

Projeto Geotécnico da Encosta do Pátio de Transformadores e Comportas - Aproveitamento Hidrelétrico de Laúca

Pedro de Carvalho Thá

Intertechne Consultores, Curitiba, Brasil, pdct@intertechne.com.br

Soraia Bastos Katereniuk

Intertechne Consultores, Curitiba, Brasil, sbk@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, Brasil, mattarjr@odebrecht.com

Paulo Kenzo

Odebrecht Engenharia e Construção Internacional, Brasil, pkenzo@odebrecht.com

Elias Daniel Estevão

Gabinete de Aproveitamento do Médio Kwanza, Luanda, Angola, danielestevao@hotmail.com

RESUMO: O aproveitamento hidroelétrico de Laúca localiza-se no rio Kwanza, na província de Kwanza Norte, em Angola. A caverna da central principal está implantada no interior de um maciço rochoso nas proximidades de uma grande encosta natural, ao pé da qual estão localizados os transformadores elevadores das unidades geradoras. Na fase de projeto básico, a solução de projeto consistia na escavação completa da encosta com remoção das camadas de solo e rocha mais fraturada/alterada, ao longo de um desnível total de 200 m. Na fase de projeto executivo essa solução precisou ser alterada devido à diminuição do cronograma de implantação da obra em 1 ano. O projeto foi alterado de forma a preservar a maior extensão possível da encosta natural e permitir a execução simultânea de trabalhos em elevações diferentes. Essa alteração de projeto teve como resultado basicamente dois aspectos: redução expressiva do volume total de escavação a céu aberto e, em contrapartida, incremento substancial dos tratamentos geotécnicos em toda a área. O tratamento geotécnico das escavações, que no projeto básico era composto somente por concreto projetado e ancoragens passivas, passou a ser composto por uma ampla gama de soluções, em função da qualidade geomecânica de cada porção do maciço. As soluções utilizadas são compostas por: telas metálicas de alta resistência instaladas em toda a extensão da encosta natural na projeção do pátio dos transformadores, barreira dinâmica contra queda de blocos, parede atirantada, concreto projetado e ancoragens passivas. Todo esse tratamento geotécnico foi dimensionado de forma a garantir a segurança operacional da usina. Também foi implantado um plano de instrumentação geotécnica composto por inclinômetros, extensômetros, medidores de nível de água, células de carga e marcos superficiais. No decorrer das escavações várias adequações foram feitas em função de diferenças observadas entre o modelo geológico/geotécnico inicial e as condições efetivamente encontradas.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de Encostas, Tratamentos Geotécnicos.

1 INTRODUÇÃO

O aproveitamento hidroelétrico de Laúca localiza-se no rio Kwanza, na província de Kwanza Norte, em Angola. É composto por uma barragem à gravidade de concreto compactado com rolo, com 156 m de altura máxima e um circuito hidráulico composto por uma tomada de água, seis poços circulares, seis túneis de adução com comprimento médio de cerca de 1900 m cada um e uma central principal subterrânea, com seis grupos geradores. A potência total instalada é de 2070 MW. A caverna da central principal está implantada no interior de um maciço rochoso nas proximidades de uma grande encosta natural. Os transformadores elevadores das unidades geradoras, um para cada unidade, estão posicionados fora do maciço rochoso, no pé da encosta. A encosta possui altura superior a 200 m, desde o platô no topo da encosta (~El. 850 m) até a cota de instalação do pátio dos transformadores (El. 647 m). A Figura 1 mostra uma visão geral da área de escavação da encosta.



Figura 1. Vista das escavações, a partir da margem esquerda

Do ponto de vista geológico/geotécnico, a encosta é composta, de cima para baixo, por rochas metassedimentares (metarenitos e metassiltitos) e gnaiss (embasamento cristalino). Superficialmente, em ambas as litologias, ocorrem solos coluvionares de pequena espessura.

Devido à importância energética que Laúca representa para Angola (metade da potência total instalada), é imprescindível a manutenção da operacionalidade dos transformadores.

Na fase de projeto básico, a solução de projeto consistia na escavação completa da encosta com remoção das camadas de solo e rocha mais fraturada/alterada, desde a El. 850 m até a El. 647 m. Na fase de projeto executivo essa solução precisou ser alterada devido à necessidade de redução do cronograma de implantação da obra em 1 ano.

Com essa redução de cronograma, não havia mais tempo hábil para a execução da escavação integral da encosta. O projeto foi alterado de forma a preservar a maior extensão possível da encosta natural e permitir a execução simultânea de trabalhos em elevações diferentes. Essa alteração de projeto teve como resultado basicamente dois aspectos: redução expressiva do volume total de escavação a céu aberto e, em contrapartida, incremento substancial dos tratamentos geotécnicos em toda a área.

O tratamento geotécnico das escavações, que no projeto básico era composto somente por concreto projetado e ancoragens passivas, passou a ser composto por uma ampla gama de soluções, em função da qualidade geomecânica de cada porção do maciço. As soluções utilizadas são compostas por: telas metálicas de alta resistência instaladas em toda a extensão da encosta natural na projeção do pátio dos transformadores, barreira dinâmica contra queda de blocos, parede atirantada, concreto projetado e ancoragens passivas. Todo esse tratamento geotécnico foi dimensionado de forma a garantir a segurança operacional da usina.

Além dos tratamentos geotécnicos, também foi implantado um plano de instrumentação geotécnica composto por inclinômetros, extensômetros, medidores de nível de água, células de carga e marcos superficiais. A encosta também dispõe de um projeto de drenagem composto por dispositivos superficiais e drenos horizontais profundos.

O modelo geológico/geotécnico da encosta foi atualizado no transcorrer das escavações, com base nas informações coletadas nos mapeamentos geológicos realizados em cada avanço das escavações e em retroanálises de estabilidade. Essa atualização do modelo

geológico/geotécnico teve como resultado algumas revisões no projeto executivo dos tratamentos geotécnicos durante o progresso das escavações.

2 PROJETO EXECUTIVO INICIAL

2.1 Aspectos Geológicos

Do topo do terreno natural, até aproximadamente a El. 800 m ocorre um pacote de rochas metassedimentares composto, por metarenito silicificado, metarenito poroso e metasiltito. O metarenito silicificado se estende do topo do terreno natural até aproximadamente a El. 835 m. Entre essa elevação e aproximadamente a El. 815 m existe uma camada de metarenito poroso. O metasiltito está compreendido aproximadamente entre as elevações 815 e 800 m. A partir da El. 800 m o maciço da encosta é composto por maciço gnáissico.

O perfil de alteração do gnaiss é composto por uma camada pouco espessa, de poucos centímetros até um máximo de 3 m de solo coluvionar/tálus, sobreposto a uma sequência que vai de rochas muito alteradas/fraturadas até o gnaiss são. A espessura desse perfil de alteração do gnaiss possui espessura da ordem de 12 m.

As escavações definidas no projeto executivo se estendem aproximadamente da El. 747 m até a El. 647 m, que corresponde à plataforma dos transformadores. As escavações localizam-se, portanto, integralmente no domínio do gnaiss. Por essa razão, os maiores esforços para a caracterização do maciço ocorreram nessa zona. Na fase de projeto imediatamente anterior ao desenvolvimento do projeto executivo foram realizadas duas sondagens rotativas e uma campanha de sísmica de refração ao longo de seis seções na encosta, na região do gnaiss. Com base nas informações coletadas com essas investigações, traçou-se um perfil geológico-geotécnico da encosta. O perfil do gnaiss, região de maior interesse, é composto pelas seguintes camadas:

- Solo (H4) / gnaiss muito fraturado (H3.1): da superfície da encosta até 6 m de profundidade;
- Gnaiss fraturado (H3.2): camada

subsequente à camada mais superficial, com espessura da ordem de 6 m;

- Gnaiss medianamente fraturado (H2): camada com cerca de 9 m de espessura;
- Gnaiss são (H1): camada encontrada a cerca de 20 m da superfície da encosta.

O perfil da encosta é mostrado na Figura 2.

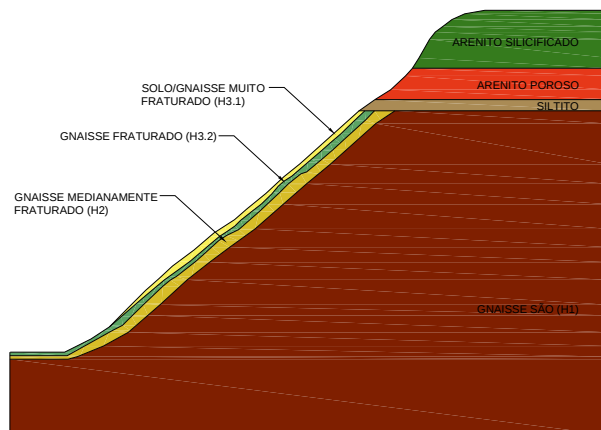


Figura 2. Perfil geológico-geotécnico da encosta

Durante a fase de projeto executivo, era prevista a execução de mais três sondagens rotativas na encosta. Durante a escavação da plataforma da primeira sondagem, houve um pequeno escorregamento, que expôs o material mais superficial (H3.1).



Figura 3. Ruptura da plataforma da sondagem

A retroanálise da ruptura da plataforma e de outra ruptura que ocorreu em região próxima, durante as escavações do acesso ao local, permitiu a aferição dos parâmetros de resistência da camada mais superficial do perfil do gnaiss (H3.1). Os parâmetros de resistência das demais camadas foram estimados com base na característica de cada material e correlações entre o GSI (Geological Strength Index) e os

parâmetros de resistência obtidos em ensaios de laboratório (compressão simples e triaxial) realizados em amostras de testemunhos de sondagens. Os parâmetros dos materiais são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos dos materiais

Material	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Solo/Gnaiss muito fraturado (H3.1)	20,0	15	35
Gnaiss fraturado (H3.2)	26,5	150	35
Gnaiss medianamente fraturado (H2)	28,0	850	50
Metarenito	26,0	400	50
Metarenito poroso	23,0	300	45
Metassilito	24,5	150	35

2.2 Geometria de escavação

As escavações obrigatórias iniciam-se aproximadamente na El. 747 m. Os taludes escavados possuem inclinação de 0,5H:1V. Com base no perfil da Figura 2, era prevista apenas uma bancada de escavação com essa geometria, a ser realizada em material H3.1, com altura máxima de cerca de 12 m. Depois dessa primeira bancada, as escavações mudavam para taludes com altura de 12 m, com inclinação de 0,17H:1V e bermas de 3 m. Essa era a geometria prevista para as escavações em materiais H3.2 e H2.

2.3 Tratamentos geotécnicos iniciais

Com base no perfil mostrado na Figura 2 e nos parâmetros indicados na Tabela 1, foram dimensionados os tratamentos geotécnicos para a encosta. Os tratamentos tiveram como premissa garantir a segurança operacional dos transformadores que serão instalados na plataforma da El. 647 m. Essa segurança operacional implica em garantir que não haja nenhum tipo de ruptura na encosta e nem a possibilidade de queda de pequenos blocos. A divisão dos tratamentos é indicada nos itens a seguir.

2.3.1 Tratamento Tipo 1

Aplica-se nas escarpas de arenito e é composto por tratamento sistemático com tela de alta resistência tipo TECCO G65 3 mm da Geobrugg, em toda a extensão da escarpa. Nos locais de ocorrência de torres separadas do maciço é aplicado reforço com tela tipo Spider S4 da Geobrugg. As telas são fixadas com ancoragens passivas de aço CA-50, diâmetro de 25 mm, comprimento de 8,0 m e malha de 1,5 x 1,5 m.

2.3.2 Tratamento Tipo 2

Aplica-se no talude natural da encosta, entre a base das escarpas de metarenito e o início das escavações obrigatórias (~El. 747 m). É composto por tela de alta resistência tipo TECCO G65 3 mm Geobrugg e ancoragens passivas de aço CA-50, Ø25 mm, comprimento de 6 m e malha de 2,5 x 2,5 m.

2.3.3 Tratamento Tipo 3

Aplica-se a partir do primeiro nível escavado, quando a escavação ocorrer em material H3.1. É composto por parede atirantada de concreto armado, com 30 cm de espessura e tirantes Dywidag ST 85/105 de 32 mm, em malha de 2,0 m (H) x 2,35 m (V). O comprimento ancorado dos tirantes era de 6 m e o comprimento livre variável entre 19 e 13 m. O bulbo de ancoragem ocorre em material H2.

2.3.4 Tratamento Tipo 4

Aplica-se nas escavações em material H3.2 e é composto por concreto projetado com 10 cm de espessura reforçado com tela metálica eletrossoldada de malha 10x10 cm, Ø4,2 mm, fy 600 MPa.

2.3.5 Tratamento Tipo 5

Aplica-se nas escavações em material H2 e é composto por concreto projetado reforçado com fibras com espessura de 8 cm e ancoragens passivas de aço CA-50, diâmetro de 25 mm eventuais, em função da identificação de potenciais cunhas.

3 INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA

Junto com os tratamentos indicados nos itens anteriores, foi previsto um sistema de instrumentação geotécnica para a encosta com a instalação de 10 inclinômetros, 7 extensômetros de haste, 35 marcos superficiais e 10 medidores de nível de água. O primeiro nível instrumentado corresponde à borda do início das escavações (El. 747 m). A instrumentação foi instalada à medida que a escavação alcançava a cota prevista.

3 ALTERAÇÕES NOS TRATAMENTOS

3.1 Primeira Alteração

Os trabalhos na encosta tiveram início em meados de setembro de 2013, nas proximidades da El. 747 m. Foi feita uma primeira escavação nessa elevação, ao longo de toda a extensão da região. Durante essas escavações, constatou-se que a espessura média do material H3.1 era menor do que os 6 m inicialmente estimados. Na maior parte dos trechos escavados a espessura era inferior a 2 m. No entanto, foram observados trechos isolados localizados em que essa espessura chegou a 9 m. Para os trechos da encosta natural em que a espessura do material H3.1 era de 9 m, análises de estabilidade considerando coesão de 15 kPa e ângulo de atrito de 35° conduzem a fatores de segurança inferiores a 1,0. Isso indica que a encosta natural deveria apresentar, nesses trechos, cicatrizes de escorregamentos. A comparação de fotos antigas do local com fotos recentes mostram que não há nenhum indício de cicatrizes de ruptura. A análise da vegetação também não indica a ocorrência de movimentos do tipo rastejo. Com base nesses fatos, fizeram-se algumas análises de estabilidade para a encosta natural, variando a espessura do material H3.1 e alterando a coesão do material, de maneira que se obtivessem fatores de segurança entre 1,05 e 1,10. Chegou-se à conclusão que o material H3.1 deveria ter uma coesão que aumentasse à taxa de 1,5 kPa/m de profundidade, a partir dos primeiros 3 m.

Outra alteração que ocorreu foi no conceito de aplicação do tratamento com parede atirantada. A parede atirantada (Tratamento Tipo 3) era

prevista para ser executada em nichos de cerca de 2 m de altura por 2 m de extensão, para evitar escorregamentos como o ocorrido na escavação da plataforma da sondagem. Concluiu-se que não havia a necessidade desse recurso, pois o material H3.1 permanecia estável. Com base nessas constatações, fizeram as seguintes alterações no projeto:

1) A parede atirantada não seria mais aplicada de forma sistemática no primeiro nível de escavação em material H3.1. Sua aplicação ficaria restrita aos trechos em que a espessura da camada desse material fosse superior a 3 m. Também foi reduzido o comprimento total dos tirantes, de forma que o bulbo de ancoragem ficasse em material H3.2;

2) Em uma zona de 10 m de largura no terreno natural, no contorno do primeiro nível escavado, seria aplicada uma malha sistemática de ancoragens passivas de aço CA-50, Ø25 mm, com 8 m de comprimento e espaçamento de 2,5 x 2,5 m;

3) A malha de ancoragens passivas do tratamento Tipo 2 foi alterada de 2,5 x 2,5 m para 5,0 x 5,0 m e o comprimento reduzido de 6,0 para 4,0 m. A malha adotada corresponde ao máximo espaçamento aplicável do ponto de vista do dimensionamento estrutural da tela.

4) Decidiu-se também instalar uma linha de barreira dinâmica contra queda de blocos do tipo RXI-050 da Geobrugg, ao longo de toda a extensão da zona do pátio de transformadores (~600 m), na encosta natural aproximadamente na El. 750 m.

Essas alterações ocorreram ao longo do primeiro semestre de 2014, quando as escavações ainda estavam essencialmente nos níveis dos materiais H3.1 e H3.2.

3.2 Segunda Alteração

Entre meados de abril e maio de 2015, dois inclinômetros instalados na encosta passaram a apresentar deslocamentos da ordem de 25 mm, a cerca de 11 m de profundidade a partir da cota de instalação. De acordo com o zoneamento geológico vigente, nessa profundidade deveria ocorrer material H3.2 que, por suas características de resistência, não deveria apresentar problemas de estabilidade global. Ao se confrontar as cotas de movimentos dos

inclinômetros com os levantamentos geofísicos, percebeu-se que os movimentos indicados ocorreram exatamente no contato entre os materiais H3.2 e H2.

Análises de estabilidade globais da encosta feitas forçando-se a passagem da superfície de ruptura por esse contato indicavam fatores de segurança superiores a 1,50 sem a consideração de nenhum tratamento geotécnico aplicado. A única maneira de se conseguir fatores de segurança próximos de 1,0 foi incluindo-se entre os materiais H3.2 e H2 uma camada de 1 m de espessura de material H3.1. Isso indica que deveria ocorrer no contato entre os materiais H3.2 e H2 uma camada delgada de material com características geotécnicas piores.

De forma a avaliar essa hipótese, foram realizadas 3 sondagens rotativas sub-horizontais na encosta, de maneira que atravessassem o contato entre as camadas de material H3.2 e H2. Em nenhuma das três sondagens realizadas foi detectada a presença de material que pudesse ter parâmetros de resistência similares aos parâmetros do material H3.1. A Figura 4 mostra os testemunhos de uma dessas sondagens.



Figura 4. Foto dos testemunhos de uma das sondagens realizadas para investigar o contato H3.2/H2

Também foi realizada uma série de 25 sondagens rotoperussivas subhorizontais, a partir das superfícies escavadas, para se confirmar a posição do contato entre as camadas H3.2 e H2. Essas sondagens confirmaram a posição do contato entre as camadas.

Mesmo não tendo sido identificado fisicamente material com propriedades geotécnicas piores no contato H3.2/H2, decidiu-se dimensionar um

reforço no tratamento geotécnico aplicado no material H3.2 e no material H3.1 tratado com parede atirantada, em um trecho com cerca de 100 m de extensão. Esse reforço foi dimensionado considerando que entre os materiais H3.2 e H2 poderia haver uma camada com 1 m de espessura de material com propriedades de resistência similares às propriedades dos material H3.1. O dimensionamento foi feito de forma a atender a abordagem de cálculo 1, combinação 2 do Eurocode EN 1997-1:2004. Esse reforço resultou em tirantes com carga de trabalho de 350 kN, em malha de 3,0 x 3,0. O comprimento desses tirantes é variável, de maneira que a ancoragem se dê em material H2.

Quando essas alterações ocorreram, as escavações já se encontravam na El. 680 m. Nesse momento, as escavações da caverna da Central Principal, que situa-se no interior da encosta, em material H2, já estavam praticamente concluídas. Com isso, já dispunha-se de um volume bastante grande de informações estruturais do maciço rochoso.

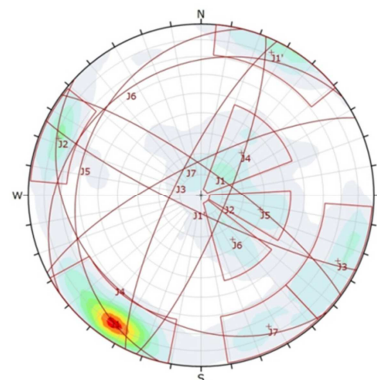


Figura 5. Estereograma das discontinuidades mapeadas nas escavações do Pátio dos Transformadores

A Figura 5 mostra o estereograma das famílias mapeadas nas escavações do pátio dos transformadores. As famílias denominadas por J1 e J1' são as famílias mais frequentes e estão associadas à foliação do gnaiss. Como essas famílias possuem mergulho da ordem de 80° e os taludes escavados possuem inclinação de 80°, a princípio não deveriam ocorrer problemas estruturais no maciço. No entanto, em vários trechos escavados deparou-se com a família J4, que é uma família subhorizontal com mergulho que varia de 30 a 60°. Essa família muitas vezes ocorre com as paredes com

preenchimento argilo-granular. A ocorrência dessas famílias também ocasionou um reforço no tratamento do material H2, composto por ancoragens passivas de aço CA-50, Ø32 mm, 6 m de comprimento em malha de 2,0 x 2,0 m.

4 ALTERAÇÕES NO PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO

Como resultado das alterações no modelo geológico-geotécnico de cálculo e dos

tratamentos, também fez-se uma alteração substancial no projeto de instrumentação da encosta. Foram incluídos mais 15 inclinômetros, sendo 9 instalados na encosta natural, 2 extensômetros de haste, 48 células de carga e 2 medidores de nível de água. Todas as perfurações para a instalação desses instrumentos foram feitas de forma rotativa, com recuperação de testemunho.

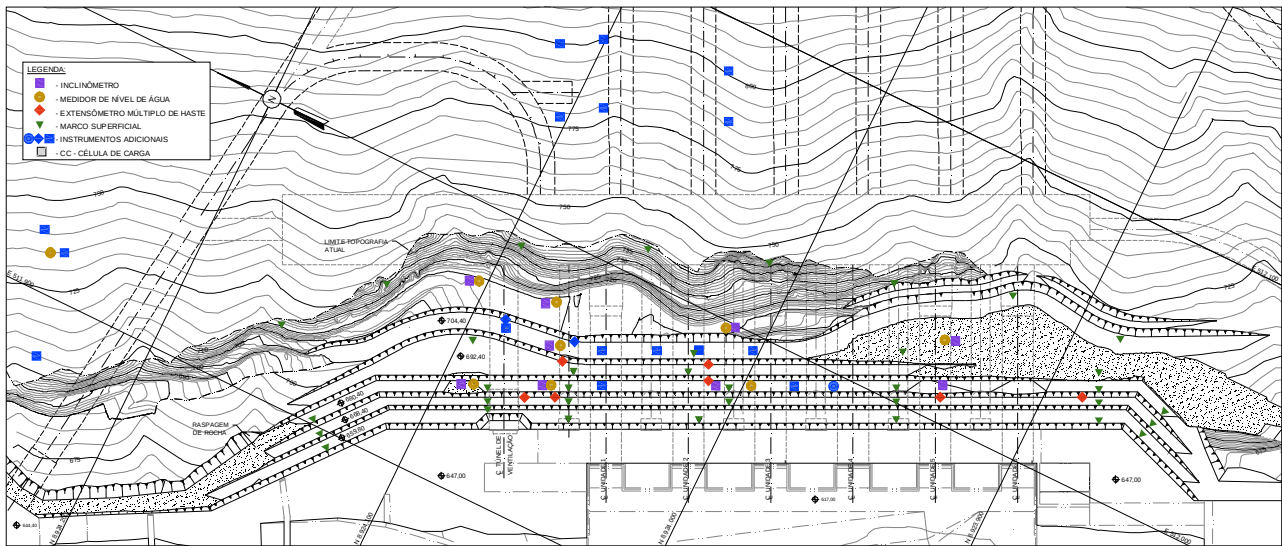


Figura 6. Instrumentação do Pátio dos Transformadores

5 ANÁLISES PROBABILÍSTICAS

O conhecimento adquirido durante as escavações, através do monitoramento da instrumentação e análises dos mapeamentos geológico-geotécnicos de campo permite afirmar que, do ponto de vista de risco, o modelo de ruptura mais crítico para o pátio dos transformadores consiste em uma ruptura global, por uma superfície passando pelo contato entre os materiais H3.2 e H2.

Por essa razão foram feitas análises de estabilidade globais probabilísticas pelas seções mais críticas da encosta. Essas análises foram feitas considerando a variabilidade de parâmetros para os materiais H3.1 e H3.2

Os parâmetros adotados são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros utilizados nas análises estatísticas.

Material	Prop.	Distr.	μ	σ	Rel. min ⁽¹⁾	Rel. max ⁽²⁾
H3.2	c	Normal	150	33,33	99,99	99,99
	Ø	Uniforme	35	xxx	5	5
H3.1 primeiros 3 m	c	Uniforme	15	xxx	5	5
	Ø	Uniforme	35	xxx	5	5
H3.1 após 3 m	Coesão inicial	Uniforme	15	xxx	5	5
	Acréscimo de coesão	Uniforme	2	xxx	0,5	0,5
	Ø	Uniforme	35	xxx	5	5

(1) - Relativo mínimo: valor a ser subtraído da média para definir o valor mínimo do parâmetro

(2) - Relativo máximo: valor a ser adicionado à média para definir o valor máximo do parâmetro.

Os resultados das análises para as 3 seções avaliadas são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados das análises probabilísticas

Seção	Talude	FS		Probabilidade de ruptura ⁽¹⁾
		μ	σ	
1	Escavado	1,65	0,1422	2,43E-06
2	Escavado	2,255	0,207	6,69E-10
3	Escavado	1,638	0,1317	6,35E-07

(1) – Distribuição normal

Analisando-se os resultados, pode se concluir que a probabilidade de ruptura é bastante baixa.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho aborda os aspectos de projeto dos tratamentos geotécnicos aplicados nos taludes naturais e escavados de uma encosta em cujo pé serão instalados os transformadores principais da central hidrelétrica mais importante para o sistema elétrico angolano. Devido à importância desta usina, o risco geotécnico associado precisa ser o menor possível. Em busca da minimização dos riscos, a encosta é integralmente tratada, ao longo do desnível de cerca de 200 m e da extensão do pátio dos transformadores, que é de aproximadamente 600 m. Os tratamentos inicialmente propostos sofreram várias atualizações no decorrer dos trabalhos, em função de resultados de análises de instrumentação e dos mapeamentos geológico-geotécnicos efetuados. As escavações foram iniciadas em meados de setembro de 2013 e concluídas em outubro de 2015. Ainda estão em curso alguns trabalhos de instalação de instrumentação e de tratamentos geotécnicos, especialmente na região da encosta natural. Durante as escavações os trabalhos transcorreram sem nenhum incidente.

A mudança do conceito de projeto da fase do Projeto Básico para o Projeto Executivo proporcionou um ganho significativo no cronograma da obra.

As alterações realizadas no projeto ao longo dos trabalhos exemplificam a necessidade do acompanhamento da instrumentação geotécnica e da realização de acompanhamento detalhado dos processos de escavação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Gabinete de

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