XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.4/117

Soluções em Encostas de Difícil Acesso: Estudo de Caso de Aplicação de Concreto em Rolo para Estabilização de Ruptura em Torre de Transmissão

Caio Gak Assumpção Queiroz Rego
Geólogo Jr., ALTA Geotecnia Ambiental, Rio de Janeiro, Brasil, caio.assumpcao@altageotecnia.com

Anderson Dantas de Morais
Engenheiro Civil-Geotécnico, JETbr Engenharia de Performance, Natal, Brasil, anderson.dantas@gmail.com

Marco Antônio da Silva Ramidan
Consultor Sênior, ALTA Geotecnia Ambiental, Rio de Janeiro, Brasil, masramidan@altageotecnia.com

Caio Duque Estrada Amendola
Líder de Célula, ALTA Geotecnia Ambiental, Rio de Janeiro, Brasil, caio.amendola@altageotecnia.com

Kadson Matheus Barreiros Gomes
Geólogo Sr., ALTA Geotecnia Ambiental, Rio de Janeiro, Brasil, kadson.gomes@altageotecnia.com

Flávia de Oliveira Dias
Geóloga Jr., ALTA Geotecnia Ambiental, Rio de Janeiro, Brasil, flavia.dias@altageotecnia.com

Manuela Suellen Vieira Galindo
Dir. de Operações, ALTA Geotecnia Ambiental, Rio de Janeiro, Brasil, manuella.galindo@altageotecnia.com

Álvaro Viana
Diretor Executivo, ALTA Geotecnia Ambiental, Rio de Janeiro, Brasil, alvaro.viana@altageotecnia.com

RESUMO: Em 2022 foi deflagrada uma ruptura a jusante de torre de transmissão, localizada em meio às escarpas da Serra da Bocaina, no Município de Cachoeira Paulista (SP). O movimento de massa, ocorrido a aproximadamente 2 m a jusante da “perna B” da estrutura, gerou uma cicatriz com dimensões aproximadas de 9 m de largura na crista e extensão de pelo menos 50 m. Com base nas observações de campo, o deslizamento foi superficial, mas a ocorrência de novos deslizamentos e/ou processos erosivos poderiam gerar um risco para a estabilidade da fundação da torre, ao afetar a sua capacidade de carga à tração, especialmente se houvesse maior perda de solo na região do cone. Dada a declividade e inclinação da encosta e, levando em consideração a grande dificuldade de acesso a área, a solução de estabilização teve de ser realizada por via aérea. Desta forma, a utilização do concreto em rolo se mostrou como uma boa alternativa para a proteção superficial e os canais de drenagem, uma vez que sua aplicação é simples, rápida e não exigiu a utilização de equipamentos pesados. Com a recomposição da cicatriz, foi possível recuperar a perda de pequena parte do cone de tração, restaurando assim as condições originais do projeto da fundação da torre.

PALAVRAS-CHAVE: Torre de transmissão, Escorregamento, Contenção de encosta, Concreto em rolo.

ABSTRACT: In 2022, a failure triggered downstream of a transmission tower located in the escarpments of the Serra da Bocaina, in the municipality of Cachoeira Paulista (SP). The mass movement, which occurred approximately 2 m downstream of “leg B” of the structure, produced a scar with approximate dimensions of 9 m in width at the crest and a length of at least 50 m. Based on field observations, the landslide was shallow; however, the occurrence of new landslides and/or erosive processes could pose a risk to the stability of the tower foundation by affecting its tensile load-bearing capacity, particularly if further soil loss occurs in the anchor cone region. Given the slope gradient and inclination, and considering the significant difficulty in accessing the area, the stabilization solution had to be carried out by aerial means. In this context, the use of roller-compacted concrete proved to be a suitable alternative for surface protection and drainage channels, as

the application is simple, fast, and did not require the use of heavy equipment. With the restoration of the scar area, it was possible to recover the partial loss of the anchor cone, thereby reestablishing the original design conditions of the tower foundation.

KEYWORDS: Transmission tower, Landslide, Slope stabilization, Roller concrete.

1 INTRODUÇÃO

A instabilidade de encostas é um fator sensível a ser considerado em regiões que abrigam infraestruturas essenciais, como torres de linhas de transmissão, pois pode comprometer sua integridade e, consequentemente, os benefícios prestados à sociedade. Além disso, a ocorrência de deslizamentos em áreas remotas representa um risco para estruturas, em função da dificuldade de acesso e da complexidade na implementação de medidas mitigadoras. Militítsky (2019) trata-se de uma referência prática sobre considerações técnicas e operacionais em projetos e obras de torres de linhas de transmissão e de telecomunicações.

Diante desse cenário, o presente trabalho apresenta um estudo de caso de uma ruptura deflagrada a jusante de uma torre de linha de transmissão, em meio às escarpas da Serra da Bocaina, no Município de Cachoeira Paulista (SP). O movimento de massa em questão, embora caracterizado como superficial, ocorreu a aproximadamente 2 metros de distância de um dos pontos de fundação da torre, portanto fora da área de atuação do cone de ancoragem.

A solução adotada considerou a elevada declividade além de restrições de acesso ao local, que impossibilitaram o uso de métodos convencionais de estabilização que demandam maquinário pesado. Assim, optou-se pela recomposição da cicatriz e utilização de concreto em rolo para execução de proteção superficial e drenagem. Essa abordagem demonstrou vantagens significativas, incluindo a rapidez de execução e redução de impactos ambientais.

Dessa forma, este trabalho apresenta as condições observadas em campo, e discute os aspectos técnicos da intervenção, os desafios enfrentados e os resultados obtidos, contribuindo para a disseminação de boas práticas na engenharia geotécnica voltadas à estabilização de encostas em terrenos de difícil acesso.

2 INSPEÇÃO DE CAMPO

A identificação das condições geológico-geotécnicas e hidráulicas associadas ao movimento de massa deflagrado em 2022 foi realizada por meio de inspeção de campo e sobrevoo de helicóptero. O objetivo foi caracterizar o deslizamento, além de identificar indicadores de instabilidade, e mapear a área afetada.

A área em estudo está localizada nas escarpas serranas da Serra da Bocaina, a norte da Baía da Ilha Grande (Figura 1). Em uma escala de maior detalhe, pode-se destacar que a torre, assim como o traçado da linha de transmissão, está situada numa encosta convexa. Dada a declividade acentuada e inclinação do terreno, há um desnível entre as cotas das fundações de cada perna da estrutura.



Figura 1. Vista aérea da torre de transmissão.



Figura 2. Vista da cicatriz de escorregamento, com a torre de transmissão ao fundo.

O movimento de massa ocorreu a aproximadamente 2 metros a jusante da "perna B" da torre, e apresentou tipologia predominantemente planar, formando uma cicatriz com dimensões aproximadas de 9 m de largura na crista e extensão miníma de 50 m (Figura 2).

Durante a inspeção de campo, observou-se a exposição de um perfil de intemperismo decorrente do processo de deslizamento. Na porção superior do talude, o material é constituído predominantemente por solo residual maduro, de textura areno-silto-argilosa. Com o aumento da profundidade, verificou-se a transição gradual para solo residual jovem, apresentando características próximas às de rocha alterada. Os solos residuais identificados são derivados de paragnaisses, em conformidade com o mapeamento geológico do Serviço Geológico do Brasil – SGB-CPRM (HEILBRON *et al.*, 2007).

Além disso, foi identificada a presença de proteção superficial em concreto projetado na região da torre, com desplacamentos que indicavam falhas de aderência entre o material e o solo em alguns trechos. Trincas verticais foram observadas em várias áreas do concreto, sendo que, nas proximidades da "perna B", tais patologias possuíam maior espessura, nos sentidos vertical e horizontal. Tal aspecto sugere que o deslizamento agravou a condição das trincas.

Em relação ao sistema de drenagem, foram observados canais e calhas, porém o terreno apresentava pontos de convergência de fluxo sem dissipadores de energia, caracterizando um desempenho insuficiente do sistema. Por fim, foram ainda avaliados possíveis danos estruturais na torre e suas fundações, não sendo identificadas trincas de tração e degraus de abatimento no terreno, tampouco patologias estruturais na torre, como desalinhamento dos isoladores.

Em síntese, a inspeção de campo indicou que o movimento de massa superficial mobilizou o solo residual maduro, juntamente com o concreto projetado e vegetação adjacente, caracterizando um deslizamento planar, possivelmente com ruptura na interface solo residual maduro/solo residual jovem. A ineficácia do sistema de drenagem e da proteção superficial pode ter contríbuído para a deflagração do movimento, favorecendo a saturação do solo em pontos de concentração de fluxo, especialmente em períodos de precipitação intensa.

3 INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS

Para avaliar a estabilidade e definir a solução adequada, foram realizadas investigações geotécnicas na área em estudo. Em virtude da dificuldade de acesso e mobilização de equipamentos na área em estudo, foram realizados sobrevoos para captação de imagens RGB e dados LiDAR por meio do drone Matrice 300 RTK, com o sensor Zenmuse L1 acoplado. Após o processamento dos dados, realizado no software Agisoft Metashape, foram gerados modelos digitais, nuvem de pontos e curvas de nível com resolução de 1 m.

Além disso, durante a inspeção de campo foram realizadas cinco sondagens a trado (Figura 3), localizadas no entorno da torre de transmissão, distantes da fundação, já que nessa região espera-se uma camada de solo mais compactado, não necessariamente representativa do solo natural. A opção pelo tipo de investigação se deu em função da inviabilidade logística para acesso de equipamentos mais pesados, como tripés para realização de sondagens a percussão.



Figura 3. Execução da sondagem a trado.



Figura 4. Amostra deformada em cilindro.

Adicionalmente, foram coletadas amostras deformadas com cilindro de cravação, tanto do solo residual maduro quanto do solo jovem, para ensaios laboratoriais (Figura 4). No solo residual maduro, foram realizados ensaios de caracterização completa, densidade aparente e cisalhamento direto (condição natural e inundada). Para o solo jovem, foram feitos ensaios de caracterização física completa e densidade aparente.

4 MODELAGEM GEOTÉCNICA

Para a análise de estabilidade da encosta, foram consideradas as informações de projeto da torre, as observações de campo e os resultados das investigações geotécnicas, de modo a determinar a estratigrafia, os parâmetros de resistência das camadas de solo, a provável superfície de ruptura e os fatores de segurança, tanto na condição pósruptura quanto considerando as contenções propostas.

A partir dos resultados das investigações geotécnicas, foram definidos 3 (três) horizontes estratigráficos: Camada A - solo residual maduro e superficial com espessura variando entre 1m e 2m; Camada B - solo residual jovem com espessura de aproximadamente de 2m; Camada C - rocha ou alteração de rocha, composta por material competente, sem a presença de potenciais superfícies de ruptura que a atravessem.

Após a definição do perfil estratigráfico, foram realizadas análises de estabilidade para a condição pós-ruptura considerando dois cenários: no primeiro, adotaram-se os parâmetros do solo residual maduro obtidos por ensaio de cisalhamento direto na condição natural; no segundo, os parâmetros foram definidos para a condição inundada. As Tabelas 1 e 2 apresentam os parâmetros de resistência para os respectivos cenários.

Tabela 1. Parâmetros de resistência das camadas do talude (solo maduro em condição natural).

Camada	Condição	Peso específico (kN/m³)	Coesão efetiva (kPa)	Ângulo de atrito (º)
A	Natural	18,3	9,6	34,2
B	Natural	19,0	25,0	30,0
C	Rocha	25,0	30,0	40,0

Tabela 2. Parâmetros de resistência das camadas do talude (solo maduro em condição inundada).

Camada	Condição	Peso específico (kN/m³)	Coesão efetiva (kPa)	Ângulo de atrito (º)
A	Inundada	18,5	5,3	36,5
B	Inundada	19,0	25,0	30,0
C	Rocha	25,0	30,0	40,0

Com base na memoria de cálculo estrutural da torre, considerou-se o carregamento da fundação da perna B, estimado em 580 kN/m², aplicado a 2,0 m da crista da cicatriz, na camada de solo residual jovem, a uma profundidade de 2,5 m, em razão da combinação última para o dimensionamento da fundação a compressão.

Em todas as análises foi empregado o método rigoroso de Morgenstern-Price (1965) , que estabelece o equilíbrio de forças e momentos das massas mobilizantes, considerando uma relação meso-senoidal (*half sine*) como função entre fatias, e otimização para superfície qualquer. As análises foram executadas com auxílio do programa SLOPE/W, do pacote Geostudio 2012.

As Figuras 5 e 6 ilustram os resultados das análises de estabilidade para as condições natural e inundada, respectivamente. No cenário natural, o fator de segurança obtido foi de 1,4, e a superfície de ruptura perpassando a camada de solo residual jovem. Já na condição inundada, a ruptura ocorreu na interface entre o solo maduro e o solo jovem, nas proximidades da cicatriz, com fator de segurança de 1,3. Nesse contexto, infere-se que a ruptura foi favorecida pela deficiência nas estruturas de proteção superficial e no sistema de drenagem, o que possibilitou a infiltração de água, a saturação do solo e, consequentemente, a instabilidade da camada mais superficial.

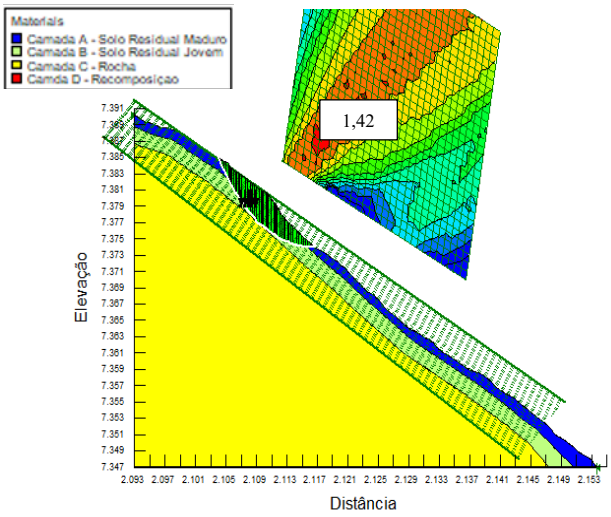


Figura 5. Análise de estabilidade - Parâmetros naturais para o solo maduro.

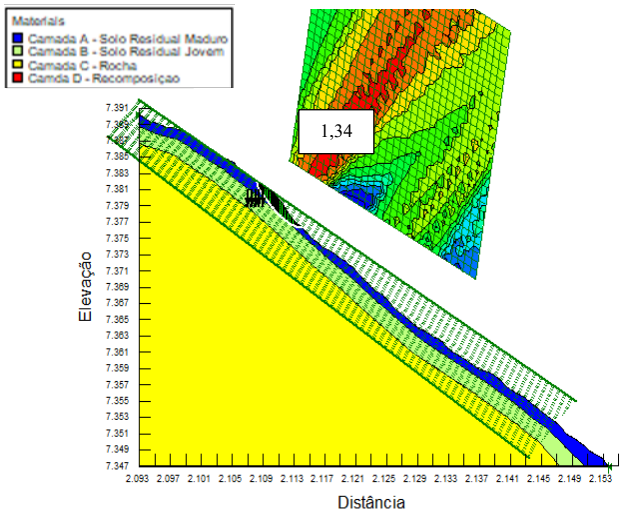


Figura 6. Análise de estabilidade - Parâmetros inundados para o solo maduro.

5 SOLUÇÃO PROPOSTA

Para o dimensionamento da solução proposta, adotou-se como referência o fator de segurança definido pela ABNT NBR 11.682 (2009). Considerando-se que, no caso em estudo, o risco à vida humana é baixo, enquanto os potenciais prejuízos materiais e ambientais são elevados, estabeleceu-se, conforme a norma, um fator de segurança mínimo de 1,4.

Com base nas análises de estabilidade apresentadas para a pós-ruptura, verifica-se que, na condição de saturação natural, os resultados já atendem ao fator de segurança mínimo de 1,4, conforme estabelecido pela norma. Nesse contexto, a manutenção da estabilidade do trecho depende diretamente da preservação da condição de não saturação do solo, a fim de evitar a redução da resistência e o comprometimento da segurança da encosta. Assim, a solução proposta visou prioritariamente atentar à proteção superficial e ao dimensionamento adequado do sistema de drenagem.

No entanto, considerando que o fator de segurança obtido na análise de estabilidade atendeu as condições previstas em norma, como relatado anteriormente, optou-se por preservar a integridade estrutural da torre de transmissão, recompondo parte do terreno na região da cicatriz, a fim de manter as características inerentes ao projeto original da torre, em especial a capacidade de carga à tração na região da grelha (“perna B”).

Diante do cenário proposto, e tendo em vista as observações de campo quanto às características geológico-geotécnicas, geometria atual do talude, dificuldade de acesso à área de intervenção e a possibilidade de deflagração de novos processos instabilizantes, foram propostas as seguintes soluções: remoção de parte da massa mobilizada; recomposição de parte da cicatriz próxima à fundação da “perna B”; técnicas de bioengenharia ao longo da cicatriz; substituição total do sistema de proteção superficial atual (concreto projetado); e concepção de um novo sistema de drenagem.

Para validação da solução, em termos de estabilidade, foram utilizados os mesmos parâmetros das análises da pós-ruptura, apresentados nas Tabelas 1 e 2, considerando as condições natural e inundada. Nas análises, foi empregado o modelo *High Strength* para a camada de recomposição, disponível no *software* utilizado. Esse modelo assume que não há possibilidade de deslizamento ao longo de superfícies que atravessem essa camada, uma vez que ela não atua como elemento de contenção. Nesse cenário, as Figuras 7 e 8 apresentam os resultados das análises de estabilidade, considerando a recomposição da cicatriz, demonstrando que foram obtidos fatores de segurança similares aos anteriores.

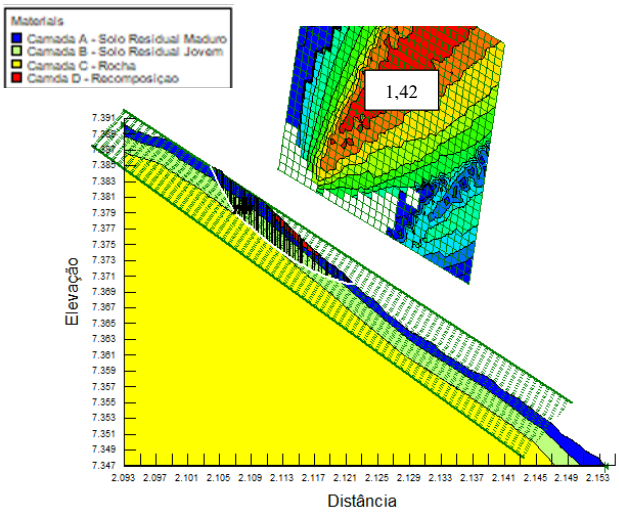


Figura 7. Análise de estabilidade - Recomposição da cicatriz - Parâmetros naturais para o solo maduro.

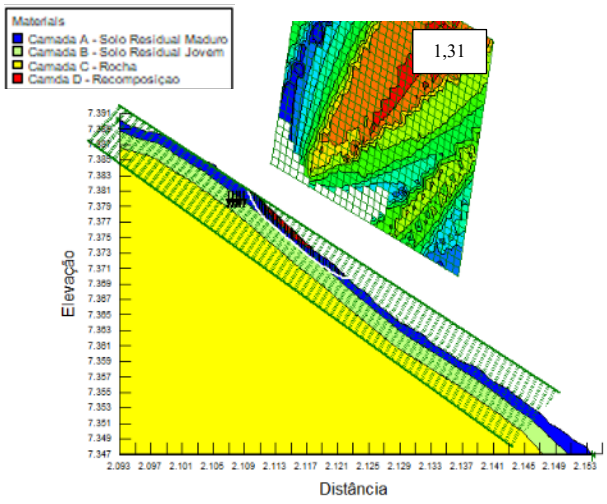


Figura 8. Análise de estabilidade - Recomposição da cicatriz - Parâmetros inundados para o solo maduro.

6 ASPECTOS EXECUTIVOS

Em relação aos aspectos executivos, ressalta-se que a recomposição da cicatriz foi concebida com utilização de sacos de solo-cimento, intercalados com sacos de solo e mix de sementes de gramíneas e leguminosas. Além disso, foram propostas técnicas de bioengenharia, como a aplicação de biomanta, instalação de bermalonga e plantio de gramíneas, leguminosas e capim vetiver ao longo da região da cicatriz, exceto no trecho onde foi executada a recomposição do terreno.

Para a execução da proteção superficial na região da torre, assim como dos dispositivos de drenagem, foi proposta a utilização do concreto em rolo como alternativa, uma vez que sua aplicação é mais simples e rápida, e não requer a utilização de equipamentos pesados. O concreto em rolo é um material composto por uma mistura de cimento e fibras, pré-moldado em folhas flexíveis e resistentes. Após a hidratação, o material deve ser mantido úmido por, no mínimo, 72 horas, iniciando o processo de cura em aproximadamente 24 horas e atingindo a cura completa em 28 dias.

As Figuras 9 a 12 ilustram aspectos de mobilização de insumos e execução em campo, enquanto a Figura 13 apresenta uma visão geral da torre após a conclusão das obras.



Figura 9. Aplicação do concreto em rolo na encosta.



Figura 10. Umidecimento do concreto em rolo.



Figura 11. Práticas vegetativas imnplementadas na região da cicatriz, a jusante da torre de transmissão.



Figura 12. Mobilização de insumos através de helicóptero.



Figura 13. Vista aérea da torre após a conclusão das obras.

Adicionalmente, destaca-se que parte dos materiais empregados nas intervenções, em especial o concreto em rolo, foi mobilizada por meio de transporte aéreo, utilizando helicóptero, em função das limitações de acesso à área. A logística diferenciada foi necessária devido às condições de difícil acessibilidade do local, o que demandou planejamento operacional específico para viabilizar a execução das atividades previstas.

7 CONCLUSÃO

A intervenção na encosta adjacente à torre de transmissão em estudo exigiu soluções adaptadas às restrições de acesso e à impossibilidade de mobilização de equipamentos robustos. Nesse contexto, a recomposição do terreno com sacaria de solo-cimento, e utilização de concreto em rolo mostrou-se uma alternativa eficaz, possibilitando a execução da proteção superficial e do sistema de drenagem de forma rápida

e segura, mesmo em condições executivas desafiadoras. Essa solução atendeu aos requisitos de estabilidade definidos em norma e contribuiu para a preservação da integridade estrutural da fundação da torre.

Além da recomposição e proteção da região da torre, foram adotadas técnicas complementares de bioengenharia em trechos mais disntates da torre, com o objetivo de reforçar a estabilização superficial e mitigar processos erosivos. A experiência demonstrou que é possível empregar abordagens construtivas eficientes em áreas de difícil acesso, sem comprometer a segurança da estrutura nem a sustentabilidade da intervenção. O presente estudo de caso serve como referência para futuras obras geotécnicas em terrenos de topografia acidentada e com limitações logísticas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à ALTA Geotecnia Ambiental, responsável técnica pelo Projeto Executivo de Contenção citado, e à FGEO, responsável pela execução da obra, pela autorização para publicação dos resultados aqui apresentados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682. *Estabilidade de Encostas*. Rio de Janeiro.

Heilbron, M. *et al.* (2007) *Geologia da folha Volta Redonda SF.23-Z-A-V: Escala 1:100.000.* CPRM-UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 140 p.

Milititsky, J. (2019) *Fundações de torres: aerogeradores, linhas de transmissão e telecomunicações.* Oficina dos Textos, São Paulo, SP, Brasil. 239 p.

Morgenstern, N. R.; Price, V. E. (1965) The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, 15 (1), p. 79-93.