



Projeto de Recuperação de Talude Rodoviário com Aterro de Enrocamento e Solo Grampeado na Rodovia BR-116/PR

Guilherme de Araújo Rochedo

Eng. Civil, Singe Infraestrutura e Geotecnica, Porto Alegre, Brasil, guilherme@singeengenharia.com.br

Marcos Strauss

Msc. Eng. Civil, Singe Infraestrutura e Geotecnica, Porto Alegre, Brasil, strauss@singeengenharia.com.br

Gustavo Heinen Strauss

Eng. Civil, Singe Infraestrutura e Geotecnica, Porto Alegre, Brasil, gustavo@singeengenharia.com.br

RESUMO: Taludes rodoviários de elevada altura estão particularmente suscetíveis a processos de instabilidade induzidos por chuvas intensas, sobretudo quando associados a geometrias desfavoráveis e solos residuais heterogêneos. No km 54+450 da BR-116/PR, uma nova ruptura foi registrada em novembro de 2022, após eventos pluviométricos significativos, em um trecho com histórico de instabilidades. A partir de observações de campo e investigações geotécnicas, foi diagnosticado o mecanismo de ruptura. Para reestabelecer a operação segura da rodovia, foi desenvolvido um projeto de estabilização baseado na combinação das técnicas de solo grampeado e aterro de enrocamento. A análise técnica considerou sondagens à percussão (SPT), ensaios de cisalhamento direto e análises de estabilidade. Três alternativas de contenção foram avaliadas: (i) retaludamento com enrocamento, (ii) solo grampeado com enrocamento e (iii) solo grampeado isolado. Com base em critérios técnicos, econômicos e ambientais definiu-se a solução mais adequada. A alternativa escolhida - solo grampeado com aterro de enrocamento – apresentou vantagens em todos os quesitos avaliados, sendo dimensionada conforme as normas NBR 11682/2009 e NBR 16920-2/2021. O caso reforça a importância de uma abordagem integrada, articulando diagnóstico, investigação de campo e modelagem numérica para fundamentar soluções eficientes em contextos de alta complexidade geotécnica.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de Taludes, Solos Residuais, Estruturas Relíquias, Retroanálise, Diagnóstico do Mecanismo de Ruptura, Estudo de Alternativas.

ABSTRACT: Highway cut slopes with considerable height are particularly susceptible to instability processes triggered by intense rainfall, especially when associated with unfavorable geometries and heterogeneous residual soils. At km 54+450 of BR-116/PR, a new failure occurred in November 2022 following significant rainfall events, in a section with a history of recurrent instabilities. Based on field observations and geotechnical investigations, the failure mechanism was diagnosed. To restore the safe operation of the highway, a stabilization project was developed using a combination of soil nailing and rock fill embankment. The technical analysis was based on standard penetration tests (SPT), direct shear tests, and stability analyses. Three containment alternatives were evaluated: (i) regrading with rock fill, (ii) soil nailing with rock fill, and (iii) isolated soil nailing. Based on technical, economic, and environmental criteria, the most appropriate solution was selected. The chosen alternative — soil nailing combined with rock fill — showed advantages in all evaluated aspects and was designed in accordance with NBR 11682/2009 and NBR 16920-2/2021. This case highlights the importance of an integrated approach in geotechnical design, combining failure diagnosis, field investigation, and numerical modeling to support effective solutions in complex geotechnical contexts.

KEYWORDS: Slope Stability, Residual Soils, Relict Structures, Back Analysis, Failure Mechanism Diagnosis, Design Alternatives.

1 INTRODUÇÃO

Taludes com geometria desfavorável, grandes alturas e elevadas inclinações, estão particularmente suscetíveis a processos de instabilidade, frequentemente agravados por condições climáticas intensas e por características geotécnicas desfavoráveis.



2025

Em novembro de 2022, após um período de chuvas acima da média, ocorreu uma nova ruptura em um talude de corte no km 54+450 da BR-116/PR. O trecho já havia registrado instabilidades anteriores, reforçando a necessidade de uma abordagem técnica criteriosa, considerando o histórico de recorrência, as características geológico-geotécnicas locais e os efeitos da saturação do solo.

Diane desse contexto, foi desenvolvido um Projeto Executivo de Recuperação de Terraplenos com foco na estabilização definitiva do talude e na restauração da segurança operacional da rodovia. A solução adotada consistiu na combinação das técnicas de solo grampeado e aterro de enrocamento, definida a partir de análises de estabilidade, avaliação comparativa de alternativas e conformidade com as normas técnicas brasileiras vigentes.

2 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL

A rodovia BR-116/PR é uma das principais vias de ligação entre os estados do Paraná e São Paulo, desempenhando papel estratégico no escoamento de cargas, no transporte intermunicipal e no turismo. O trecho localizado no km 54+450 situa-se no município de Campina Grande do Sul/PR. Nesse segmento, a rodovia é constituída por duas pistas — sentido Sul e Norte — separadas por um canteiro central. Cada pista possui duas faixas de rolamento e acostamento. A Figura 1 apresenta a localização da área afetada.



Figura 1. Mapa de localização e Imagem de Satélite do local da ruptura no km 54+450.

2.1 Descrição da Ruptura

A ruptura no km 54+450 é reincidente. O primeiro evento ocorreu em 2008 (Figura 2) e foi estabilizado posteriormente pela concessionária em 2016 (Figura 3). No entanto, o talude voltou a romper em novembro de 2022 (Figura 4).



Figura 2. Imagem aérea da ruptura ocorrida em 2008. (Fonte: Arteris)



Figura 3. Vista geral do talude em 2017, após as intervenções realizadas pela concessionária.



2 0 2 5

A ruptura de 2022 apresenta aproximadamente 32 m de extensão e cerca de 25 m de altura, localizada em um talude de corte com cerca de 170 m de comprimento.



Figura 4. Vista geral da ruptura ocorrida em novembro de 2022. (fonte: Arteris)

2.2 Caracterização geológica regional

De acordo com o Mapa Geológico do Paraná - Carta Curitiba (Figura 5), a área de estudo está inserida em terrenos compostos por rochas metamórficas do Complexo Gnáissico-Migmatítico (APImge), de idade Proterozoico Inferior (Arqueano). Durante visita técnica ao local, observou-se que o talude é formado por solo residual, com estruturas reliquias evidentes (Figura 6), caracterizando sua origem a partir da decomposição de rochas gnáissico-migmatíticas.

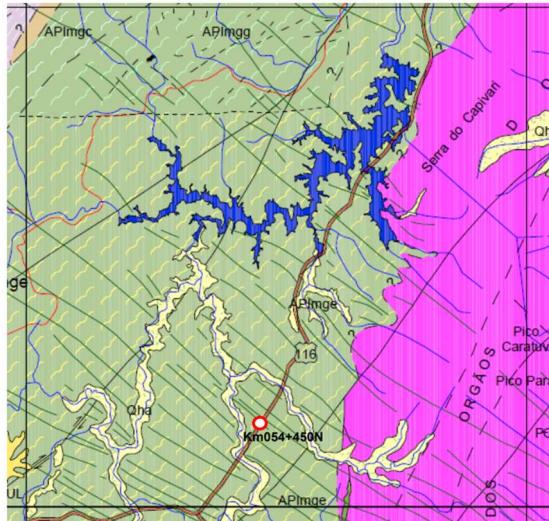


Figura 5. Mapa geológico do local
(MINEROPAR, 2008).



Figura 6. Solo residual com a presença de estruturas reliquias.

2.3 Investigação geotécnica

Com o objetivo de caracterizar as condições geológico-geotécnicas da área, foram realizadas três sondagens à percussão (SPT) e coletadas duas amostras indeformadas para ensaios de cisalhamento direto. As amostras foram coletadas nas adjacências da ruptura e correspondem ao solo residual superficial não rompido.

As sondagens, executadas até o impenetrável, revelaram perfis de solo compostos por materiais silto-argilosos ou silto-argilo-arenosos, com coloração variegada e presença de estruturas reliquias, caracterizando solos residuais. O índice de resistência à penetração (N_{SPT}) apresentou tendência de aumento com a profundidade. A profundidade impenetrável variou entre 8 e 19 m, possivelmente em decorrência da presença



de blocos de rocha (matacões). A partir desse nível, é provável a transição para saprolito ou rocha muito alterada. O nível d'água foi interceptado em apenas uma das sondagens, na cota aproximada de 845,50 m, cerca de 6,6 m abaixo do nível da Pista Norte. As camadas foram agrupadas com base nos valores de N_{SPT} , conforme apresentado na Figura 7.

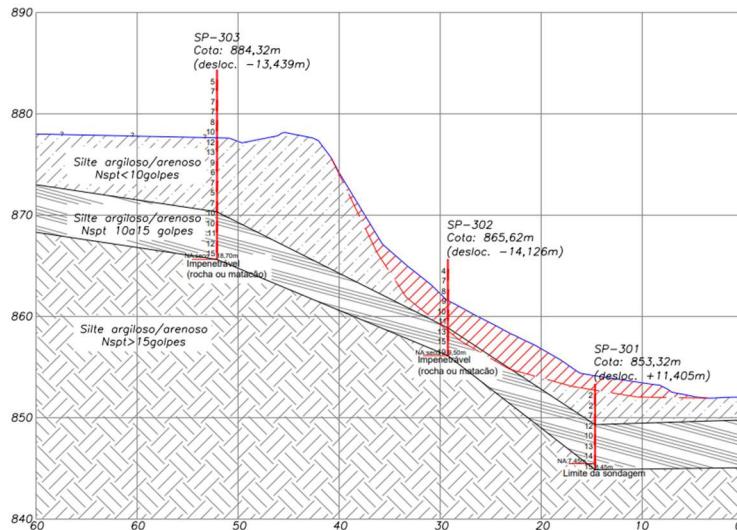


Figura 7. Seção geológica-geotécnica baseada nas sondagens SPT.

Para cada amostra indeformada, foi determinada uma envoltória de resistência ao cisalhamento na condição saturada. Os ensaios de cisalhamento direto indicaram ângulo de atrito efetivo variando entre 25,9° e 31,0°, e intercepto coesivo entre 12,7 kPa e 40,2 kPa.

Destaca-se que a heterogeneidade dos solos residuais de origem gnáissico-migmatítica pode levar a significativa dispersão nos resultados, já que os ensaios baseiam-se em amostras pontuais. Soma-se a isso a limitação intrínseca do ensaio de cisalhamento direto, no qual a superfície de ruptura é induzida e não necessariamente representa o comportamento real de campo. As estruturas reliquias presentes e sua influência na resistência global do talude dificilmente são captadas adequadamente por esse tipo de ensaio. Por isso, os valores obtidos devem ser analisados criticamente, ajustados por meio de retroanálise da ruptura e comparados a parâmetros típicos de solos dessa formação geológica.

3 DIAGNÓSTICO DE INSTABILIDADE

A geometria original dos taludes, anterior à ruptura de 2008, foi inferida com base na configuração dos taludes adjacentes, não rompidos. Com base nisso, considerou-se que a configuração original do talude na área de ruptura incluía uma bancada intermediária de 3 a 4 m, com um talude inferior de aproximadamente 12 m de altura e inclinação de 38°, e um talude superior com cerca de 13 m de altura e inclinação de 45°.

Após as intervenções executadas em 2016, essa geometria foi alterada. Na porção superior, acima da bancada, foi realizada a raspagem de material solto, resultando em um talude com inclinação mais acentuada, da ordem de 55°. Na porção inferior, abaixo da bancada, observa-se a provável execução de um aterro para recomposição da encosta, com altura de 12 m e inclinação aproximada de 35°. A Figura 8 apresenta a seção transversal da ruptura, com a geometria inferida para os cenários descritos.

De forma geral, a geometria dos taludes na região – tanto na área da ruptura quanto nas adjacências – diverge das práticas usualmente empregadas para cortes em solo, que preveem a adoção de bancadas intermediárias a cada 8 m de desnível. Assim, a própria configuração original já implica em fatores de segurança reduzidos, principalmente pela expressiva altura do talude (cerca de 25 m na seção central da ruptura).

Esse cenário se torna ainda mais crítico em períodos de chuvas intensas, quando ocorre a elevação do nível freático e o aumento do fluxo de água subsuperficial. A infiltração pluvial promove a saturação das camadas superficiais, reduzindo a sucção e, consequentemente, a resistência ao cisalhamento do solo. Esse processo foi identificado como o principal gatilho para a ruptura ocorrida em novembro de 2022.

Adicionalmente, destaca-se a influência das estruturas reliquias presentes nos solos residuais. Essas estruturas definem planos de fraqueza preferenciais, que favorecem a percolação da água e podem atuar como superfícies potenciais de ruptura, contribuindo de forma significativa para a instabilidade do talude.

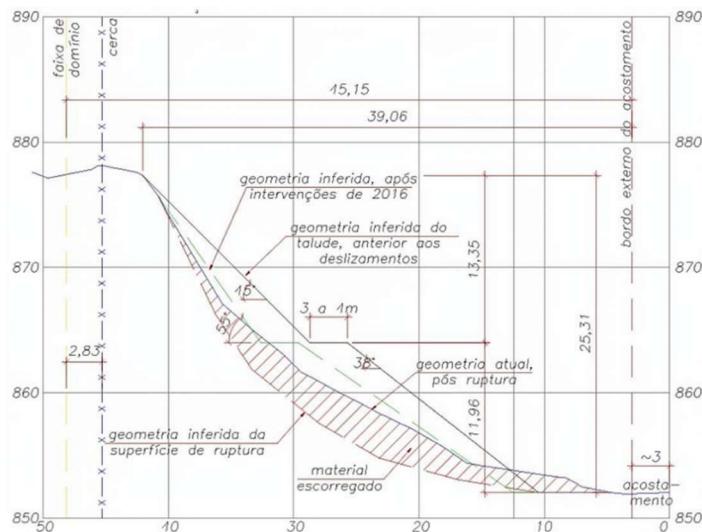


Figura 8. Seção transversal da ruptura, com a geometria inferida dos cenários anteriores à ruptura de 2022.

4 RETROANÁLISES DE ESTABILIDADE

As retroanálises de estabilidade foram realizadas com o objetivo de estimar os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos, com base no critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Utilizando o software Slope/w com o método de Morgenstern-Price, adotou-se um processo iterativo de ajuste dos valores de intercepto coesivo (c) e ângulo de atrito interno (ϕ') até que a condição de ruptura observada fosse reproduzida ($FS=1,0$). As análises foram baseadas nos resultados dos ensaios de cisalhamento direto, na estratigrafia obtida pelas sondagens e na geometria inferida do talude anterior aos eventos de ruptura, conforme ilustrado na Figura 9.

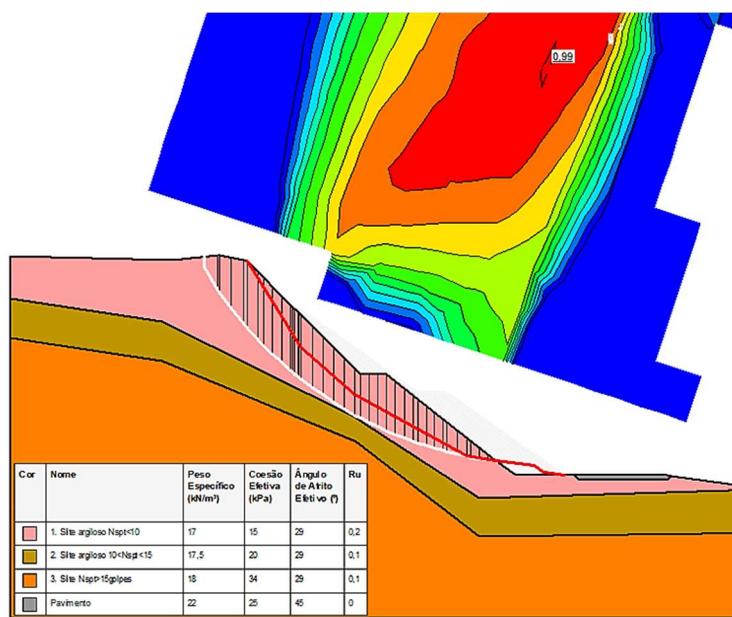


Figura 9. Retroanálise da ruptura.

Durante episódios de chuvas intensas e prolongadas, a infiltração de água pela superfície do talude pode gerar uma frente de saturação nas camadas superficiais, promovendo o aumento das pressões neutras e, consequentemente, a redução da resistência ao cisalhamento do solo. Para representar esse efeito na modelagem, adotou-se o parâmetro de poropressão r_u , o qual possibilita considerar a presença de pressão neutra sem a necessidade de definir explicitamente uma linha freática ou assumir a completa saturação do



macizo. Ressalta-se que o nível freático foi interceptado apenas na sondagem SP-301, o que impossibilitou a estimativa precisa de eventuais elevações do NA após períodos prolongados de chuva, bem como de sua influência sobre as camadas mais profundas. Assim, para a camada superficial foi adotado $r_u = 0,2$, representando maior suscetibilidade à infiltração, enquanto para as camadas inferiores considerou-se $r_u = 0,1$, valor condizente com a menor influência da percolação superficial.

Com base nessas premissas, foram definidos os parâmetros de resistência para as diferentes camadas geotécnicas. Os resultados da retroanálise mostraram boa compatibilidade com o comportamento observado em campo: a linha vermelha, na Figura 9, representa a topografia após a ruptura de 2022 (massa rompida), enquanto a linha branca indica a superfície de ruptura crítica obtida na modelagem. Embora exista certa discrepância entre a superfície crítica simulada e a observada em campo, os resultados da retroanálise são considerados satisfatórios para a estimativa dos parâmetros geotécnicos. Em termos globais, o mecanismo de instabilidade foi adequadamente reproduzido, resultando em parâmetros compatíveis com as características do solo local.

5 ESTUDO DE ALTERNATIVAS

Foram avaliadas três alternativas para a estabilização do talude: (i) retaludamento com enrocamento, (ii) solo grampeado com enrocamento e (iii) solo grampeado isolado. Para cada alternativa foram realizadas análises de estabilidade, atendendo aos critérios normativos quanto à segurança global, conforme a NBR 11682 – Estabilidade de Encostas (ABNT, 2009).

A alternativa (i) prevê a execução de um aterro de enrocamento com aproximadamente 11 m de altura e inclinação de 1:1,5 (V:H), para recomposição do talude inferior, incluindo a formação de uma bancada intermediária. O talude superior seria reconformado em taludes sucessivos de 8m de altura e inclinação de 1:1,4 (V:H), intercalados por bancadas de 4 m de largura. A alternativa (ii) mantém o mesmo conceito para o talude inferior (aterro de enrocamento e bancada), mas adota a técnica de solo grampeado para estabilização do talude superior. Já a alternativa (iii) propõe a estabilização integral – do talude inferior e superior – exclusivamente com solo grampeado, mantendo a presença de uma bancada intermediária.

A análise comparativa entre as soluções considerou critérios técnicos, econômicos e ambientais. Do ponto de vista econômico, a alternativa (ii) apresentou o menor custo, sendo cerca de 8% mais barata que a alternativa (i). Por outro lado, a alternativa (iii) teve o maior custo entre as opções avaliadas, devido aos elevados quantitativos de solo grampeado. Já com relação aos impactos ambientais, a alternativa (ii) gerou o menor volume de bota-fora. A alternativa (i), por sua vez, apresentou o maior volume de material excedente.

Outro fator relevante, especialmente sob a ótica da concessionária, é a área de desapropriação. A alternativa (i) requer maior área, enquanto nas alternativas (ii) e (iii), a necessidade de desapropriação é mínima, limitada a pequenas porções fora da faixa de domínio atual.

Do ponto de vista técnico, nenhuma das opções apresentou impedimentos relevantes. A alternativa (i) é a mais simples em termos construtivos, pois envolve essencialmente serviços de terraplenagem, contudo, exige maior área de intervenção e é mais dependente das condições climáticas. A alternativa (iii), apesar de dispensar terraplenagem significativa, apresenta alta complexidade executiva devido aos grandes quantitativos de solo grampeado.

Considerando de forma integrada os aspectos técnicos, econômicos, ambientais e de ocupação fora da faixa de domínio, a alternativa mais vantajosa é a (ii) – solo grampeado com enrocamento. Essa solução apresenta menor custo, menor volume de bota-fora, baixa exigência de desapropriação e média complexidade executiva, mostrando-se a mais adequada para a estabilização do talude.

6 PROJETO EXECUTIVO

A solução adotada para estabilização do talude consistiu na combinação de aterro em enrocamento na parte inferior e solo grampeado na parte superior. A seção típica da solução é apresentada na Figura 10.

O enrocamento com rachão tem por objetivo recompor a geometria da bancada intermediária e do talude inferior, com face externa inclinada a 1:1,5 (V:H). Devido à presença de uma camada de baixa resistência na base ($N_{SPT}=2$), foi prevista a execução de uma chave granular, com 2m de espessura. No contato entre o solo escavado e o rachão, será disposto um geotêxtil não tecido, com a finalidade de evitar a migração de finos para o interior do aterro. No fundo da chave granular, será instalado um tubo perfurado de PEAD, com aproximadamente 150mm de diâmetro, interligado a um dreno longitudinal profundo, garantindo o escoamento



da água acumulada. Acima do nível da bancada, a estabilização do talude superior será realizada por meio da técnica de solo grampeado, com faceamento em concreto projetado.

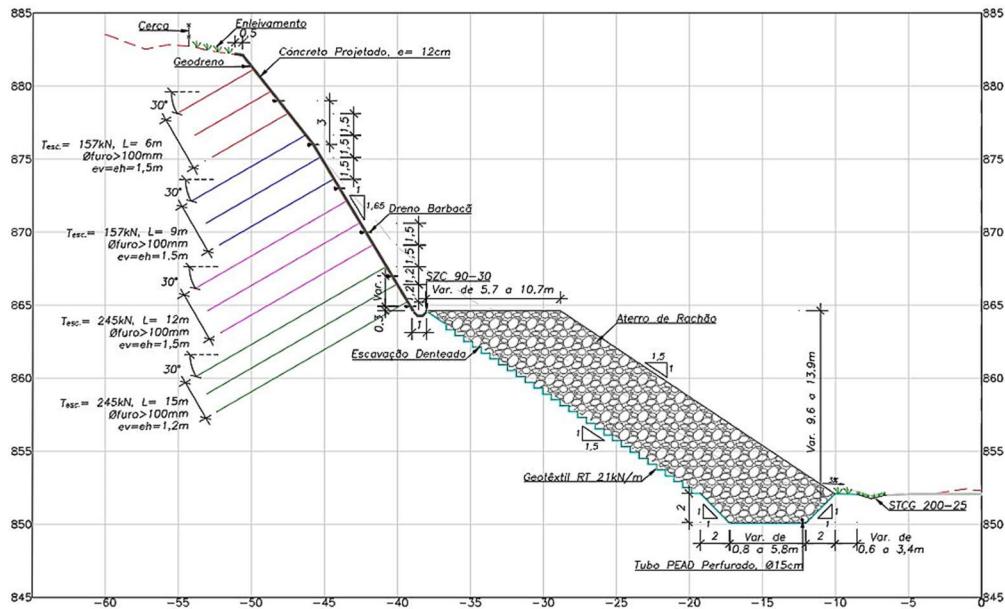


Figura 10. Seção transversal 054+460 da solução de contenção.

O dimensionamento geotécnico seguiu os critérios estabelecidos pela NBR 11682 (ABNT, 2009), que define fatores de segurança mínimos com base no nível de risco à vida humana, perdas materiais e impactos ambientais. Por se tratar de uma rodovia de tráfego intenso, o local foi classificado como de alto risco à vida humana e risco médio para perdas materiais, exigindo $FS \geq 1,50$.

As análises de estabilidade foram conduzidas no software Slope/w, utilizando o método de equilíbrio limite de Morgenstern-Price, com a adoção das propriedades dos materiais calibradas na retroanálise. As análises consideraram gramos com duas capacidades de tração: 130 kN e 210 kN, correspondentes a barras de 20 mm e 25 mm de diâmetro, ambas com tensão de escoamento de 450 MPa. O espaçamento entre gramos foi de 1,5 m na horizontal e vertical, exceto para os gramos de 15 m, cujo espaçamento foi reduzido para 1,2m. Os comprimentos dos gramos foram definidos de modo a garantir os fatores de segurança exigidos para todas as superfícies potenciais de ruptura. Gramos mais longos foram associados a maiores cargas de tração, sendo dimensionados para alcançar camadas mais competentes de solo residual, com embutimento adequado.

Um parâmetro fundamental no dimensionamento foi o valor de qs , que representa a adesão entre a calha de cimento e o solo ao redor do grampo. Utilizou-se a Equação 1, proposta pelo Manual Técnico de Encostas da GEORIO (1999), que correlaciona o qs com o valor de N_{SPT} da camada de solo.

$$qs = 50 + 7,5 * N_{SPT} \quad (\text{kPa}) \quad (1)$$

Com base nos valores de N_{SPT} adotou-se $qs=100\text{kPa}$ para o solo residual superficial ($N_{SPT}=7$) e $qs=150\text{kPa}$ para a camada de solo residual mais profunda ($N_{SPT}=15$). Esses valores devem ser verificados em campo por meio de ensaios de arrancamento em gramos de sacrifício, conforme o Anexo A da NBR 16920-2 (ABNT, 2021).

A Figura 11 apresenta o resultado da análise de estabilidade da seção 054+460, correspondente ao trecho com maior altura do talude. O menor fator de segurança obtido foi de 1,50, atendendo ao critério normativo. A superfície de ruptura crítica, destacada em branco, atravessa todo o perfil do talude - superior e inferior – atingindo camadas profundas de solo residual. Em função disso, os gramos foram dimensionados com comprimentos elevados, de modo a interceptar camadas mais competentes e garantir a estabilidade global da estrutura.

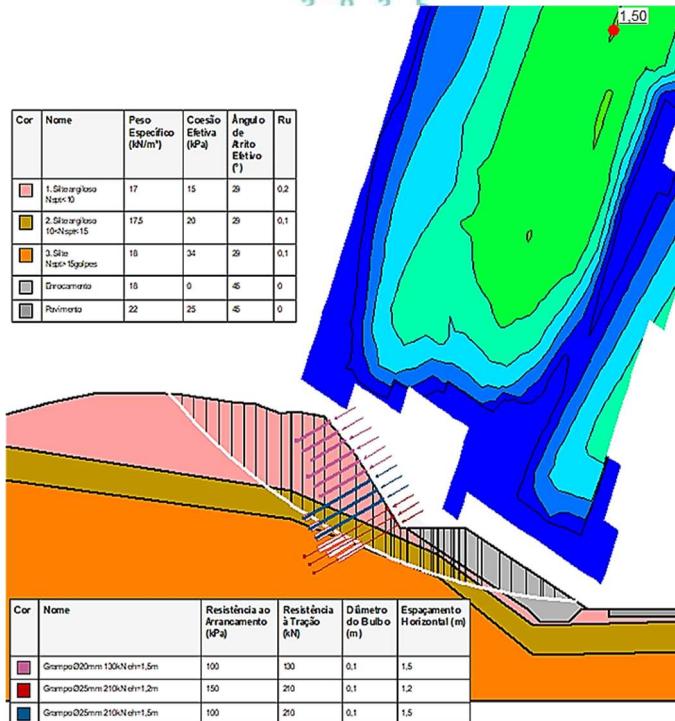


Figura 11. Análise de estabilidade global da seção 054+460.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo apresentou as principais etapas de desenvolvimento do projeto executivo para estabilização de taludes na rodovia BR-116/PR, em um trecho com histórico de rupturas reincidentes. A análise integrada das condições geológicas, geotécnicas e hidrológicas foi fundamental para o entendimento do mecanismo de instabilidade e para a definição técnica da solução mais adequada.

A alternativa adotada — solo grampeado combinado com aterro de enrocamento — apresentou o melhor desempenho global entre as opções avaliadas. Além de atender aos critérios normativos de estabilidade, mostrou-se mais econômica, com menor impacto ambiental e baixa necessidade de desapropriação, configurando-se como a alternativa mais eficiente e viável para o contexto da obra.

Embora este trabalho tenha se concentrado nos aspectos geotécnicos, a elaboração completa do projeto executivo deve incluir também o dimensionamento estrutural do faceamento em concreto projetado e o sistema de drenagem superficial, ambos fundamentais para o desempenho e durabilidade da contenção.

A experiência adquirida reforça a importância de uma abordagem multidisciplinar, do uso de investigações geotécnicas adequadas e da aplicação de ferramentas de modelagem como suporte à tomada de decisão. Cada projeto de contenção demanda uma análise criteriosa de suas particularidades, sendo imprescindível a adoção de soluções compatíveis com o contexto geotécnico local para garantir a segurança, a eficácia e a sustentabilidade das intervenções.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Arteris Régis Bittencourt pela confiança e pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (2009). NBR 11682. *Estabilidade de Encostas*. Rio de Janeiro.

ABNT (2021). NBR 16920-2. *Muros e Taludes em Solos Reforçados – Parte 2: Solos Grampeados*. Rio de Janeiro.

GEORIO (1999). *Manual Técnico de Encostas da GeoRio – Ancoragens e Grampos, Volume 4*. Prefeitura do Rio – Secretaria Municipal de Obras. Rio de Janeiro.

MINEROPAR (2008). *Mapa Geológico da Folha Curitiba. Escala 1:250.000*. Disponível em: <https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-04/curitiba.pdf>