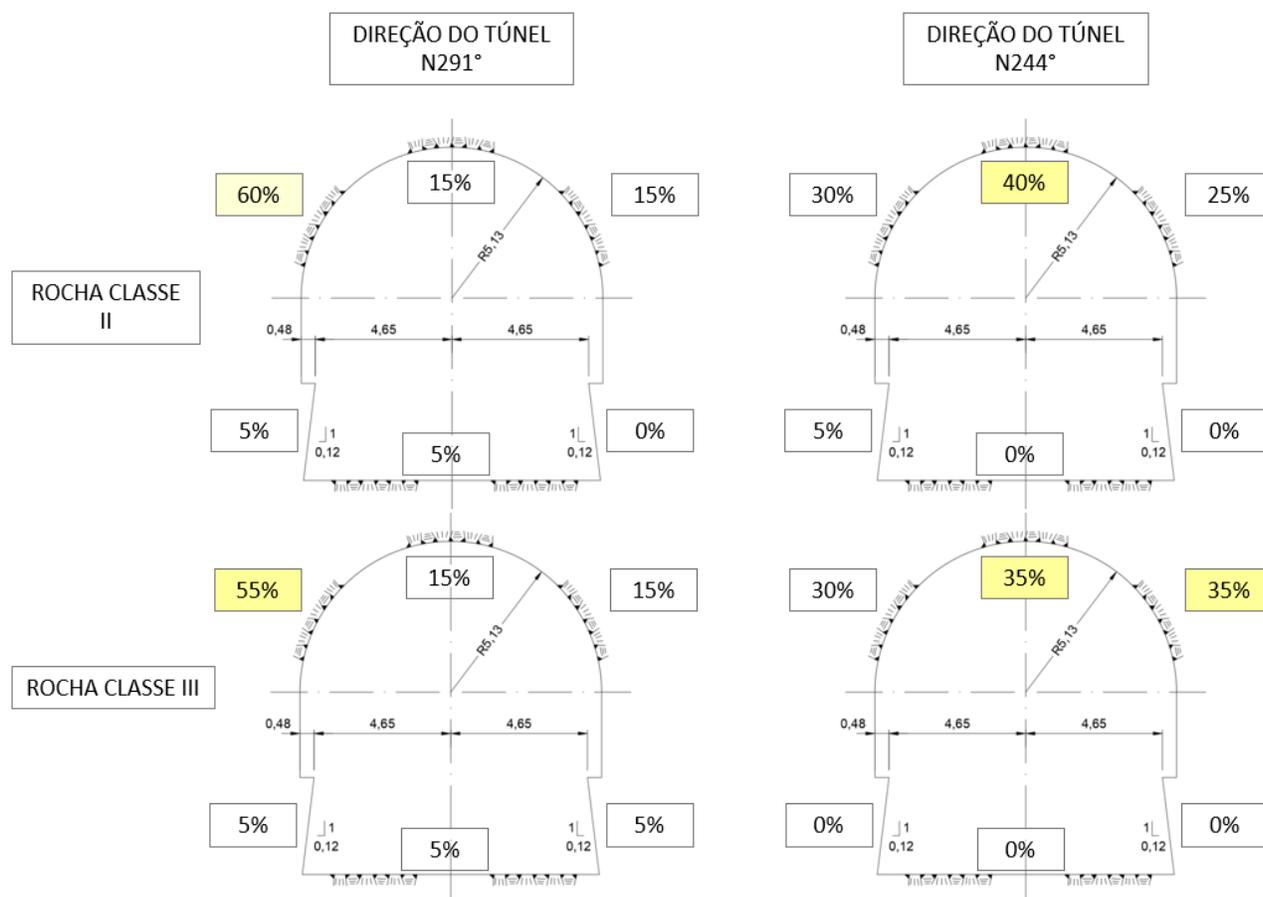


Figura 8 – Análise de cunha para o Caso de Carregamento I – Resumo dos resultados – Local de formação de cunhas instáveis.

Fonte: Autores (2024).

Para o Caso de Carregamento II, o modelo de elementos finitos indicou que as poro-pressões estão elevadas, atingindo 500 kPa a 3,5 m da face de escavação do túnel (Figura 9). Esses valores de poro-pressões foram importados diretamente para o programa Unwedge, onde foi realizada uma análise de estabilidade.

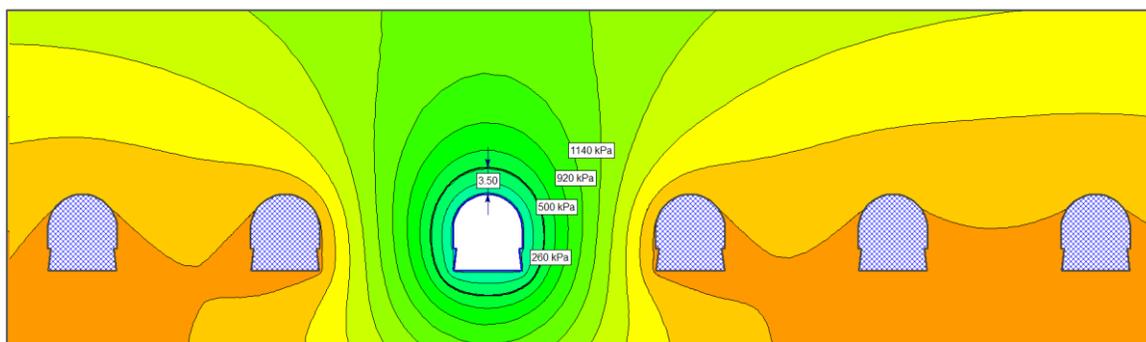


Figura 9 – Isolinhas de poro-pressão considerando túneis sem sistema de drenagem.

Fonte: Intertechne (2014a).

Concluiu-se que, para garantir o fator de segurança mínimo exigido para este caso excepcional, apenas a redução do espaçamento entre os chumbadores não seria suficiente. A solução para estabilizar as cunhas consistiu, então, em reduzir as poro-pressões.

A redução das poro-pressões foi alcançada com o uso de um sistema de drenagem ao redor das escavações dos túneis. Por padrão, o sistema de drenagem consistia em drenos de 2 m de comprimento, perfurados em um padrão de 2,0 x 2,0 m em maciços rochosos de classe III. Para maciços rochosos de classe II, o espaçamento indicado era de 2,5 x 2,5 m. O sistema de drenagem garantiu um fator de segurança mínimo de 1,30 nas análises de cunha.

A análise considerando a atuação dos drenos envolveu a modelagem de uma região de 2 metros de espessura ao redor das escavações, onde a permeabilidade foi aumentada de $3,10^{-8}$ m/s para $1,10^{-3}$ m/s, a fim de simular o efeito dos drenos. Detalhes do modelo numérico revisado, incorporando o efeito dos drenos, bem como os resultados obtidos da nova análise, são apresentados na Figura 10.

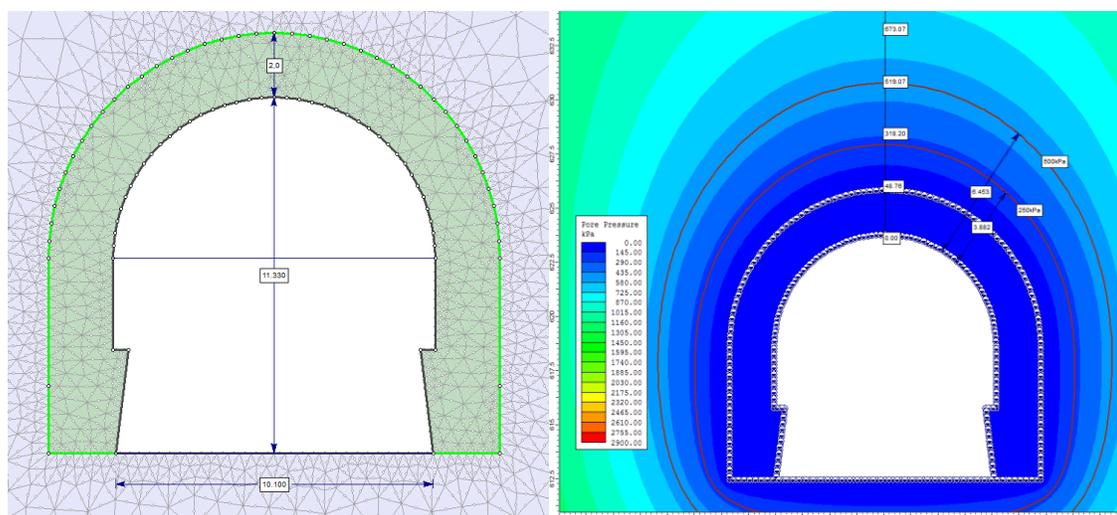


Figura 10 – Detalhe do modelo numérico e isolinhas de poro-pressão considerando túneis com sistema de drenagem.

Fonte: Intertechne (2014a).

Os resultados da poro-pressão ao redor das escavações de túneis vazios indicaram valores mais baixos em comparação com os obtidos sem a implementação do sistema de drenagem. Com a inclusão de drenos, uma poro-pressão de 500 kPa é alcançada a 6,45 m da face de escavação, enquanto anteriormente, esse valor era atingido a apenas 3,5 m de distância.

Com a distribuição atualizada da poro-pressão, foi realizada uma análise de estabilidade de cunhas ao redor da seção escavada dos túneis. Um exemplo de análise de cunha realizada no Unwedge, incorporando os dados de poro-pressão importados, é mostrado na Figura 11. A análise apresentada refere-se às cunhas formadas pela combinação das famílias de descontinuidades J1', J3 e J4, para a seção do túnel orientada a N291°, escavada em um maciço rochoso de classe II.

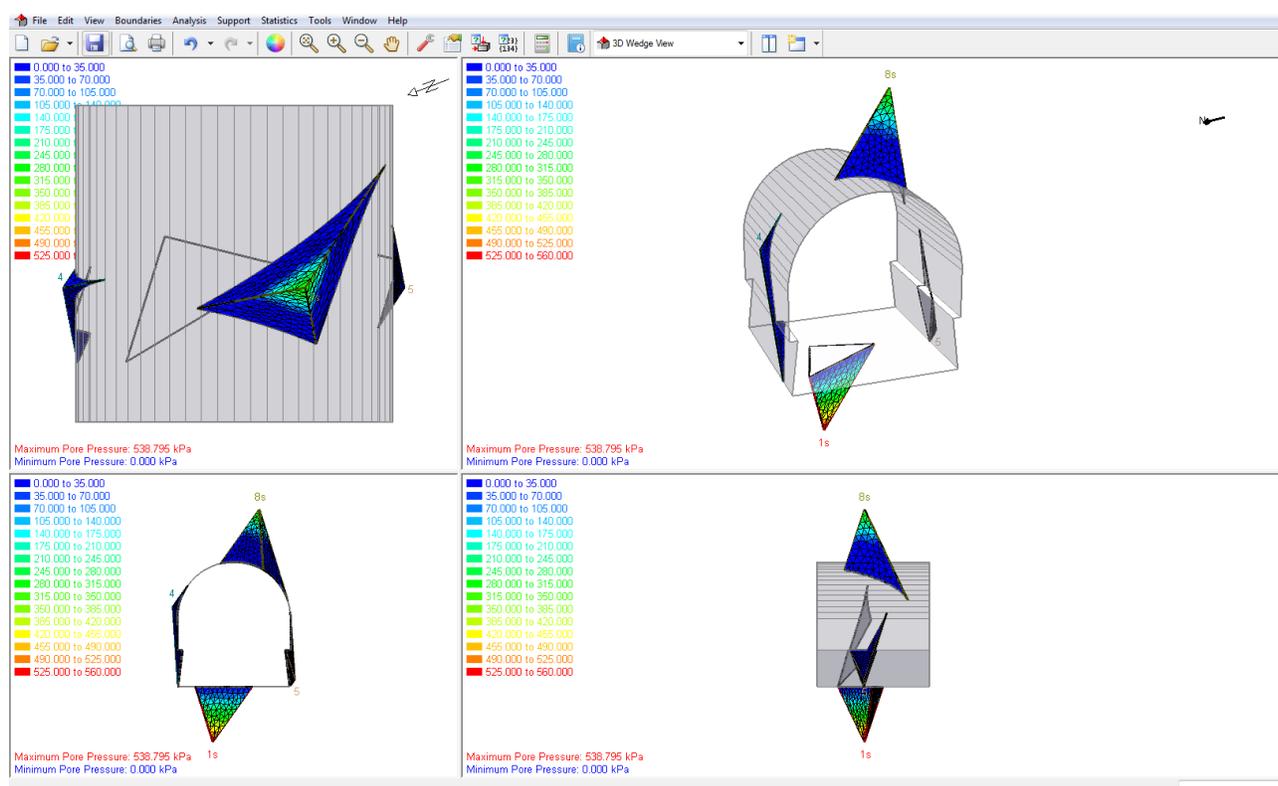


Figura 11 – Análise de cunha - Caso de Carregamento II - Fluxo permanente
Fonte: Intertechne (2014a).

O sistema de drenagem proposto mostrou-se eficaz nas análises, garantindo altos fatores de segurança para a maioria das combinações de descontinuidades. No entanto, duas cunhas formadas pelas famílias de descontinuidades J1'-J3-J4 (Túnel N291°) e J3-J5-J4 (Túnel N244°), em maciço rochoso de classe II, necessitaram de reforço no tratamento geotécnico previamente estimado. Vale ressaltar que a combinação J1'-J3-J4 (Túnel N291°) também foi crítica para o projeto do suporte geotécnico no Caso de Carregamento I.

O reforço necessário envolveu o aumento da espessura do concreto projetado de 8 cm para 15 cm para a combinação de descontinuidades J1'-J3-J4. Para a cunha formada pela combinação J3-J5-J4, em vez de implementar o tratamento recomendado para maciço rochoso de classe II, foi necessário aplicar o tratamento especificado para maciço rochoso de classe IV.

4. Considerações Finais

Este artigo abordou os principais aspectos do projeto de suporte geotécnico dos túneis de adução da Usina Hidrelétrica de Laúca.

A Usina Hidrelétrica de Laúca está localizada na Província de Malange, em Angola. A capacidade total instalada é de 2070 MW, dos quais 2004 MW são gerados na casa de força principal e 70 MW na casa de força ecológica, localizada na base da barragem. Em 2017, ano em que a primeira unidade geradora entrou em operação, a capacidade total instalada do sistema elétrico angolano era de 3.925 MW. Em outras palavras, a usina de Laúca sozinha representaria mais de 30% da capacidade total instalada do país.

Dada a sua grande importância, garantir um sistema de geração robusto e obras de construção seguras foi essencial para o sucesso do projeto.

O circuito de geração do projeto é configurado com seis tomadas de água, shafts circulares, túneis de adução com média de 1.900 metros de comprimento cada, e uma caverna de casa de força abrigando seis unidades geradoras.

Os túneis têm uma seção transversal de aproximadamente 103 m² e um pilar de rocha de 20 m entre eles e não possuem revestimento de concreto na maior parte de sua extensão, mesmo sendo submetidos a uma pressão externa de 240 m.c.a do reservatório. O revestimento de concreto armado foi necessário apenas em trechos onde as escavações de gnaiss cruzaram zonas de falha, onde o maciço rochoso estava em pior condição.

Para os trechos restantes, escavados em maciço rochoso de gnaiss competente, onde o comportamento e a segurança das escavações são governados pelas descontinuidades dentro do maciço rochoso, tratamentos com chumbadores e concreto projetado foram suficientes para alcançar os fatores de segurança exigidos para este tipo de obra.

O projeto de suporte geotécnico foi feito para dois casos de carregamento: Fim de Construção e Fluxo Permanente, considerando um túnel vazio e os outros túneis em operação.

Um sistema de drenagem também foi previsto para permitir a redução da poro-pressão ao redor da seção transversal da escavação e garantir um desempenho satisfatório durante o esvaziamento dos túneis.

Apesar da alta qualidade do maciço rochoso, a incorporação de um sistema de drenagem ao redor das escavações dos túneis provou ser de grande importância na redução da necessidade de tratamento geotécnico. Embora a condição de esvaziamento do túnel não ocorra com frequência, considerar essa possibilidade durante a fase de projeto provou ser crucial, pois alguns túneis já foram esvaziados devido a necessidades de construção e operação.

O Túnel de Adução 1 entrou em operação em julho de 2017, o Túnel 2 em outubro de 2017 e o Túnel 3 em fevereiro de 2018. Durante a operação dos túneis 1 a 3, a infiltração nos túneis vazios foi baixa. No entanto, nos trechos onde foram detectadas falhas no mapeamento geológico, pinos de convergência e piezômetros foram instalados para monitoramento de deformações ao redor da escavação dos túneis vazios. Os piezômetros instalados estavam secos durante o período de monitoramento e as medidas de convergência não mostraram variação.

O Túnel 4 entrou em operação mais tarde, em novembro de 2018. No ano seguinte, 2019, o Túnel 05 teve seu primeiro enchimento em maio e em novembro de 2020 o último túnel, Túnel 6, entrou em operação.

Alguns túneis tiveram que ser esvaziados por razões operacionais. Após essas ocorrências, as inspeções dos túneis não mostraram danos ao piso ou quedas de cunhas de rocha. Os túneis esvaziados foram inspecionados e não houve danos à seção escavada ou ao revestimento do piso, o que indica que as considerações de projeto são válidas.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Intertechne Consultores e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC/UFPR – pelo apoio na realização deste estudo.

Referências

- A'ssim, A.; Xing, Z. Y. Most Used Rock Mass Classifications for Underground Opening. *American J. of Engineering and Applied Sciences* 3: 403-411, 2010. Available at: [https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=b5dd72bfb4a1e9c5db4a681af64bb27380fba64#:~:text=The%20Excavation%20Support%20Ratio%20\(ESR,10%20years.](https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=b5dd72bfb4a1e9c5db4a681af64bb27380fba64#:~:text=The%20Excavation%20Support%20Ratio%20(ESR,10%20years.) Accessed on 02/01/2025.
- Alejano, L.R. Rock Mass Classification Systems: A Useful Rock Mechanics Tool, Often Misused. *Rock Mech Rock Eng*, 2024. <https://doi.org/10.1007/s00603-024-04087-y>
- Barton, N., Chou, D. The Shear Strength of Jointed Rock Masses. *Rock Mechanics*, 12(3), 183–202, 1979.
- Barton, N.; Lien, R.; Lunde, J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics* 6, 189–236, 1974. <https://doi.org/10.1007/BF01239496>
- Cundall, P. A.; Hart, R. D. Numerical Modelling of Discontinuous Rock. *Proceedings of the 33rd U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*. American Rock Mechanics Association, 1992.
- Fiori, A. P.; Carmignani, L. *Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes*. São Paulo, 2015. 576 p.
- Gray, D. H.; Parry, R. *Geotechnical Engineering for Mine Waste Storage Facilities*. AK Leiden, The Netherlands: CRC Press, 1999.

- Hoek, E. *Practical Rock Engineering*. 2007. Available at: <https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/Practical-Rock-Engineering-Full-Text.pdf>. Accessed on 02/01/2025.
- Hoek, E.; Kaiser, P. K.; Bawden, W. F. *Support of Underground Excavations in Hard Rock*. Rotterdam: Balkema, 1995. 228 p.
- Hoek, E.; Marshall, J. The effect of Discontinuities on the Stability of Underground Excavations in Rock. *Geotechnical Engineering*, 27(4), 87–108, 1976.
- Intertechne. Circuitos de geração – Túneis de Adução – Geral – Tratamentos Geotécnicos – Memória de Cálculo. AHL-MC4-07B08-0001, 2014a.
- Intertechne. Projeto executivo – Circuito de geração principal – Túnel de adução – Geral – Escavações – AHL-DE4-07B07-0012, 2014b.
- Katereniuk, S. B. *Avaliação da resistência ao cisalhamento de discontinuidades em metarenito, metasiltilito e gnaiss e aplicação de método probabilístico à estabilidade de taludes*. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Curitiba, 2022.
- MINEA. Ministério da Energia e Águas. *Angola Energia 2025 – Visão de Longo Prazo para o Sector Eléctrico*. Supervisão: Joaquim Ventura. MINEA, 2014. Available at: https://angolaenergia2025.gestoenergy.com/sites/default/files/editor/livro_angola_energia_2025_baixa.pdf. Accessed on 02/01/2025.
- NGI. The Norwegian Geotechnical Institute. *Using the Q-system – Rock mass classification and support design*. Oslo, 2022. Available at: https://www.ngi.no/globalassets/bilder/forskning-og-radgivning/bygg-og-anlegg/handbook-the-q-system-may-2015-nettutg_update-june-2022.pdf. Accessed on 02/01/2025.
- Rocscience. *DIPS – Graphical and Statistical Analysis Software for Orientation Data*. 2025. Available at: <https://www.rocscience.com/software/dips>. Accessed on 02/01/2025a.
- Rocscience. *RS2 – 2D Finite Element Analysis Software*. 2025. Available at: <https://www.rocscience.com/software/rs2>. Accessed on 02/01/2025b.
- Rocscience. *UnWedge – Underground 3D Wedge Stability Analysis Software*. 2025. Available at: <https://www.rocscience.com/software/unwedge>. Accessed on 02/01/2025c.
- Thá, P.C.; Katereniuk, S.B.; Kraemer, S.M.; Kenzo, P.; Estevão, E.D. Projeto geotécnico da encosta do pátio dos transformadores e comportas – Aproveitamento Hidrelétrico de Laúca. *VII Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas – COBRAE 2017*. Florianópolis, 2017.
- Vallejo, L.I.G.; Ferrer, M.; Ortuño, L.; Oteo, C. *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación, 2002.
- Wittke, W. *Rock Mechanics: Theory and Applications with Case Histories*. Berlin: Springer-Verlag, 1990.
- Wyllie, D. C.; Mah, C. W. *Rock Slope Engineering - Civil and Mining*. London and New York: Spon Press, 2004.
- Zienkiewicz, O. C.; Taylor, R. L.; Zhu, J. Z. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. Elsevier, 2005.