

Projeto de Recuperação de Talude Rodoviário com Solo Grampeado na Rodovia BR-376/PR

Guilherme de Araújo Rochedo

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

Marcos Strauss

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

Gustavo Heinen Strauss

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

Thiago Conte Lorenzoni

Eng. Civil, Singe Infraestrutura e Geotecnia, Porto Alegre, Brasil, thiago@singeengenharia.com.br

RESUMO: Taludes rodoviários em regiões de serra estão particularmente suscetíveis a rupturas desencadeadas por chuvas intensas, representando riscos significativos à segurança viária. No km 668+880 da BR-376/PR, duas instabilidades sucessivas mobilizaram grande volume de solo, atingindo a pista e arrastando veículos. A partir de observações de campo e investigações geotécnicas, foi diagnosticado o mecanismo de ruptura. Para reestabelecer a operação segura da rodovia, elaborou-se um projeto de estabilização utilizando a técnica de solo grampeado. A análise técnica baseou-se em sondagens mistas, ensaios de cisalhamento direto e análises de estabilidade. Três alternativas de contenção foram avaliadas - cortina atirantada, solo grampeado e retaludamento - considerando critérios técnicos, econômicos e ambientais. A solução em solo grampeado foi adotada por apresentar vantagens em todos os quesitos avaliados, sendo dimensionada conforme as normas NBR 11682/2009 e NBR 16920-2/2021. O caso destaca a importância de uma abordagem integrada em projetos geotécnicos, 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, Ruptura de Talude, Retroanálise, Diagnóstico do Mecanismo de Ruptura, Estudo de Alternativas.

ABSTRACT: Highway slopes in mountainous regions are particularly susceptible to failures triggered by intense rainfall, posing significant risks to traffic safety. At km 668+880 of the BR-376/PR, two successive slope instabilities mobilized a large volume of soil, reaching the road and dragging vehicles. Based on field observations and geotechnical investigations, the failure mechanism was identified. To restore safe road operation, a stabilization project was developed using the soil nailing technique. The technical analysis was based on mixed borings, direct shear tests, and slope stability assessments. Three containment alternatives were evaluated—anchored retaining wall, soil nailing, and regrading—considering technical, economic, and environmental criteria. Soil nailing was selected for presenting advantages across all evaluated aspects and was designed in accordance with Brazilian standards NBR 11682/2009 and NBR 16920-2/2021. The case highlights the importance of an integrated approach in geotechnical projects, combining diagnosis, field investigation, and numerical modeling to support efficient solutions in contexts of high geotechnical complexity.

KEYWORDS: Slope Stability, Residual Soils, Slope Failure, Back Analysis, Failure Mechanism Diagnosis, Evaluation of Alternatives.

1 INTRODUÇÃO

A rodovia BR-376/PR é uma das principais vias de ligação entre o estado do Paraná e a região Sul do Brasil, desempenhando papel estratégico no escoamento de cargas, no transporte intermunicipal e no turismo. Ao longo de seu traçado, atravessa diversos domínios geológicos, com destaque para os trechos de serra, onde

o relevo acidentado e a frequência de chuvas intensas aumentam consideravelmente o risco de instabilidades em taludes.

Em novembro de 2022, após um período de precipitações acima da média na região serrana de Guaratuba/PR, ocorreram duas rupturas consecutivas em taludes de corte, mobilizando cerca de 10.000 m³ de material e atingindo diretamente a rodovia. Mesmo após a remoção emergencial da massa rompida e liberação parcial do tráfego, os taludes permaneceram instáveis, exigindo medidas definitivas de recuperação.

Diante desse cenário, foi desenvolvido um Projeto Executivo de Recuperação de Terraplenos com foco na estabilização das encostas e na rápida restauração da segurança operacional da rodovia. Este trabalho apresenta o estudo de caso dessas instabilidades, abordando o processo de diagnóstico geotécnico, retroanálises de estabilidade e o dimensionamento da contenção por solo grampeado, conforme os critérios estabelecidos pelas normas brasileiras vigentes.

2 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL

A Figura 1 apresenta o mapa de localização e a imagem de satélite da área afetada.



Figura 1. Mapa de localização e Imagem de Satélite do local da ruptura no km 668+880.

A rodovia BR-376/PR na região de estudo é composta por duas pistas — Sul e Norte — cada uma com três faixas de rolamento. No sentido Pista Sul, há um talude de corte com aproximadamente 35 m de altura, seguido por uma estrada antiga não pavimentada, e, posteriormente, um talude de encosta natural. Já no sentido Pista Norte, o segmento é contido por uma cortina atirantada com aproximadamente 14 m de altura.

2.1 Descrição da Ruptura

O evento analisado envolveu duas rupturas distintas. A primeira (Ruptura 1) ocorreu a montante de uma estrada antiga, não pavimentada e sem dispositivos de drenagem, localizada em cota superior à rodovia. Trata-se de uma ruptura planar em solo residual, com dimensões estimadas de 25 m de altura, 35 m de extensão e até 2 m de espessura, mobilizando cerca de 1.000 m³ de solo. Devido ao perfil em corte tipo “caixão” da estrada, o material deslocado ficou predominantemente acumulado sobre a própria estrada, obstruindo-a completamente, com altura de até 2 m. A segunda (Ruptura 2) ocorreu no talude adjacente à pista Sul da BR-376/PR, envolvendo solo e blocos de rocha. Essa ruptura apresentou dimensões aproximadas de 30 m de altura, 50 m de extensão e até 8 m de espessura, mobilizando cerca de 10.000 m³ de material. A massa, composta majoritariamente por solo extremamente saturado e em grande parte liquefeito, deslocou-se por mais de 70 metros a partir do talude de origem, ultrapassando em mais de 40 m a cortina atirantada da Pista Norte. O deslocamento ocorreu com tal velocidade e energia que arrastou veículos, inclusive lançando um caminhão a mais de 30 m além da pista. A cortina atirantada, com aproximadamente 65 m de extensão e 14 m de altura, não apresentou danos estruturais visíveis nos painéis de concreto, embora três cabeças de tirantes tenham sido arrancadas, possivelmente devido ao impacto de veículos tombados. A Figura 2 ilustra os principais elementos descritos.



Figura 2. Vista frontal da ruptura, com indicação de elementos relevantes (30/11/2022).

2.2 Caracterização geológica regional

Segundo o Mapa Geológico do Paraná - Carta Curitiba (MINEROPAR/ITC, 2008), a área de estudo está inserida em terrenos de rochas metamórficas do Complexo Gnáissico-Migmatítico (APImgm), de idade Proterozoico Inferior (Arqueano). Essas rochas apresentam elevado grau de intemperismo e fraturamento, favorecendo o desenvolvimento de espessos perfis de alteração, com horizontes de rocha muito alterada. Na Ruptura 1, o mapeamento geológico identificou que toda a face rompida é composta por solo de alteração, predominantemente um solo maduro (horizonte B), caracterizado tátil e visualmente como argila silto-arenosa muito fina, com zonas lisas e brilhantes. Na Ruptura 2, a face exposta é constituída por dois tipos de solo residual: um solo maduro (horizonte B), argiloso silto-arenoso avermelhado, e um solo saprolítico (horizonte C), siltoso marrom-avermelhado. Um afloramento de rocha metamórfica se sobressai na região central do talude, próximo à crista, apresentando fraturas subverticais e sub-horizontais com mergulho em direção à rodovia, estendendo-se do flanco esquerdo até quase o direito.



Figura 3. Vista frontal da Ruptura 1 (esquerda) e da Ruptura 2 (direita).

2.3 Investigação geotécnica

Com o objetivo de caracterizar as condições geológico-geotécnicas da área de estudo, foram realizadas quatro sondagens mistas, além de ensaios de cisalhamento direto em amostras indeformadas. Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados em duas condições de saturação: umidade natural e solo saturado

(condição inundada), permitindo avaliar a redução do intercepto coesivo em função da saturação. A Figura 4 apresenta a localização das sondagens (SM) e dos pontos de coleta das amostras utilizadas nos ensaios (CD).

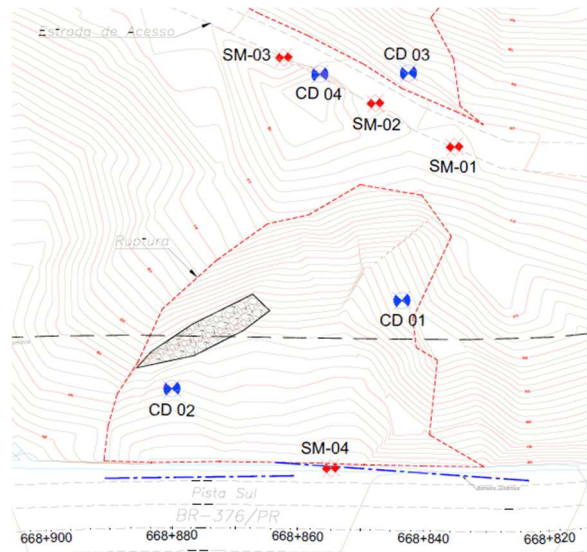


Figura 4. Localização das sondagens mistas (SM) e dos locais de coleta das amostras indeformadas (CD).

As sondagens, executadas até 30 m de profundidade, permitiram identificar um perfil geotécnico composto por solo residual maduro (horizonte B), solo residual jovem (horizonte C), saprólito (rocha muito alterada) e rocha alterada, com interfaces graduais entre os horizontes. Para fins de projeto, os estratos foram agrupados com base nos valores de N_{SPT} . O horizonte B apresenta espessura entre 3 e 7 m, com N_{SPT} entre 1 e 2 golpes, predominando solos de coloração marrom e textura variando entre argila arenosa, argila silteosa e silte argiloso. O horizonte C possui espessura de 7 a 12 m, com N_{SPT} entre 3 e 12 golpes, formado por silte arenoso ou silte argiloso, com tonalidades marrom claro e marrom amarelado. Abaixo, ocorre a camada de rocha muito alterada, com espessura variando de 3 a 8 m e N_{SPT} entre 12 e 32 golpes, composta predominantemente por areia silteosa de cor marrom amarelada. Em maiores profundidades, foram identificadas camadas com N_{SPT} superiores a 50 golpes, caracterizadas como rocha alterada, também formada por areia silteosa de mesma coloração. O nível d'água foi registrado entre 12 e 15 m de profundidade.

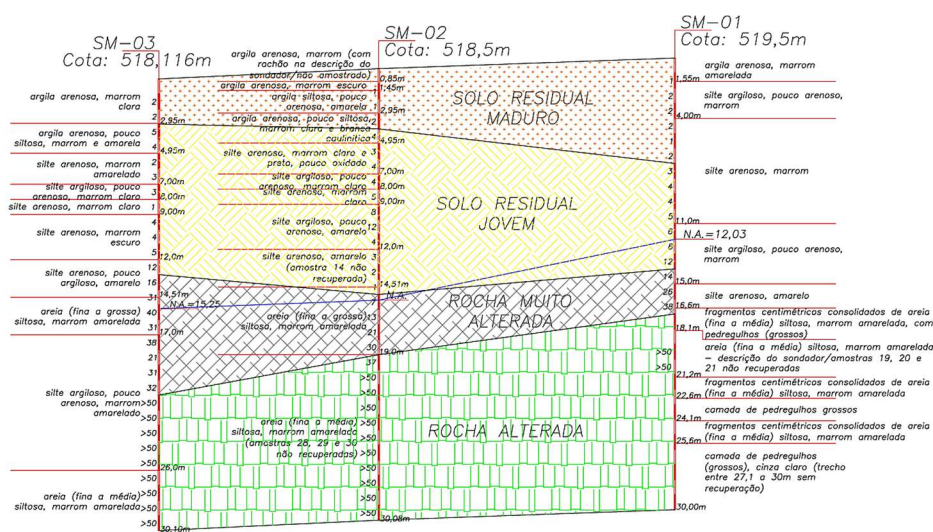


Figura 5. Perfil geológico no alinhamento das sondagens SM-01, SM-02 e SM-03.

Os ensaios de cisalhamento direto realizados possibilitaram a determinação dos parâmetros de resistência das amostras coletadas. Verificou-se, nesses ensaios, uma redução significativa do intercepto coesivo (c') na condição inundada. A Tabela 1 apresenta o resumo dos resultados obtidos.



Tabela 1. Resumo dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos materiais.

Amostra	Material	w (%)	γ_{nat} (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	Ensaio umidade natural		Ensaio inundado	
					c' (kPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)
1	Solo residual	40,8	17,3	12,3	5,1	31,6	5,6	30,2
2	Saprólito (rocha muito alterada)	28,1	17,3	13,5	23,1	39,1	7,7	34,8
3	Solo residual	34,2	16,1	12,0	17,1	26,8	8,9	27,3
4	Solo residual	41,1	14,7	10,4	16,6	25,6	7,5	26,4

3 DIAGNÓSTICO DE INSTABILIDADE

Com base na descrição das rupturas e nas observações realizadas durante as visitas técnicas, concluiu-se que o evento foi resultado de um processo progressivo de instabilidade, condicionado pelas chuvas intensas. Inicialmente, a saturação dos solos e das discontinuidades rochosas na encosta a montante da BR-376 favoreceu a ocorrência da Ruptura 1. A massa deslocada foi depositada sobre a estrada antiga, cuja seção em corte tipo “caixão” funcionou como um barramento natural. O escoamento superficial oriundo da encosta foi interceptado por essa estrada, acumulando-se atrás do material rompido e formando um alagamento com lâmina d'água superior a 1 m. Parte desse volume infiltrou-se no talude a jusante, elevando substancialmente seu grau de saturação. Com o aumento do represamento, o fluxo excedente transbordou lateralmente a estrada antiga por um ponto rebaixado no flanco direito, justamente onde se desenvolveria a Ruptura 2. O escoamento concentrado, somado à elevada saturação do solo, desencadeou o segundo rompimento. Devido ao alto teor de umidade, o solo entrou em estado de liquefação, conferindo à massa instável alta mobilidade e energia, o que permitiu seu deslocamento por longa distância e o arraste de vários veículos.

Quanto à influência da geologia na instabilidade, observa-se, no talude remanescente, a presença de estruturas rochosas com mergulho em direção à rodovia. Todavia, os resultados das sondagens, aliados às demais evidências de campo, indicam que esse afloramento rochoso ocorre de forma pontual, não configurando uma camada geológica contínua. Dessa forma, sua contribuição para a dinâmica da ruptura é considerada limitada.

4 RETROANÁLISES DE ESTABILIDADE

As retroanálises de estabilidade foram realizadas com o objetivo de estimar os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos. 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 consideraram os resultados dos ensaios de cisalhamento direto, a estratigrafia obtida nas sondagens mistas e a topografia anterior ao evento para modelagem.

Como as sondagens foram realizadas cerca de 45 dias após as rupturas, os níveis d'água registrados não refletiram com precisão as condições hidrológicas vigentes no momento do evento. Por isso, a distribuição das poro-pressões foi ajustada durante a retroanálise, de modo a simular os efeitos das precipitações acumuladas. Para o solo residual maduro (horizonte B), considerou-se um nível freático calibrado com base na saturação observada nas imediações da estrada antiga. No caso do solo residual jovem (horizonte C), não foram identificadas surgências relevantes nem indícios de saturação total, sendo adotado um coeficiente de pressão neutra $ru=0,2$, representando uma frente de saturação parcial.

A modelagem também diferenciou o comportamento do solo residual maduro em condições não saturada e saturada, conforme evidenciado nos ensaios. A rocha alterada, por sua vez, foi considerada impenetrável, não sendo admitidas superfícies de ruptura que a atravessassem.

Com base nessas premissas, foram definidos os parâmetros de resistência das diferentes camadas geotécnicas, conforme apresentado na Figura 6. Os resultados obtidos mostram boa compatibilidade com o comportamento real observado: as regiões hachuradas em vermelho correspondem às superfícies de ruptura com fatores de segurança entre 0,96 e 1,06, justamente nas áreas que coincidem com as duas rupturas. Essa correspondência evidencia a adequação dos parâmetros adotados e a confiabilidade da retroanálise realizada.

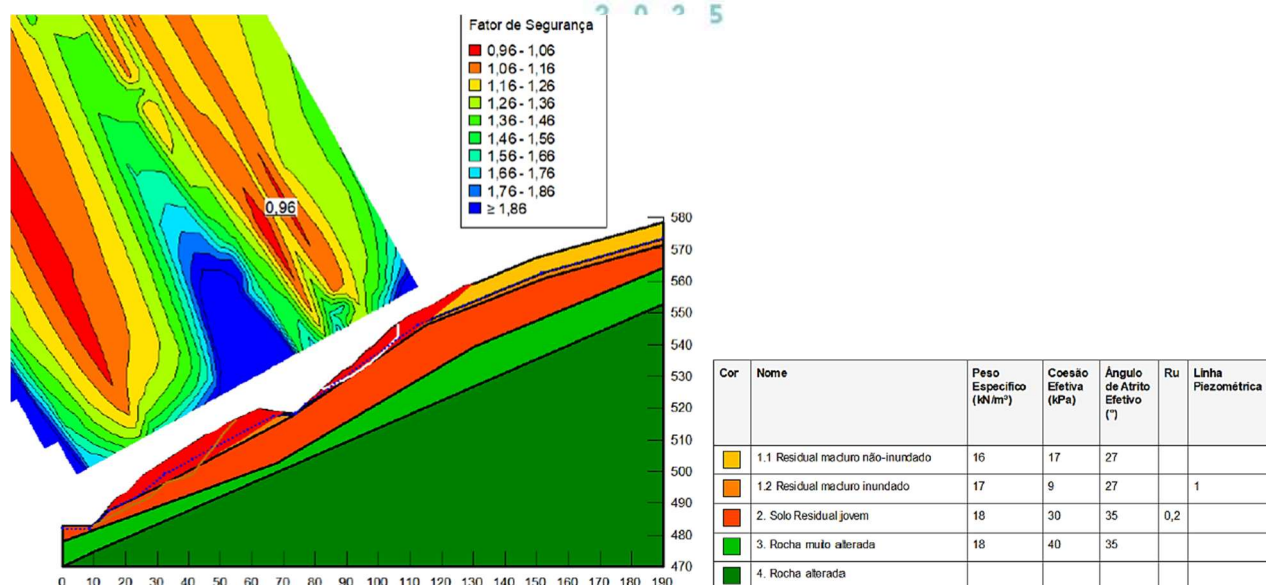


Figura 6. Retroanálise das rupturas.

5 ESTUDO DE ALTERNATIVAS

Foram avaliadas três alternativas para a estabilização do talude: (i) cortina atirantada com solo grampeado, (ii) solo grampeado isolado e (iii) retaludamento. Devido à elevada altura e inclinação da encosta, soluções com emprego de muros de gravidade junto à rodovia não são tecnicamente viáveis. Tais soluções exigem bases largas (tão largas quanto maior a altura da contenção), sendo que as escavações necessárias para sua implantação inviabilizam a execução destas técnicas.

Inicialmente, foram realizadas análises de estabilidade para as três opções, assegurando atendimento ao fator de segurança global conforme a NBR 11682 – Estabilidade de Encostas (ABNT, 2009).

A alternativa (i) propõe uma cortina atirantada de cerca de 8m de altura, implantada na base do talude junto à rodovia, ancorada por tirantes protendidos (solução ativa). O restante da encosta seria estabilizado com solo grampeado (solução passiva), com escavação de uma bancada intermediária. A alternativa (ii) adota exclusivamente o solo grampeado ao longo de toda a encosta, também com escavação de bancada, eliminando a necessidade de múltiplas técnicas. A opção (iii) envolve o retaludamento, ou seja, a reconformação do terreno com taludes de 8m de altura intercalados por bancadas de 4m, dispensando o uso de grampos ou tirantes.

A análise comparativa considerou critérios técnicos, econômicos e ambientais. O retaludamento foi descartado por demandar ampla intervenção em área de proteção ambiental (APA de Guaratuba), acarretando elevado impacto ambiental. Além disso, a dificuldade de acesso de máquinas pesadas e caminhões para remoção do expressivo volume de material escavado em encosta íngreme compromete sua viabilidade técnica.

Entre as duas alternativas remanescentes, os custos e impactos ambientais mostraram-se similares. No entanto, do ponto de vista técnico, o solo grampeado isolado (alternativa ii) apresentou vantagens relevantes, como a aplicação de uma única metodologia construtiva, o que reduz o prazo de execução - aspecto crítico diante da necessidade de reabertura rápida da rodovia. A solução com cortina atirantada, por sua vez, exige execução em etapas e tempo adicional para cura do concreto antes da protensão.

Dessa forma, foi selecionada a alternativa (ii) - solo grampeado isolado - por atender aos requisitos normativos, garantir a estabilidade da encosta, possibilitar menor prazo de execução, apresentar custo ligeiramente inferior e menor impacto ambiental.

6 PROJETO EXECUTIVO DA CONTENÇÃO EM SOLO GRAMPEADO

A solução de contenção consiste no emprego de solo grampeado para a estabilização de ambas as rupturas: Ruptura 1 (talude acima da estrada antiga) e Ruptura 2 (talude entre a rodovia e a estrada antiga). A proposta inclui também a instalação de drenos horizontais profundos (DHPs) para rebaixamento do nível d'água nos dois taludes. A seção transversal típica está ilustrada na Figura 7.

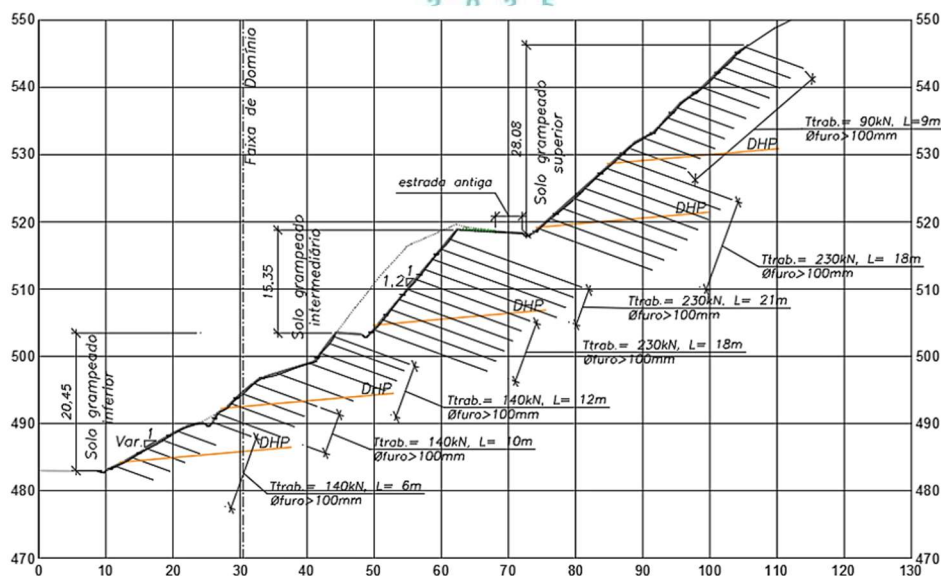


Figura 7. Seção transversal típica da solução de contenção em solo grampeado

O dimensionamento geotécnico foi realizado conforme as diretrizes da NBR 11682 – Estabilidade de Encostas (ABNT, 2009), que define critérios de segurança com base nos níveis de risco à vida humana, danos materiais e impactos ambientais. Como se trata de uma rodovia de tráfego intenso, o local foi classificado como de alto risco à vida humana e risco médio para perdas materiais, exigindo fator de segurança (FS) mínimo de 1,50. Nas análises de estabilidade foram adotadas as propriedades dos materiais definidas na retroanálise, com exceção da linha freática, onde foi considerada a atuação dos drenos horizontais profundos DHPs.

O comprimento dos grampos foi definido de modo a garantir $FS \geq 1,50$ para as superfícies potenciais de ruptura. Devido à elevada altura dos taludes, foram adotados grampos de diferentes comprimentos e cargas de trabalho (90kN, 140kN e 230kN), de acordo com sua posição ao longo do talude. Grampos mais longos foram associados a cargas de trabalho maiores, sendo dimensionados para atingir o solo residual jovem e/ou a rocha muito alterada, com embutimento adequado. Os espaçamentos horizontal e vertical foram padronizados em 1,5m, e diversas configurações foram simuladas até a definição final.

Um parâmetro fundamental no dimensionamento dos grampos é o valor de q_s – adesão entre a calda de cimento e o solo circundante ao grampo. Para estimá-lo utilizou-se a Equação 1 proposta pelo Manual Técnico de Encostas da GEORIO (1999), que correlaciona o q_s com o N_{SPT} da camada de solo.

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

Com base nos valores de N_{SPT} adotou-se $q_s = 100\text{kPa}$ para o solo residual jovem ($N_{SPT}=6$) e $q_s = 200\text{kPa}$ para a rocha muito alterada ($N_{SPT}=20$). Esses valores devem ser verificados em campo por meio de ensaios de arrancamento em grampos de sacrifício, conforme o Anexo A da NBR 16920-2 (ABNT, 2021).

A Figura 8 apresenta os resultados da análise de estabilidade da seção 668+850. O menor fator de segurança obtido foi de 1,50, atendendo ao critério normativo. Observa-se a presença de superfícies potenciais localizadas no talude superior, no talude inferior e englobando ambos os taludes. A superfície crítica, destacada em branco, atravessa tanto o talude superior quanto o inferior, perpassando o solo residual jovem em elevada profundidade. Por esse motivo, os grampos foram definidos com comprimento bastante elevado, atravessando a camada de solo residual jovem até atingir ou se aproximar da rocha muito alterada.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo apresentou as principais etapas de desenvolvimento do projeto executivo de recuperação de taludes na rodovia BR-376/PR, atingida por dois eventos de ruptura com significativa mobilização de massa e impacto direto sobre a segurança viária. A análise integrada das condições geológicas, geotécnicas e hidrológicas foi fundamental para o entendimento dos mecanismos de instabilidade e embasou tecnicamente a definição da solução mais apropriada.

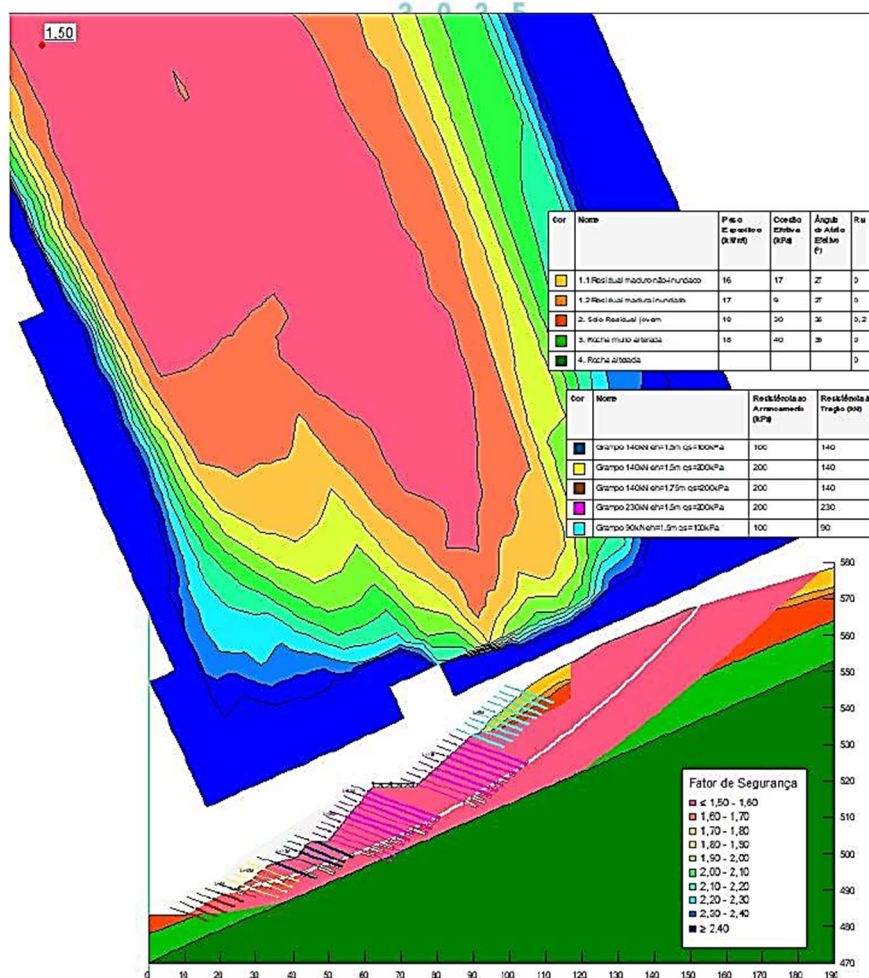


Figura 8. Análise de estabilidade da seção principal (668+850).

A alternativa adotada, baseada na técnica de solo grampeado com faceamento em concreto projetado, mostrou-se tecnicamente eficiente, economicamente viável e com menor impacto ambiental em comparação às demais soluções analisadas. A escolha atendeu aos critérios normativos de estabilidade e à necessidade de rápida liberação da rodovia, em contexto de tráfego intenso.

Por fim, a experiência adquirida reforça a importância de uma abordagem multidisciplinar, do emprego de investigações geotécnicas adequadas e da utilização de ferramentas de modelagem como suporte à tomada de decisão. Cada projeto de estabilidade de taludes exige uma análise criteriosa de suas particularidades, sendo imprescindível a adoção de soluções compatíveis com as condições locais para garantir a segurança, eficácia e sustentabilidade das intervenções.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Arteris Litoral Sul 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.

Federal Highway Administration (2015). *Soil Nail Walls – Reference Manual*. In: Report FHWA-NHI-12-007, U.S. Department of Transportation. Washington, DC, USA.

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