

Projeto da geometria de escavação e tratamentos geotécnicos da ombreira direita da barragem do Aproveitamento Hidrelétrico de Laúca

Soraia Bastos Katereniuk
Intertechne Consultores, Curitiba, Brasil, sbk@intertechne.com.br

Pedro de Carvalho Thá
Intertechne Consultores, Curitiba, Brasil, pdct@intertechne.com.br

Davi Alfredo Maranesi
Intertechne Consultores, Curitiba, Brasil, dam@intertechne.com.br

Sérgio Montenegro Kraemer
Intertechne Consultores, Curitiba, Brasil, smkr@intertechne.com.br

Sultan Mattar Júnior
Odebrecht Engenharia e Construção Internacional, Curitiba, Brasil, mattarjr@odebrecht.com

Elias Daniel Estevão
Gabinete de Aproveitamento do Médio Kwanza, Luanda, Angola, daniellestevao@hotmail.com

RESUMO: O Aproveitamento Hidroelétrico de Laúca está localizado em Angola, no Continente Africano, distante aproximadamente a 300 km de Luanda, capital do país. O arranjo geral do empreendimento consiste em uma barragem de concreto compactado com rolo, para fechamento do rio, associada com um vertedouro. O circuito de geração é formado por uma tomada de água, seis túneis de adução com aproximadamente 1900 m de extensão cada, central principal subterrânea, seis túneis de fuga e um canal de fuga. A barragem possui 132 metros de altura e foi projetada para interromper o fluxo natural do rio Kwanza e possibilitar a formação do reservatório. Será fundada, no leito do rio, em maciço integralmente gnáissico. Nas ombreiras, a porção superior do maciço é composta principalmente por rochas metassedimentares (metarenito silicificado, metarenito poroso e metassiltito), seguidas por maciço gnáissico. As escavações necessárias para assentamento da barragem nas ombreiras foram definidas observando-se os seguintes condicionantes: necessidade de incorporação de acesso de construção; condições geológico-geotécnicas; divisão racional dos blocos da barragem de CCR e processo executivo das escavações. De maneira geral o projeto de escavação propõe taludes com altura de 10 e 12 metros, bermas com largura de 0,5; 3,0 e 8,0 metros e inclinação de 0,3H:1,0V e 0,17H:1,0V. O presente artigo descreve a metodologia empregada para o dimensionamento do tratamento geotécnico proposto para estabilização das escavações para a ombreira direita da barragem. Para o dimensionamento do tratamento geotécnico verificou-se a estabilidade local das escavações através de análises de ruptura planar, por cunha e por tombamento; e a estabilidade global através de análises de equilíbrio limite. O tratamento geotécnico resultante das análises efetuadas indicou aplicação sistemática de concreto projetado reforçado com fibras, para estabilização de pequenas cunhas. Para regiões sujeitas ao peso próprio do barramento, sem confinamento lateral, o tratamento geotécnico fez uso de ancoragens passivas, além do concreto projetado reforçado com fibras.

PALAVRAS-CHAVE: Escavação, Tratamento geotécnico, Taludes rochosos, Barragem.

1 INTRODUÇÃO

Projetado para se tornar a principal fonte geradora de energia do sistema elétrico angolano, o Aproveitamento Hidroelétrico de Laúca, que tem previsão de conclusão para o ano de 2017, terá capacidade total instalada de 2070 MW. O empreendimento aproveita o desnível natural do rio Kwanza, de aproximadamente 100 metros, que ocorre ao longo de 2 km de extensão neste rio.

Para formação do reservatório, uma barragem de concreto compactado com rolo (CCR) de 132 metros de altura foi projetada sobre o leito do rio Kwanza. No vale escolhido para materializar o barramento, ambas as margens são formadas por uma encosta natural com mais de 100 metros de altura.

A fundação da barragem, no leito do rio, se dá integralmente em maciço gnáissico. Nas ombreiras, o encosto da barragem ocorre em maciço metassedimentar e maciço gnáissico. As escavações necessárias para o assentamento da barragem nas margens do vale foram definidas observando-se os seguintes condicionantes: necessidade de incorporação de acesso de construção, condições geológico-geotécnicas, divisão racional dos blocos da barragem de CCR e processo executivo das escavações.

Após definida a geometria dos taludes de escavação, os tratamentos geotécnicos foram dimensionados levando-se em consideração a estabilidade global da escavação bem como a estabilidade de possíveis blocos e cunhas formados pela combinação de descontinuidades presentes no maciço rochoso.

Nesse contexto, o presente artigo objetiva descrever a metodologia empregada no dimensionamento do tratamento geotécnico das escavações em rocha bem como discorrer sobre os fatores condicionantes para determinação da geometria das escavações.

2 ASPECTOS GEOLÓGICOS

2.1 Geologia local

A região do aproveitamento é composta na sua parte superior por rochas metassedimentares

(metarenito silicificado, metarenito poroso e metasiltilito) e na parte inferior por rochas cristalinas mais antigas, predominantemente gnaisses.

Na área da barragem as ombreiras são compostas por rochas metassedimentares, com os níveis de arenitos silicificados na porção superior, seguidas de intercalações de siltitos e arenitos. A transição entre os arenitos e o gnaiss é caracterizada por um pacote de siltito finamente estratificado, sobreposto a um nível basal de brecha conglomerática. No sopé das escarpas ocorrem depósitos de tálus e colúvios quaternários que encobrem em grande parte o contato do gnaiss com os metassedimentos.

2.2 Geologia estrutural

Durante as escavações do canal de aproximação dos túneis de desvio, etapa anterior às escavações da obreira direita da barragem, foi realizado o mapeamento estrutural das descontinuidades observadas nas porções expostas do maciço. Foram tomadas medidas de orientação e características geomecânicas das diferentes descontinuidades detectadas. Os dados coletados foram: direção do mergulho e mergulho das descontinuidades, espaçamento, continuidade, rugosidade, abertura, preenchimento, presença de água e resistência das paredes das descontinuidades.

Esses dados foram analisados e tratados estatisticamente, através de projeção estereográfica, para obtenção de estereogramas específicos para cada litologia observada na região.

A metodologia empregada consiste em representar todos os pólos das descontinuidades medidas, obtendo em seguida as isolinhas de concentração de pólos. Posteriormente, delimitam-se as áreas de maior densidade de pólos e, de modo estatístico, obtém-se o pólo médio representativo de cada família de descontinuidade. (S0, F0, J1, etc.).

Nas figuras 1 a 3 são apresentados os estereogramas utilizados nas análises de estabilidade local, para maciço de metarenito, metassiltito e gnaiss alterado.

3 CRITÉRIOS DE ESCAVAÇÃO

Os critérios propostos para as escavações da ombreira direita foram definidos de forma a conciliar as condicionantes geológico-geotécnicas, racionalidade e estabilidade da barragem de CCR e atendimento ao cronograma de obra.

Do ponto de vista geológico foi necessário prever uma escavação suficiente para remover as porções de maciço mais alterado e aliviado, associadas à proximidade da encosta natural.

Em função da exiguidade de espaço para o desenvolvimento de acessos de construção e para o atendimento ao cronograma de obra foi necessária a incorporação de acessos de construção na escavação da ombreira, pelas seguintes razões: permitir a chegada dos equipamentos nas frentes de serviços; garantir a manutenção dos equipamentos utilizados na construção da barragem e possibilitar o transporte do concreto convencional.

A incorporação deste acesso resultou em benefícios não só do ponto de vista do tempo de execução mas também contribuiu para a estabilidade das escavações devido a adição de bermas entre taludes.

Esse acesso é materializado por três rampas com inclinação de 15%, largura de 8 m, ascendentes na direção montante-jusante, que vão das elevações 760,0 a 784,0 ; 784,0 a 808,0 e 808,0 para 840,0 m.

O projeto do maciço da barragem de CCR necessitou de estudo conjunto com o projeto de escavação para que houvesse compatibilidade com as rampas de acesso e para assegurar a divisão mais adequada dos blocos da barragem, garantindo condições de estabilidade consistentes e seguras.

A geometria de escavação resultante deste processo é ilustrada na Figura 4 apresentada na sequência.

Os taludes nos quais se dará o encosto da barragem possuem direção de mergulho de 170° e, simplificada, 12 m de altura, inclinação de 0,17H:1,0V, intercalados por bermas de largura de 0,5 ou 8 m.

Os taludes de jusante possuem direção de mergulho de 106° , acima da EL. 760,0 m, e 90° em elevações inferiores. De maneira geral possuem inclinação de 0,3H:1,0V, altura de 12

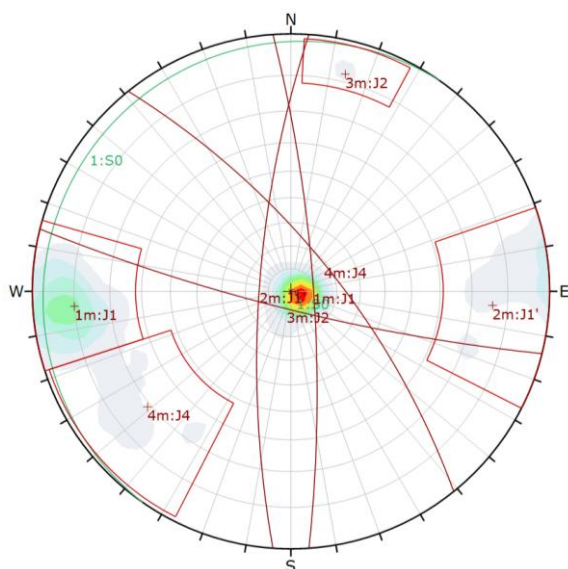


Figura 1. Estereograma para Metarenito - Acima da El.

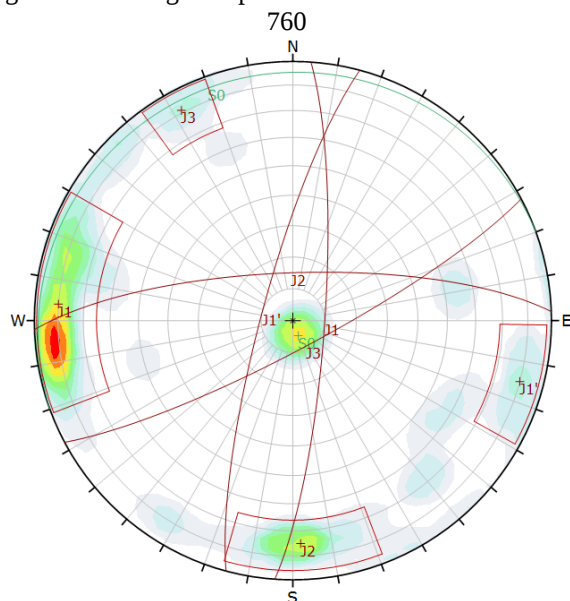


Figura 2. Estereograma para Metasiltito - Entre as El. 760 e 748,5

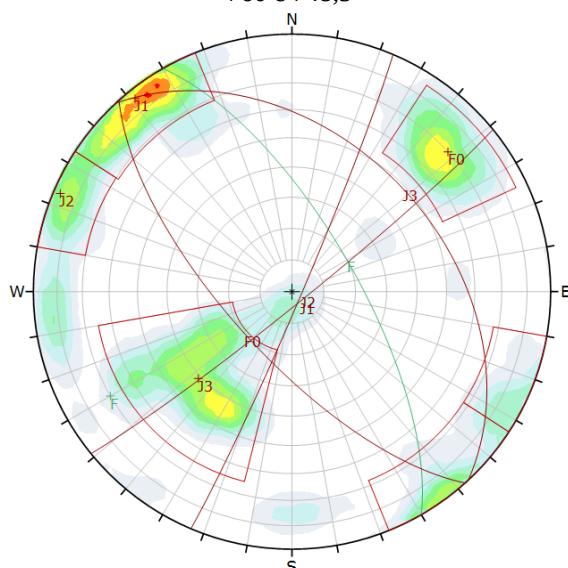


Figura 3. Estereograma para Gnaiss Alterado - Abaixo da El. 748,5

m e largura de bermas de 0,5 ou 3 m.

Os taludes de montante seguem o mesmo critério definido para os taludes de jusante,

porém com direção de mergulho de 233° e 260° .

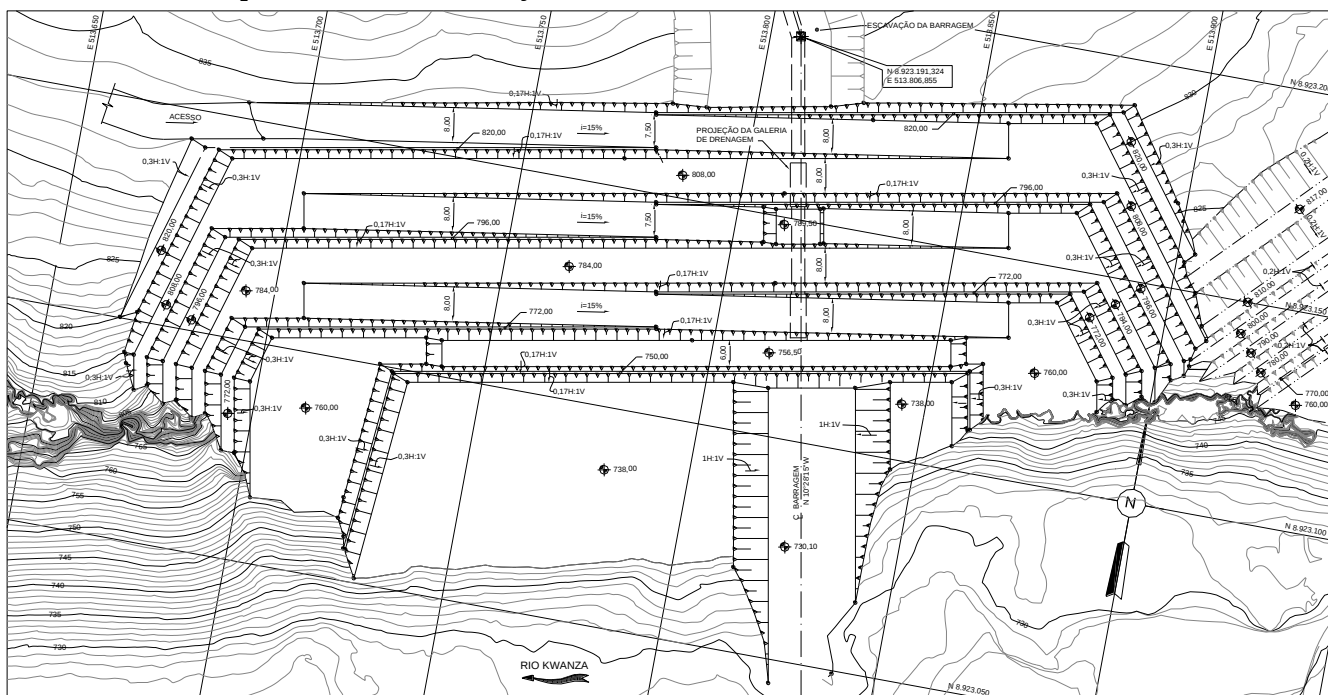


Figura 4. Escavações da ombreira direita da barragem de CCR

4 AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE LOCAL DAS ESCAVAÇÕES

A estabilidade local foi avaliada considerando as estruturas presentes no maciço, tais como foliações, estratificação, etc. Utilizando os estereogramas definidos para cada litologia foram feitas análises cinemáticas buscando identificar os possíveis modos de ruptura para as diferentes direções e inclinações das escavações. Estas análises foram realizadas com o software Dips, e avaliaram a possibilidade de ocorrência de ruptura do tipo planar, por cunha ou por tombamento.

Os resultados indicaram que para nenhum caso há probabilidade de ruptura planar ou por tombamento. Houveram apenas apontamentos para formação de possíveis cunhas.

Uma vez detectada a possibilidade de ocorrência de tal mecanismo de ruptura, foram avaliados os tratamentos necessários à garantia da estabilidade, utilizando o método de equilíbrio limite, com o software Swedge.

As potenciais cunhas foram avaliadas quanto a sua estabilidade considerando os diversos carregamentos aos quais o talude estará submetido durante sua vida útil.

Os casos de carregamento considerados foram: Final de Construção, Operação, Sismo e Rebaixamento Rápido. O caso de Rebaixamento Rápido foi considerado apenas para os taludes a montante da barragem.

O modelo constitutivo utilizado para representar a resistência das discontinuidades foi o de Mohr-Coulomb, com coesão nula. O ângulo de atrito inicialmente foi estimado de maneira empírica, através dos parâmetros J_r e J_a de Barton (1974). Os parâmetros J_a e J_r indicam a rugosidade, a alteração e o preenchimento das paredes das discontinuidades.

Nos trechos em arenito, as discontinuidades foram descritas como planas e rugosas, com contato rocha-rocha, paredes sãs, oxidadas ou levemente alteradas. As discontinuidades observadas no siltito foram descritas como planas e lisas, levemente alteradas. As discontinuidades observadas no gnaiss alterado foram descritas como planas e rugosas com paredes alteradas. Na Tabela 1 são mostrados os ângulos de atrito estimados em função dos valores de J_r e J_a .

Para o arenito, a faixa situa-se entre 63° e 37° . Para o siltito, o valor sugerido é de 27° .

Para o gnaíse alterado o valor está entre 21° e 27°.

Tabela 1. Estimativas de ângulo de atrito em função de Jr e Ja – (Barton et al, 1974)

Contato entre as paredes de rocha	Ja					
	Jr	0,75	1,0	2,0	3,0	4,0
Descontínuas	4,0	79°	76°	63°	53°	45°
Rugosas, onduladas	3,0	76°	72°	56°	45°	37°
Suaves, onduladas	2,0	69°	63°	45°	34°	27°
Polidas, onduladas	1,5	63°	56°	37°	27°	21°
Rugosas, planas	1,5	63°	56°	37°	27°	21°
Lisas, planas	1,0	53°	45°	27°	18°	14°
Polidas, planas	0,5	34°	27°	14°	9,5°	7,1°

Em campo, efetuou-se um levantamento dos parâmetros JRC (*joint roughness coefficient*) e JCS (*joint compressive strength*) da envoltória de resistência de Barton-Bandis. O ângulo de atrito residual foi estimado com base em referências da literatura. Os valores obtidos são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros da envoltória de Barton-Bandis

Litologia	JRC	JCS (MPa)	ϕ_r (°)
Metarenito silicificado	9,8	108	30
Metarenito poroso	11,3	31	27
Metasiltito	4,1	68	15
Gnaíse	8,7	105	30

Posteriormente, ensaios de cisalhamento direto foram realizados em discontinuidades de testemunhos de sondagens. Os pares de valores de tensão normal e cisalhante obtidos foram comparados com as envoltórias de Mohr-Coulomb e Barton-Bandis avaliadas anteriormente. Os resultados são mostrados nas Figuras 5 a 8.

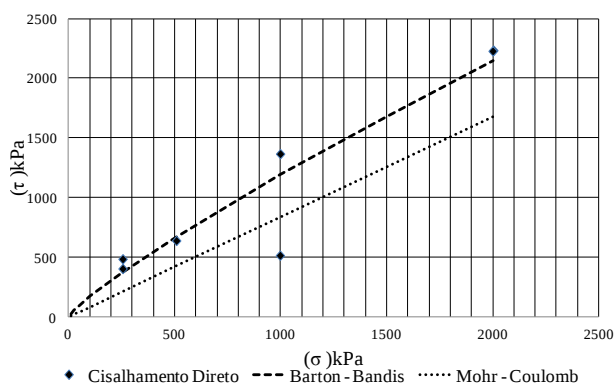


Figura 5 – Envoltórias de resistência para o metarenito silicificado.

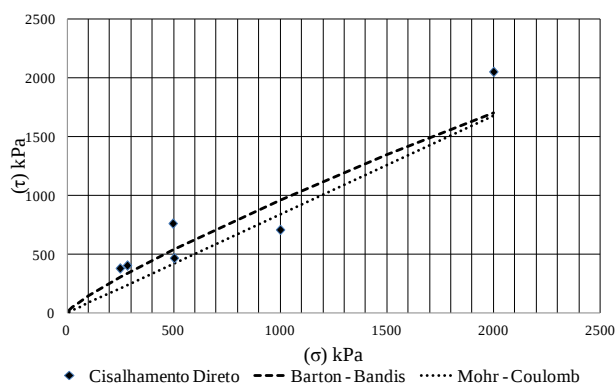


Figura 6 – Envoltórias de resistência para o metarenito poroso

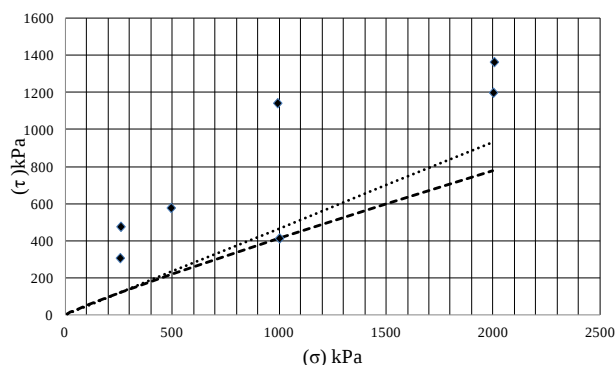


Figura 7 – Envoltórias de resistência para o metasiltito

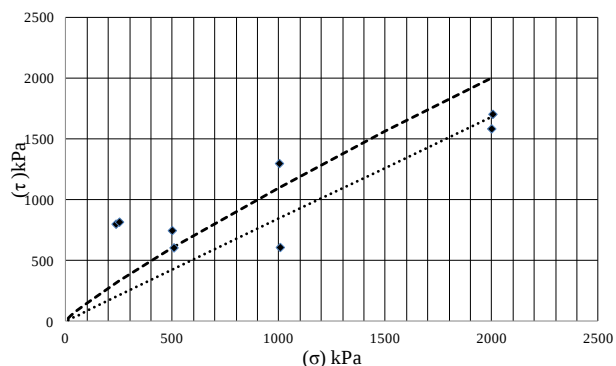


Figura 8 – Envoltórias de resistência para o gnaíse

Nota-se que para todas as litologias a envoltória de Mohr-Coulomb é inferior à envoltória de Barton-Bandis e aos resultados dos ensaios de cisalhamento direto. Conservadoramente, nas análises de estabilidade foi adotado um valor de ângulo de atrito de 40° para as discontinuidades de metarenitos (poroso e silicificado), 25° para as discontinuidades do siltito e 21° para o gnaíse alterado, com modelo constitutivo de Mohr-Coulomb.

Durante as análises de equilíbrio limite, quando detectada a necessidade de aplicação de algum tipo de tratamento geotécnico, foi especificada a aplicação de concreto projetado

com espessura mínima de 8 cm e resistência de 21 MPa aos 28 dias. Este tratamento foi suficiente para estabilização das diversas potenciais cunhas.

Sempre que o tratamento geotécnico considerou uso de concreto projetado foi especificada a execução de drenos barbacãs para evitar ocorrência de poropressões sobre este revestimento.

Uma análise diferenciada teve que ser realizada para uma porção do talude com direção de mergulho de 170°, pois em uma faixa de pouco mais de 22 metros o maciço da barragem de CCR assenta-se sobre a berma do talude rochoso, sem que haja contenção lateral do talude pela própria barragem.

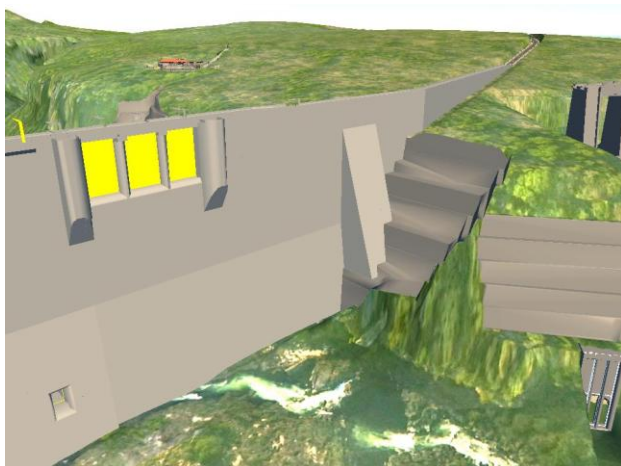


Figura 9. Detalhe do encosto da barragem no maciço.

A análise de estabilidade para esta região considerou não somente as atitudes das discontinuidades formadoras das cunhas e seus respectivos parâmetros de resistência, mas também as tensões que o maciço de CCR aplica no maciço rochoso.

Neste caso, além do concreto projetado, foi necessário recorrer ao uso de ancoragens passivas. Estas ancoragens são compostas por barras de aço CA-50, com diâmetro de 32 mm, 6 metros de comprimento, aplicadas em malha de 1,5 x 1,5 metros. O comprimento das ancoragens especificado em projeto foi definido de forma a garantir que as barras atravessassem a extensão da cunha e que seja ancorada em maciço firme. O comprimento de ancoragem mínimo foi definido observando-se o comprimento necessário para ancoragem da barra de aço na calda de cimento e também do conjunto barra + calda no maciço rochoso.

5 AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE GLOBAL DAS ESCAVAÇÕES

A estabilidade global foi avaliada admitindo-se o maciço rochoso como um meio homogêneo, contínuo, isotrópico e considerando o critério de resistência de Hoek e Brown (2002). Os parâmetros de resistência foram estimados a partir de dados obtidos nos mapeamentos geológicos de campo e nos ensaios de laboratório realizados em amostras de testemunhos de sondagens rotativas.

Foram realizados ensaios triaxiais e de compressão simples. Os resultados destes ensaios são apresentados na sequência de maneira resumida, nas tabelas 2 e 3.

Tabela 2. Média dos ensaios de compressão simples

Litologia	UCS (MPa)
Arenito Poroso	31,1
Arenito Silicificado	108,0
Gnaisse	105,1
Siltito	68,4

Tabela 3. Média dos ensaios de módulo de deformabilidade

Litologia	Módulo de Deformabilidade (GPa)
Arenito Poroso	24,4
Arenito Silicificado	36,5
Gnaisse	81,3
Siltito	36,4

Com os resultados dos ensaios triaxiais foi possível calcular o parâmetro m_i da envoltória de Hoek e Brown, com exceção do metasiltito, litologia na qual não foram realizados ensaios triaxiais.

Os valores obtidos nos ensaios foram comparados com os valores sugeridos por Hoek e Brown (1997). Quando o valor obtido nos ensaios foi superior ao sugerido por Hoek e Brown, de forma conservadora foi adotado o limite superior sugerido. Para o metasiltito foi adotado o valor médio sugerido.

Tabela 4. Valores de m_i

Litologia	Obtido nos ensaios	Sugerido Hoek e Brown
Arenito Poroso	13,6	17±4
Arenito Silicificado	23,3	17±4
Gnaisse	50,0	28±5
Siltito	-	7±2

6 CONCLUSÕES

A envoltória de resistência de Hoek e Brown para cada material foi avaliada com os parâmetros indicados na Tabela 5. Os valores de GSI (Geological Strength Index) foram avaliados a partir dos dados coletados nos mapeamentos de campo.

Tabela 5. Parâmetros de resistência

Material	GSI	UCS (MPa)	mi
Metarenito	50	108	21
Metarenito poroso	50	31,1	13
Metasiltito	50	68,4	7
Gnaise alterado	30	70,1	23
Gnaise	65	105,1	33

A estabilidade global da ombreira direita foi verificada através do método de equilíbrio limite, através do método de Spencer, com a utilização do software Slide. Os casos de carregamento analisados foram os mesmos utilizados para verificação da estabilidade local. O modelo de análise, apresentado na Figura 10, foi concebido de forma a retratar regiões com mesmo comportamento e parâmetros de resistência, segundo sua estratigrafia, com base nas sondagens realizadas no local e dados de mapeamento obtidos durante as escavações do canal de entrada.

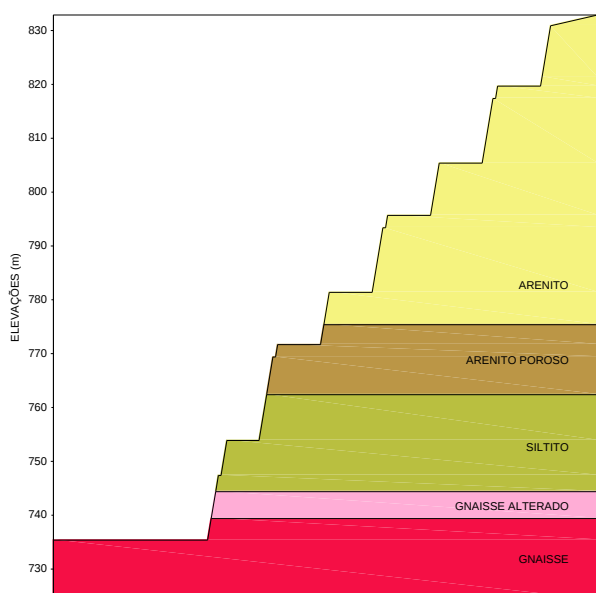


Figura 10. Estratigrafia considerada para o modelo de cálculo das análises de estabilidade globais.

Os resultados destas análises indicaram que do ponto de vista da estabilidade global, o maciço é estável sem necessidade de aplicação de nenhum tipo de tratamento.

As escavações para assentamento da barragem de CCR do Aproveitamento Hidroelétrico de Laúca, na margem direita do rio Kwanza, serão realizadas predominantemente em maciço metassedimentar composto por metarenitos silicificados, metarenitos porosos e metassiltitos. É característica deste maciço apresentar foliação metassedimentar subhorizontal, fato que contribui para o travamento de blocos instáveis, principalmente se possuírem direção de mergulho contrária à do talude de escavação.

A geometria das escavações foram definidas de forma a conciliar aspectos construtivos; como cronograma de obra e acesso para equipamentos, geotécnicos; procurando adotar alturas de bancadas e inclinações de talude compatíveis com o maciço rochoso da região; bem como compatibilização entre projeto do maciço da barragem de CCR e geológico-geotécnico das escavações.

O tratamento geotécnico para as escavações à céu aberto baseou-se nos resultados obtidos de análises de estabilidade locais, nas quais os mecanismos de ruptura estão associados às descontinuidades existentes no maciço rochoso, e análises globais.

Os parâmetros de resistência utilizados nas análises locais foram inicialmente avaliados através de métodos empíricos e posteriormente confirmados através de ensaios de laboratório e mapeamentos de campo.

Verificou-se através de análises cinemáticas que há a possibilidade de formação de cunhas potencialmente instáveis.

Para os casos de carregamento normais, a especificação de tratamento com concreto projetado reforçado com fibras, de espessura de 8 cm, é suficiente para atender os fatores de segurança exigidos.

Parte dos taludes com direção de mergulho de 170° necessitou de uma análise direfenciada no sentido de considerar que o tratamento geotécnico, além de conter o peso próprio de potenciais cunhas, deveria garantir adequado fator de segurança admitindo que o talude necessitaria suportar a ação de uma sobrecarga devido ao apoio do maciço da barragem de CCR em sua crista.

Neste caso, além do concreto projetado, foi necessário recorrer ao uso de ancoragens passivas. Estas ancoragens são compostas por barras de aço CA-50, com diâmetro de 32 mm, 6 metros de comprimento, aplicadas em malha de 1,5 x 1,5 metros.

Adicionalmente, tomou-se a precaução de indicar aplicação de concreto projetado convencional de 10 cm de espessura reforçado com tela de aço para locais onde houvesse ocorrência de maciço friável/incoerente.

Sempre que o tratamento geotécnico considerou uso de concreto projetado foi especificada a execução de drenos barbacãs para evitar ocorrência de poropressões sobre este revestimento.

As análises de estabilidade globais indicaram que não há necessidade de aplicação de suporte para a obtenção de fatores de segurança adequados para os diversos casos de carregamento.

As escavações foram iniciadas no segundo semestre de 2013 e concluídas no segundo semestre de 2014. Os trabalhos transcorreram sem nenhum incidente. A instrumentação geotécnica instalada, composta por extensômetros múltiplos de haste e marcos superficiais indica deslocamentos estabilizados, de pequena magnitude, conforme esperado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Intertechne Consultores, Odebrecht Engenharia e Construção Internacional e Gabinete de Aproveitamento do Médio Kwanza (GAMEK) pela disponibilização de informações.

REFERÊNCIAS

- Barton, N., Bandis, S. (1990). "Review of Predictive Capabilities of JRC-JCS Model in Engineering Practice, Reprinted from Barton, N. R. & Stephanson (eds), Rock Joints Proc. Of a regional conference of the International Society of Rock Mechanics, Leon, 820 pp.
- Barton, N., Lien, R., Lunde, J. (1974). Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. Rock Mechanics, Springer-verlag, Vol. 6, pp189-236.
- Bieniawski, Z.T. (1989). "Engineering rock mass classifications". New York: Wiley.
- Dips 6.0. "Graphical and Statistical Analyses of

Orientation Data". Rocscience Inc.

Hoek, E., Brown, E. T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol 34, No 8, 1997, pages 1165-1186.

Hoek, E., Carranza-Torres, C. and Corkum, B. (2002). Hoek-Brown criterion – 2002 edition. Proc. NARMS-TAC Conference, Toronto, 2002, 1, 267-273.

RocLab 1.0. "Rock Mass Strength Analysis using the Generalized Hoek-Brown failure criterion". Rocscience Inc.

Slide 6.0. "2D Limit Equilibrium Slope Stability Analysis"

Swedge 6.0. "3D Surface Wedge Analysis for Slopes". Rocscience Inc.