

Viabilidade técnica e econômica do uso de geossintéticos na estabilização de taludes rodoviários: Um estudo aplicado Km 19 da BR-230 em João Pessoa

Technical and economic feasibility of using geosynthetics in the stabilization of road embankments: An applied study at Km 19 of BR-230 in João Pessoa

Viabilidad técnica y económica del uso de geosintéticos en la estabilización de taludes viales: Un estudio aplicado en el Km 19 de la BR-230 en João Pessoa

Recebido: 17/11/2025 | Revisado: 22/11/2025 | Aceitado: 22/11/2025 | Publicado: 23/11/2025

Hanna Barreto de Araújo Falcão Moreira

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0325-7519>

Universidade Federal de Pernambuco, Brasil

E-mail: hanna.bfalcão@ufpe.br

Wilson Ramos Aragão Júnior

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8998-7611>

Universidade Federal de Pernambuco, Brasil

E-mail: wilsonramosaragao@hotmail.com

Resumo

Os movimentos de massa que afetam taludes instáveis, em sua maioria, resultam da influência de fatores externos, como a infiltração de águas pluviais, o descarte inadequado de águas superficiais, cortes executados sem critérios técnicos e a aplicação de sobrecargas provenientes de edificações. Para mitigar esses efeitos e elevar o nível de segurança das áreas, diferentes sistemas de contenção podem ser empregados, variando quanto aos materiais utilizados, ao desempenho e aos custos de execução. Entre as alternativas disponíveis, o uso de geossintéticos tem se destacado. Esses materiais poliméricos, produzidos industrialmente, são aplicados com o objetivo de melhorar ou substituir soluções convencionais em obras geotécnicas. Dentre suas vantagens estão o aumento da resistência à tração do maciço, a facilidade de instalação, o baixo custo e a rápida execução. Neste contexto, o presente estudo propõe a adoção de uma solução em solo reforçado com geogrelha para estabilizar o talude localizado no Km 19 da BR-230, em João Pessoa, área que apresenta recorrência de escorregamentos durante períodos de elevada pluviosidade. O pré-dimensionamento foi conduzido considerando as verificações de estabilidade interna e externa, com avaliação do Fator de Segurança realizada por meio do software GeoSlope, que indicou incremento significativo de resistência. A partir da solução proposta, foi elaborado um orçamento preliminar e comparado com alternativas previamente estudadas para a mesma localidade. Os custos da cortina atirantada foram atualizados com base nos índices do DNIT. Os resultados demonstraram que o solo reforçado com geogrelha apresenta custos inferiores, configurando-se como uma alternativa tecnicamente eficiente e economicamente viável.

Palavras-chave: Estabilidade de Talude; Geossintético; Solo Reforçado; Orçamento.

Abstract

Mass movements affecting unstable slopes largely result from the influence of external factors, such as the infiltration of rainwater, improper disposal of surface water, cuts executed without technical criteria, and the application of overloads from buildings. To mitigate these effects and increase the safety of areas, different retaining systems can be employed, varying in materials used, performance, and construction cost. Among the available alternatives, the use of geosynthetics has gained prominence. These polymeric materials, industrially manufactured, are applied with the aim of improving or replacing conventional solutions in geotechnical works. Their advantages include increased tensile resistance of the soil mass, ease of installation, low cost, and rapid execution. In this context, the present study proposes the adoption of a reinforced-soil solution using geogrids to stabilize the slope located at Km 19 of BR-230, in João Pessoa, an area marked by recurrent landslides during periods of high rainfall. The preliminary design was carried out considering internal and external stability checks, with the Safety Factor evaluated using the GeoSlope software, which indicated a significant increase in resistance. Based on the proposed solution, a preliminary cost estimate was prepared and compared with alternatives previously studied for the same location. The costs of the anchored retaining wall were updated according to DNIT adjustment indices. The results demonstrated that the geogrid-reinforced soil presents lower costs, establishing itself as a technically efficient and economically viable alternative.

Keywords: Slope Stability; Geosynthetic; Reinforced Soil; Cost Estimate.

Resumen

Los movimientos de masa que afectan taludes inestables resultan, en su mayoría, de la influencia de factores externos, como la infiltración de aguas pluviales, la disposición inadecuada de aguas superficiales, cortes ejecutados sin criterios técnicos y la aplicación de sobrecargas provenientes de edificaciones. Para mitigar estos efectos y aumentar la seguridad de las áreas adyacentes, pueden emplearse distintos sistemas de contención, que varían según los materiales utilizados, el desempeño y los costos de ejecución. Entre las alternativas disponibles, el uso de geosintéticos se ha destacado. Estos materiales poliméricos, producidos industrialmente, se aplican con el objetivo de mejorar o sustituir soluciones convencionales en obras geotécnicas. Sus ventajas incluyen el incremento de la resistencia a tracción del macizo, la facilidad de instalación, el bajo costo y la rápida ejecución. En este contexto, el presente estudio propone la adopción de una solución de suelo reforzado con geogrelha para estabilizar el talud ubicado en el Km 19 de la BR-230, en João Pessoa, área marcada por deslizamientos recurrentes durante períodos de alta pluviosidad. El predimensionamiento se realizó considerando las verificaciones de estabilidad interna y externa, con la evaluación del Factor de Seguridad mediante el software GeoSlope, que indicó un incremento significativo de la resistencia. A partir de la solución propuesta, se elaboró un presupuesto preliminar y se comparó con alternativas previamente estudiadas para la misma localidad. Los costos de la cortina anclada fueron actualizados según los índices de reajuste del DNIT. Los resultados demostraron que el suelo reforzado con geogrelha presenta costos inferiores, configurándose como una alternativa técnica y económicamente viable.

Palabras clave: Estabilidad de Taludes; Geosintéticos; Suelo Reforzado; Presupuesto.

1. Introdução

Os movimentos de massa correspondem ao deslocamento de materiais ao longo de encostas decorrente predominantemente da ação da gravidade, sendo geralmente desencadeados por agentes externos, como chuvas intensas ou eventos sísmicos (Tiga, 2013). Em zonas urbanas, a frequência desses processos tende a aumentar em razão de intervenções humanas inadequadas, como lançamento de águas servidas sobre taludes, execução de cortes e aterros sem critérios técnicos, remoção ou introdução indevida de vegetação e implantação de edificações que impõem sobrecargas às encostas (Macedo & Martins, 2015).

Esses fenômenos figuram entre os desastres naturais mais impactantes, podendo superar, em determinadas circunstâncias, os danos provocados por enchentes, tempestades ou terremotos (Brito et al., 2016). Considerando sua relevância e recorrência, torna-se essencial conhecer a distribuição espacial e temporal desses eventos, bem como sua reincidência, para subsidiar ações de gestão de risco.

Nesse contexto, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT) mantém, desde 1988, um levantamento sistemático de desastres com vítimas fatais em âmbito nacional, o que permite subsidiar políticas públicas de prevenção (Macedo & Martins, 2015). Entre 1988 e 2022, registraram-se 4.146 óbitos em 959 ocorrências distribuídas por 269 municípios de 16 estados, com destaque para a região serrana do Rio de Janeiro, especialmente Petrópolis, Teresópolis e Nova Friburgo, que concentra grande parte dos eventos (Macedo & Sandre, 2022).

No município de João Pessoa, observa-se uma tendência de redução dos deslizamentos ao longo dos últimos anos, atribuída à implantação, em 2013, de um programa municipal voltado à mitigação de riscos geotécnicos, incluindo limpeza e manutenção de drenagem, poda de árvores, remoção de edificações em áreas vulneráveis e suporte social às famílias afetadas. Apesar dessa redução, o número de ocorrências ainda é expressivo, reforçando a necessidade de aprofundar estudos sobre causas, mecanismos e soluções aplicáveis ao contexto local.

Entre as alternativas estruturais empregadas na mitigação de riscos de escorregamentos estão tanto métodos tradicionais, como muros de contenção e gabiões, quanto tecnologias mais recentes, a exemplo dos geossintéticos. Esses materiais poliméricos, desenvolvidos industrialmente, passaram a ser aplicados inicialmente na década de 1950 em obras de proteção contra erosão na Holanda e nos Estados Unidos (Vertematti, 2015). A partir da década de 1970, com o avanço das geogrelhas e de novos polímeros, sua função como elementos de reforço tornou-se amplamente difundida.

A expansão do uso de geossintéticos em obras de infraestrutura decorre das vantagens que oferecem em relação aos materiais convencionais, incluindo maior resistência à tração, redução de impactos ambientais, menor tempo de execução e custos mais competitivos (Vertematti, 2015). Assim, estudos que avaliem sua aplicabilidade tornam-se essenciais para ampliar o emprego de soluções sustentáveis e economicamente acessíveis em áreas suscetíveis a movimentos de massa.

Neste contexto, o presente estudo objetiva propor a adoção de uma solução em solo reforçado com geogrelha para estabilizar o talude localizado no Km 19 da BR-230, em João Pessoa, área que apresenta recorrência de escorregamentos durante períodos de elevada pluviosidade. A análise envolve a comparação entre o custo de execução dessa técnica e o de soluções tradicionais, como a cortina atirantada. Dessa forma, busca-se demonstrar o potencial técnico e econômico da solução com geossintéticos frente às abordagens convencionais de contenção.

2. Referencial Teórico

Os taludes correspondem a superfícies inclinadas compostas por maciços de solo ou rocha, podendo ocorrer de forma natural — denominados encostas — ou resultar de intervenções humanas, como nos casos de cortes e aterros (Gerscovich, 2016). O aumento da ocupação dessas áreas, impulsionado pelo crescimento populacional, tem contribuído para a elevação do número de desastres naturais associados à instabilidade de taludes (Torres, 2014). A interação contínua entre atividades humanas e processos naturais tem modificado significativamente o relevo ao longo do tempo. Entre os agentes naturais que podem afetar a estabilidade das encostas, destacam-se os eventos sísmicos e o intemperismo, os quais, combinados ou não com ações antrópicas, podem desencadear movimentos de massa e processos erosivos (Tiga, 2013).

O termo movimento de massa refere-se ao deslocamento de solos ou rochas para baixo em resposta à força gravitacional. De acordo com Gerscovich (2016), esse conceito engloba qualquer movimentação de um volume significativo de materiais presentes em um talude. Os mecanismos responsáveis pelo desencadeamento desses movimentos são variados e podem ser categorizados em agentes predisponentes e agentes efetivos. Os predisponentes dizem respeito às propriedades intrínsecas do solo, enquanto os efetivos se subdividem em fatores preparatórios — que modificam gradualmente as condições do terreno — e fatores imediatos, responsáveis por deflagrar o processo de ruptura (Silva, 2018).

Entre os agentes antrópicos que contribuem para a instabilidade de taludes, destacam-se a remoção inadequada da cobertura vegetal, o despejo de efluentes sobre encostas, a execução deficiente de aterros, o acúmulo de resíduos nas superfícies inclinadas e a ocupação irregular, que gera sobrecargas devido à implantação de edificações e outras intervenções (Silva, 2018).

A literatura reúne diferentes classificações para os movimentos de massa, as quais consideram aspectos como velocidade de deslocamento, mecanismos de ruptura, características do material envolvido e forma de movimentação, refletindo a diversidade de processos que podem ocorrer nessas condições (Guidicini & Nieble, 1983).

2.1 Geossintéticos

Os materiais geossintéticos desempenham “um papel fundamental, substituindo ou aprimorando técnicas existentes, permitindo associações e combinações com solos e agregados, resultando em soluções mais rápidas, mais leves, mais esbeltas, mais confiáveis e mais econômicas.” (Vertematti, 2015).

Conforme definido pela ABNT (2018), geossintético é um produto composto total ou parcialmente por polímeros sintéticos ou naturais, apresentado em forma de manta, tira ou estrutura tridimensional, destinado à interação direta com o solo ou outros materiais em aplicações geotécnicas e civis.

O uso de geossintéticos apresenta inúmeras vantagens em comparação aos materiais tradicionais. Por serem manufaturados industrialmente, possuem elevado controle de qualidade, assegurando desempenho previsível e compatível com as exigências do projeto. Além disso, promovem significativa redução no impacto ambiental, uma vez que diminuem a necessidade de extração de materiais naturais. Sua instalação é relativamente simples, não requer mão de obra altamente especializada nem equipamentos pesados, o que contribui para a redução do tempo de execução e dos custos totais da obra (Vertematti, 2015).

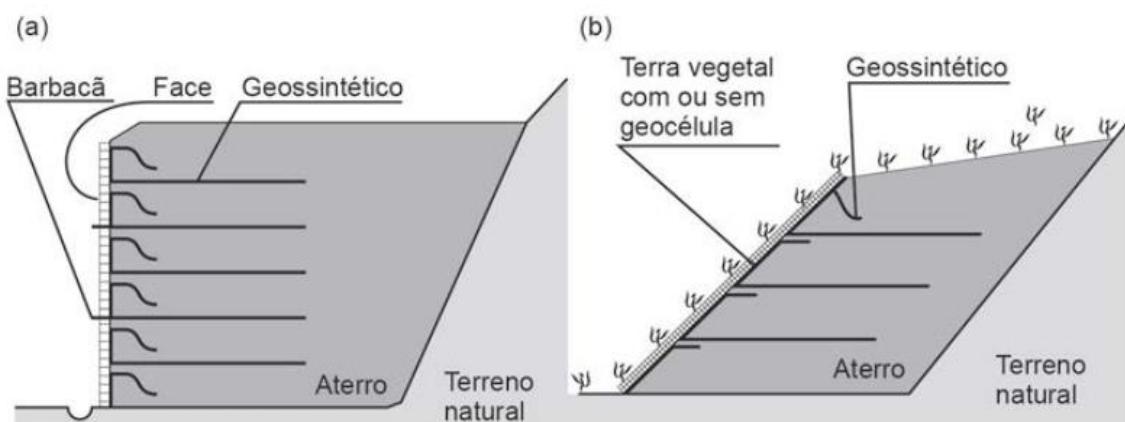
A ampla diversidade de geossintéticos resulta em um espectro igualmente variado de funções possíveis, podendo um mesmo material desempenhar mais de uma função simultaneamente. Entre elas, destacam-se: separação, evitando a mistura entre materiais distintos; reforço, melhorando a capacidade resistente e o comportamento tensão–deformação do solo; proteção, atuando contra abrasão, punção e rasgos; filtração, permitindo o fluxo de fluidos enquanto retém partículas sólidas; drenagem, conduzindo fluidos ao longo de seu plano; e controle de erosão, reduzindo o impacto da chuva e o deslocamento superficial de partículas.

A NBR ISO 10318 classifica os geossintéticos em categorias como geotêxteis, geogrelhas, geocélulas, georredes, geomembranas, geomantas, tubos drenos, barreiras geossintéticas e geocompostos. O geotêxtil destaca-se por sua versatilidade, podendo atender praticamente todas as funções geotécnicas, enquanto geomantas e biomantas são amplamente utilizadas no controle de erosão devido à sua estrutura tridimensional. Já as geogrelhas, com formato em grelha, são especialmente eficazes em aplicações de reforço pela elevada resistência à tração e pela eficiente interação solo–estrutura. Tubos poliméricos, como geotubos, constituem alternativas leves e práticas aos sistemas convencionais de drenagem, podendo ser perfurados, ranhurados ou corrugados, conforme as demandas do projeto (ABNT, 2018).

2.2 Solo reforçado

Atualmente, uma ampla variedade de técnicas de contenção pode ser empregada para garantir a estabilidade de taludes e encostas, abrangendo desde métodos tradicionais, como muros de arrimo em concreto, até soluções mais recentes e eficientes, entre as quais se destacam as estruturas em solo reforçado com geossintéticos. No caso específico da aplicação de geossintéticos em obras de reforço de taludes e muros (Figura 1), esses materiais são incorporados ao maciço com a finalidade de incrementar sua capacidade resistente e, consequentemente, assegurar a estabilidade global da estrutura geotécnica.

Figura 1 – Seção esquemática de (a) muro e (b) talude íngreme em solo reforçado com geossintético.



Fonte: Vertematti (2015).

A introdução de elementos geossintéticos no maciço altera o regime interno de esforços, proporcionando redistribuição das tensões e redução das deformações. Esses materiais atuam sobretudo conferindo ao solo resistência à tração — propriedade que o solo naturalmente não possui — permitindo, assim, a execução de estruturas com faces quase verticais ou taludes mais íngremes (Vertematti, 2015).

Entre os geossintéticos empregados para o reforço de taludes e muros de contenção, destacam-se os geotêxteis e as geogrelhas, devido ao desempenho consolidado nessas aplicações (Peralta, 2007). A técnica construtiva envolve a execução de camadas sucessivas de solo compactado, reforçadas por geossintéticos posicionados em espaçamentos previamente definidos no projeto (Becker, 2006).

Os geotêxteis apresentam vantagens como elevada flexibilidade, facilidade de instalação, custo reduzido e boa resistência a danos mecânicos durante a compactação. Ademais, favorecem a dissipação de pressões neutras durante a execução (Peralta, 2007). Contudo, podem apresentar limitações, incluindo deslocamentos durante a instalação que prejudicam o alinhamento da face e, em alguns casos, resistência à tração inferior à de outros reforços, como as geogrelhas (Peralta, 2007).

As geogrelhas, por sua vez, são amplamente adotadas em aplicações de reforço devido ao seu eficiente intertravamento com o solo, menores deformações e elevada resistência à tração. Entretanto, sua utilização frequentemente exige a complementação com sistemas de proteção superficial, especialmente para controle de erosão na face do talude (Peralta, 2007).

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) recomenda amplamente o uso de solo reforçado como técnica de estabilização em taludes localizados na faixa de domínio rodoviário. Embora ainda pouco difundida em João Pessoa, essa solução já foi aplicada em obras de destaque, como o viaduto da BR-101 que dá acesso ao terminal rodoviário, executado em aterro reforçado com geogrelhas (Figura 2).

Figura 2 - Aterro construído em solo reforçado em João Pessoa.



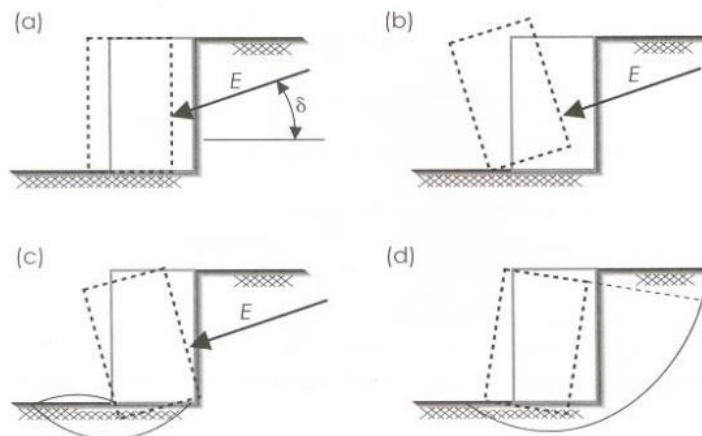
Fonte: Notas de aula Soares (2017).

2.3 Dimensionamento de solo reforçado com geossintético

Conforme apresentado por Vertematti (2015), o dimensionamento de estruturas em solo reforçado envolve duas fases principais: a verificação da estabilidade interna e a análise da estabilidade externa. Nessa abordagem, o maciço reforçado passa a ser tratado de maneira análoga a um muro de gravidade, razão pela qual os critérios de estabilidade externa seguem os mesmos princípios adotados para esse tipo de estrutura.

A verificação da estabilidade externa exige o atendimento a quatro condições fundamentais, ilustradas esquematicamente na Figura 3. São elas: (a) a segurança frente ao deslizamento do conjunto; (b) a prevenção contra o tombamento da estrutura; (c) a verificação da capacidade de carga do solo de fundação; e (d) a avaliação da estabilidade global do maciço. Cada um desses critérios será detalhado a seguir, considerando suas implicações e requisitos de projeto.

Figura 3 - Critérios para análise da estabilidade externa de muro de solo reforçado: (a) deslizamento, (b) tombamento, (c) ruptura de fundação e (d) ruptura global.



Fonte: Vertematti (2015).

2.3.1 Capacidade de carga de fundação direta

A verificação do deslizamento tem como objetivo garantir que o conjunto solo-reforço não sofra deslocamentos horizontais induzidos pelo empuxo ativo (E). Para isso, o projeto deve assegurar que as forças resistentes superem as forças solicitantes, atendendo a um fator de segurança mínimo previamente estabelecido.

O fator de segurança associado à resistência ao deslizamento do maciço reforçado é expresso na Equação 1, conforme apresentado por Vertematti (2015), permitindo quantificar a relação entre as ações estabilizadoras e as que promovem o movimento horizontal.

$$FS_d = \frac{\text{Forças resistentes}}{\text{Forças atuantes}} \geq 1,5 \rightarrow FS_d = \frac{(\gamma H) \cdot L_r \cdot \operatorname{tg}\phi'}{E} \geq 1,5 \quad (1)$$

Em que:

FS_d → fator de segurança contra deslizamento;

γ → peso específico do solo (kN/m^3);

H → altura do maciço reforçado (m);

L_r → comprimento do reforço (m);

ϕ' → ângulo de atrito do solo ($^\circ$);

E → empuxo ativo (kN/m).

A partir das manipulações algébricas pertinentes, é possível determinar o comprimento necessário do reforço em função do fator de segurança mínimo adotado no dimensionamento. Para essa análise, o valor do empuxo ativo é calculado utilizando a

formulação de Rankine, aplicável a situações em que não há sobrecarga atuando sobre o maciço reforçado. Essa estimativa é apresentada na Equação 2 (Vertematti, 2015):

$$E = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot K_a \quad (2)$$

Nessa expressão, o termo K_a representa o coeficiente de empuxo ativo, cuja obtenção também segue a teoria clássica de Rankine. A formulação correspondente para o cálculo de K_a encontra-se indicada na Equação 3 (Vertematti, 2015).

$$K_a = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi'}{2} \right) \quad (3)$$

2.3.2 Tombamento

No que se refere à verificação de tombamento, o dimensionamento deve assegurar que o momento estabilizante — resultante do peso próprio da estrutura em solo reforçado — seja superior ao momento instabilizante gerado pelo empuxo ativo. Essa relação deve satisfazer o fator de segurança mínimo estabelecido e é expressa na Equação 4 (Vertematti, 2015). Assim, o comprimento do reforço deve ser definido de modo a garantir que o conjunto estrutural seja capaz de resistir às solicitações que tendem a provocar o tombamento da estrutura.

$$FS_t = \frac{(\gamma H) \cdot L_r^2}{2E \cdot y_E} \geq 2,0 \quad (4)$$

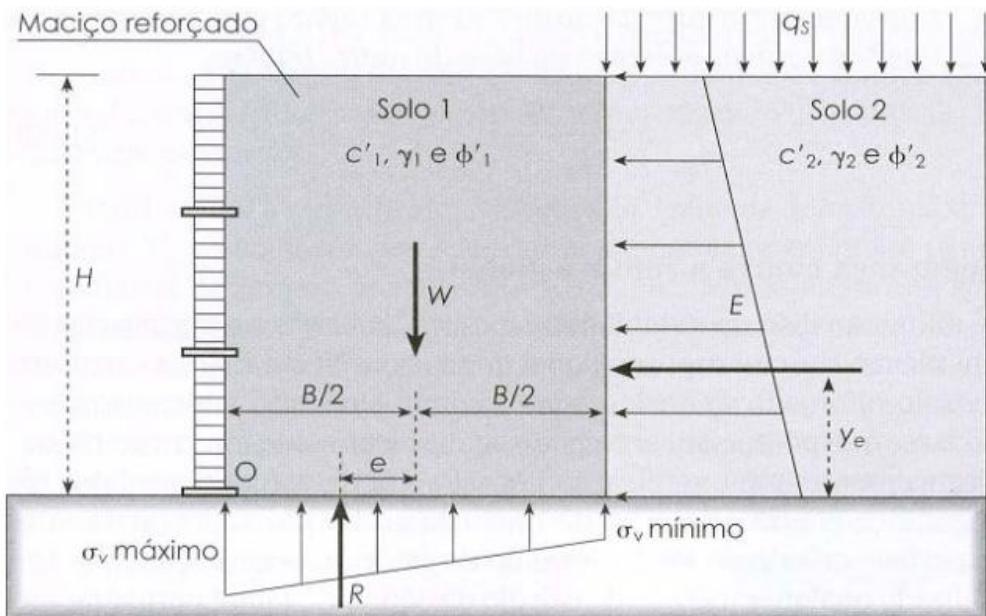
Em que y_E corresponde ao braço de alavanca do empuxo ativo em relação ao pé da estrutura.

2.3.3 Ruptura do solo de fundação

A fim de garantir que toda a base da estrutura permaneça submetida exclusivamente a tensões de compressão, é necessário que a excentricidade — calculada pela Equação 5 (Vertematti, 2015) — permaneça inferior a um sexto do comprimento total do reforço. Ressalta-se que os índices 1 e 2 se referem, respectivamente, às propriedades do solo reforçado e do solo utilizado no reaterro.

$$e = \frac{K_{a2} \left(1 + 3 \frac{q}{\gamma_2 H} \right)}{6 \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2} + \frac{q}{\gamma_2 H} \right)} \leq \frac{L_r}{6} \quad (5)$$

Figura 4 - Distribuição das tensões verticais na base do maciço.



Fonte: Vertematti (2015).

Para que a estabilidade global seja atendida, o comprimento L_r deve satisfazer simultaneamente os três critérios anteriormente discutidos, adotando-se, portanto, o maior valor obtido entre eles.

A capacidade do solo de fundação pode ser estimada pela Equação 6 (Vertematti, 2015):

$$q_{\max} = c'N_c + q_s N_q + 0,5 \gamma_f B' N_y \quad (6)$$

Onde:

q_{\max} → capacidade de carga do solo de fundação (kN/m^2);

c' → coesão do solo de fundação (kPa);

$q_s \rightarrow$ sobrecarga no nível da base da estrutura (kN), caso esta esteja parcialmente enterrada;

$\gamma_f \rightarrow$ peso específico do solo de fundação (kN/m^3):

B' → comprimento do reforço (m);

N_c , N_a e N_v são fatores de capacidade de carga obtidos a partir das expressões da Equação 7 (Vertematti, 2015):

$$\begin{aligned} N_q &= e^{(\pi \cdot \tan \phi)} \cdot \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \\ N_c &= (N_q - 1) \cdot \operatorname{ctg} \phi' \\ N_v &= 1.80 \cdot (N_q - 1) \cdot \tan \phi' \end{aligned} \quad (7)$$

Considerando-se a distribuição de tensões proposta por Meyerhof (1955) para o caso em que as tensões normais (σ) atuam de forma uniforme ao longo da base, aplica-se a Equação 8.

$$\sigma = \frac{3(\gamma_1 H + q)}{3 - K_{a2} \left(\frac{\gamma_2 H + 3q}{\gamma_1 H + q} \right) \cdot \left(\frac{H}{L_m} \right)^2} \quad (8)$$

A partir dessa condição, o fator de segurança contra a ruptura do solo de fundação (FS_f) é determinado por meio da Equação 9 (Vertematti, 2015), garantindo que o sistema apresente desempenho adequado frente às solicitações aplicadas.

$$FS_f = \frac{q_{max}}{\sigma} \geq 3,0 \quad (9)$$

2.3.4 Ruptura global

A avaliação da estabilidade de taludes pode ser realizada por meio de dois grupos principais de métodos para determinação do Fator de Segurança (FS): o método do equilíbrio limite e as análises via elementos finitos. Considerando sua ampla adoção em ferramentas computacionais e a relativa simplicidade de implementação, o presente estudo concentra-se na abordagem por equilíbrio limite. Esse método se fundamenta no exame do equilíbrio estático de um conjunto de fatias que compõem uma massa de solo limitada por uma superfície potencial de ruptura, assumindo-se que todos os elementos atingem simultaneamente a condição de ruptura ($FS = 1$) (Gerscovich, 2016).

Dentro do método do equilíbrio limite, existem formulações com diferentes níveis de complexidade e rigor. O método de Bishop, por exemplo, desconsidera as forças horizontais entre as fatias, caracterizando-se como uma abordagem simplificada, porém com precisão satisfatória na maioria das aplicações. Por outro lado, o método de Morgenstern-Price (1965) é tido como um dos mais completos, pois admite qualquer forma de superfície de ruptura e utiliza integralmente as equações de equilíbrio estático (Gerscovich, 2016). Em razão dessa maior robustez, o método de Morgenstern-Price foi adotado neste trabalho, sendo aplicado por meio do software GeoSlope/W.

Segundo Gerscovich (2016), a análise de estabilidade busca quantificar a possibilidade de falha do talude, expressa pelo FS, que representa a razão entre as tensões cisalhantes mobilizadas e as tensões cisalhantes resistentes ao longo da superfície de ruptura. Valores de FS próximos de 1 indicam condição crítica, com possibilidade iminente de deslizamentos.

A norma brasileira NBR 11682 – Estabilidade de Encostas (ABNT, 2009) estabelece que os taludes devem ser classificados conforme o potencial de perdas humanas, materiais e ambientais, definindo assim os valores mínimos de FS admissíveis para cada categoria. Esses limites normativos são sintetizados na Figura 5, servindo de referência para o enquadramento e avaliação das condições de segurança.

Figura 5 - Fator de segurança mínimo para deslizamento de taludes.

Nível de segurança contra danos a vidas humanas	Alto	Médio	Baixo
Nível de segurança contra danos materiais e ambientais			
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

NOTA 1 No caso de grande variabilidade dos resultados dos ensaios geotécnicos, os fatores de segurança da tabela acima devem ser majorados em 10 %. Alternativamente, pode ser usado o enfoque semiprobabilístico indicado no Anexo D.

NOTA 2 No caso de estabilidade de lascas/blocos rochosos, podem ser utilizados fatores de segurança parciais, incidindo sobre os parâmetros γ , ϕ , c , em função das incertezas sobre estes parâmetros. O método de cálculo deve ainda considerar um fator de segurança mínimo de 1,1. Este caso deve ser justificado pelo engenheiro civil geotécnico.

NOTA 3 Esta tabela não se aplica aos casos de rastejo, voçorocas, ravinas e queda ou rolamento de blocos.

Fonte: ABNT (2009).

2.3.5 Estabilidade interna

A verificação da ruptura interna em estruturas de solo reforçado com geossintéticos é fundamental para assegurar o desempenho adequado do sistema. Esse modo de falha ocorre quando as solicitações atuantes superam a resistência máxima do

material de reforço ou quando o comprimento disponível para ancoragem é insuficiente para garantir a transferência plena de esforços (Vertematti, 2015).

Considerando que este trabalho apresenta o solo reforçado como alternativa de estabilização de taludes em caráter introdutório, optou-se por empregar um procedimento de dimensionamento amplamente utilizado e de aplicação direta: o método proposto por Jewell (1991). Essa metodologia possibilita determinar os comprimentos e espaçamentos dos reforços com base em propriedades geométricas do talude, parâmetros geotécnicos do solo e características mecânicas do geossintético (Vertematti, 2015).

O processo de dimensionamento segundo Jewell (1991) utiliza um conjunto de ábacos que orientam as etapas de cálculo. A primeira etapa consiste na definição do ângulo de atrito de projeto, obtido pela redução do ângulo de atrito de pico do solo, conforme apresentado na Equação 10 (Vertematti, 2015).

$$\phi' = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \phi_p'}{f_p} \right) \quad (10)$$

Tendo que:

ϕ' → ângulo de atrito de projeto (°);

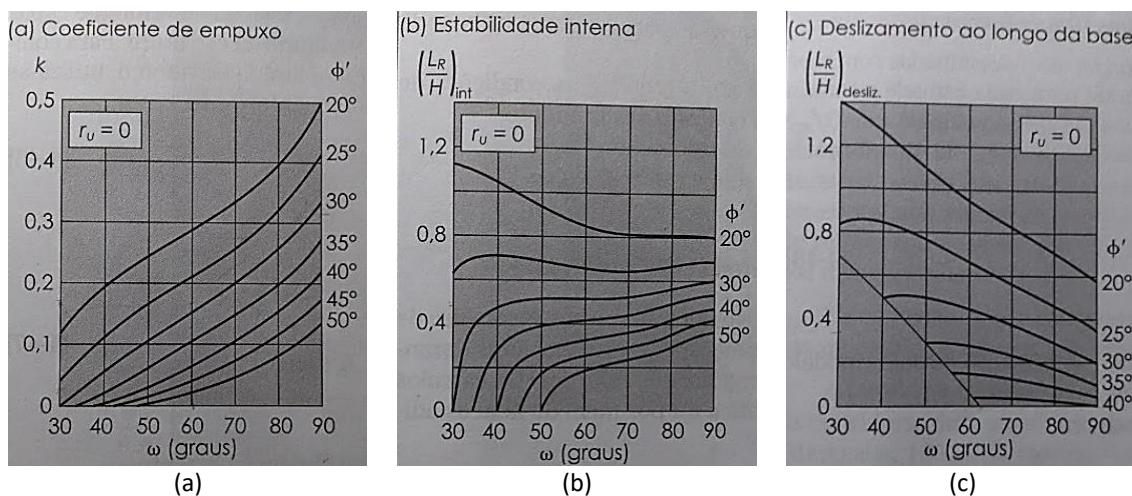
ϕ_p' → ângulo de atrito de pico (°);

f_p → fator de redução no valor do ângulo de atrito do solo, este fator situa-se entre 1,20 e 1,50.

Na sequência do procedimento de dimensionamento, realizam-se as consultas aos ábacos (Figura 6) para obtenção dos parâmetros necessários ao projeto. Inicialmente, determina-se o coeficiente de empuxo requerido (a), seguido da definição dos comprimentos de reforço associados à estabilidade interna (b) e ao deslizamento ao longo da base (c). Entre os valores obtidos, deve-se sempre adotar aquele que apresentar maior exigência, assegurando assim a condição mais crítica para o dimensionamento do solo reforçado.

Os ábacos empregados no método correspondem a condições de poro-pressão nulas, o que é compatível com as particularidades do presente estudo. Essa consideração simplifica as análises, permitindo a aplicação direta dos coeficientes e proporções fornecidos por Jewell (1991) e sistematizados por Vertematti (2015).

Figura 6- Ábacos de dimensionamento pelo método de Jewell (1991): (a) coeficiente de empuxo, (b) estabilidade interna, (c) deslizamento ao longo da base.



Fonte: Vertematti (2015).

Observa-se que os ábacos utilizados no dimensionamento estabelecem a relação entre o ângulo de atrito de projeto e o ângulo da face do talude (ω), permitindo a obtenção dos parâmetros necessários ao cálculo do solo reforçado. Embora o comprimento do reforço seja diretamente indicado nos ábacos, este valor é função da altura total do talude, razão pela qual se faz necessário realizar as operações complementares para determinar a extensão efetiva do reforço em cada camada.

O espaçamento entre as camadas de geossintético é considerado constante e pode ser definido por meio da Equação 11 (Vertematti, 2015).

$$s_V = \frac{T_d}{k_d \cdot \gamma \cdot H} \quad (11)$$

Em que:

T_d → resistência de projeto do geossintético (kN/m);

Para o dimensionamento, utiliza-se o coeficiente de empuxo de cálculo, K_d , uma vez que a ancoragem do reforço pode limitar sua capacidade resistente, influenciando diretamente o equilíbrio da estrutura. Esse coeficiente é obtido pela Equação 12 (Vertematti, 2015).

$$k_d = \frac{k_{req}}{1 - \frac{L_B}{L_r}} \quad (12)$$

Sendo k_{req} e L_r os valores fornecidos pelos ábacos, e L_b o comprimento necessário para ancoragem, determinado pela Equação 13 (Vertematti, 2015), garante-se que a resistência mobilizada pelo reforço seja suficiente para manter a estabilidade interna do sistema.

$$L_B = \left(\frac{T_d}{2\gamma H} \right) \cdot \left(\frac{1}{1 - ru} \right) \cdot \left(\frac{1}{f_b \tan \phi'} \right) \quad (13)$$

Nessa equação, ru representa o parâmetro associado à poro-pressão, enquanto f_b corresponde ao coeficiente de interação solo-reforço, considerado igual a 0,8 no presente estudo, conforme recomendado para condições típicas de geossintéticos em solos granulares.

2.4 Orçamento e correção

É amplamente reconhecido que a etapa de elaboração de orçamentos em obras civis constitui uma das fases mais complexas e relevantes do processo construtivo, uma vez que permite prever, com base em projetos e parâmetros previamente definidos, os custos necessários para a execução do empreendimento (Timm, 2018). Para a estimativa inicial desses custos, torna-se imprescindível determinar os quantitativos de serviços e materiais envolvidos. Os preços unitários dos insumos podem ser obtidos em bases oficiais de referência, como o SINAPI, disponibilizado pela Caixa Econômica Federal, e o SICRO, fornecido pelo DNIT, amplamente utilizados no setor de infraestrutura.

Devido às frequentes variações de mercado que afetam os valores de materiais e serviços, essas instituições realizam atualizações mensais de suas tabelas de preços. Ao longo do tempo, tais valores sofrem a influência da inflação, resultando no aumento contínuo dos custos. Para lidar com essa dinâmica, os órgãos responsáveis desenvolveram índices específicos destinados ao reajuste dos preços, como os índices de atualização para obras rodoviárias, ferroviárias e portuárias divulgados pelo DNIT (Timm, 2018).

Esses índices são calculados com base em uma cesta representativa de insumos, composta por materiais, mão de obra e demais itens de maior participação nos serviços. Conforme descrito por Timm (2018), essa seleção busca refletir fielmente a

estrutura de custos do setor. O DNIT publica mensalmente, com série histórica iniciada em 1944, os índices de reajustamento de custos calculados pelo Instituto Brasileiro de Economia da Fundação Getúlio Vargas. Além disso, a IN nº 1/DNIT-SEDE, de 25 de janeiro de 2023, estabelece que o fator de reajuste dos preços unitários deve ser determinado conforme apresentado na Equação 14 (DNIT, 2023).

$$R = \frac{I_1 - I_0}{I_0} \times V \quad (14)$$

Em que:

R → valor da parcela do reajustamento do preço (R\$);

I₁ → índice do mês de reajustamento;

I₀ → índice de reajustamento no mês-base inicial;

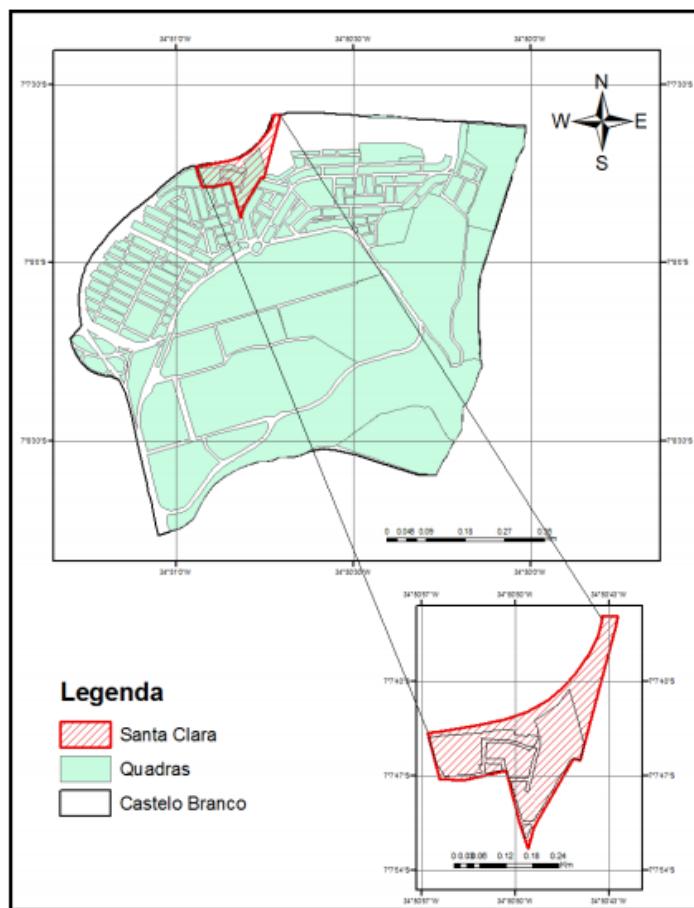
V → valor a ser reajustado (R\$).

Os valores dos serviços sujeitos ao reajustamento são organizados em categorias específicas, de acordo com a natureza das atividades executadas. Entre essas categorias, destacam-se terraplenagem, pavimentação, sinalização, drenagem e obras complementares, entre outras. Essa classificação permite a aplicação de índices de correção mais representativos da composição de custos de cada grupo de serviços, garantindo maior aderência entre a atualização monetária e as variações reais observadas no mercado.

3. Metodologia

Realizou-se uma investigação em campo de natureza quantitativa (Pereira et al., 2018). A Figura 7 apresenta a comunidade Santa Clara, localizada na cidade de João Pessoa, entre os bairros Castelo Branco I e II e o Rio Jaguaribe, sendo também margeada pela BR-230, na altura do Km 19. O processo de ocupação dessa comunidade teve início na década de 1970, quando parcelas da população de baixo poder aquisitivo passaram a instalar-se na área do talude, motivadas, sobretudo, por migrações internas provenientes de outros bairros ou municípios (Silva, 2016).

Figura 7- Localização da comunidade Santa Clara (área de estudo).



Fonte: Silva (2016).

Além das condições construtivas precárias, a comunidade carece de infraestrutura mínima para assegurar a habitabilidade do local. Observa-se a inexistência de sistema de esgotamento sanitário, a insuficiência da rede de drenagem e o desordenamento dos arruamentos, entre outros aspectos que contribuem significativamente para aumentar o risco de instabilidade e a probabilidade de ocorrência de deslizamentos (Silva, 2016).

3.1 Histórico de deslizamentos na comunidade

Desde 2005, o talude localizado às margens da BR-230, na área correspondente à comunidade Santa Clara, tem registrado episódios recorrentes de instabilidade. A encosta sofreu modificações significativas decorrentes de intervenções antrópicas, como a remoção da vegetação nativa, o lançamento inadequado de resíduos e a execução de cortes irregulares, fatores que favoreceram a ocorrência de movimentos de massa de pequena escala.

Somam-se a esses aspectos os elevados índices pluviométricos característicos do período chuvoso, que intensificam a infiltração e conduzem à saturação do solo. Esse processo reduz a resistência ao cisalhamento dos materiais e, consequentemente, aumenta a probabilidade de deslizamentos. Um evento de maior destaque ocorreu em 2012, quando um escorregamento atingiu dois motociclistas e um veículo (Figura 8). Embora os ocupantes tenham sofrido ferimentos, não foram registradas fatalidades.

Figura 8 - Deslizamento no talude da BR 230 na comunidade Santa Clara em 2012.



Fonte: Soares, Morais e Dias, (2017).

Em 2019, novos deslizamentos voltaram a ocorrer no mesmo talude (Figura 9), desencadeados por um episódio de chuvas intensas que atingiu a região. Segundo a Defesa Civil, o acumulado pluviométrico registrado em um período de apenas 30 horas correspondeu a aproximadamente 116% da média prevista para todo o mês de junho. Como consequência, diversas áreas da cidade foram impactadas, incluindo a comunidade Santa Clara, onde algumas residências precisaram ser desocupadas e, posteriormente, demolidas (Figura Figura 10), devido ao elevado risco de novos escorregamentos e à instabilidade do terreno.

Figura 9 - Deslizamento no talude da BR 230 na comunidade Santa Clara em 2019.



Fonte: Arquivo dos Autores.

Figura 10 – Talude após demolição de residências em 2019.



Fonte: Arquivo dos Autores.

Não apenas eventos de elevada intensidade pluviométrica em curtos intervalos são capazes de desencadear deslizamentos. Volumes relativamente modestos de precipitação também podem provocar instabilidades quando ocorrem após períodos prolongados de chuva acumulada sobre uma mesma área (Silva, 2018).

Considerando a repetição de escorregamentos ao longo dos anos e a condição de alta vulnerabilidade socioambiental da população residente na comunidade Santa Clara e em seu entorno, torna-se evidente a necessidade de elaboração de um Mapa de Risco específico para a área. Esse instrumento desempenha papel estratégico na gestão de risco, uma vez que permite identificar e delimitar setores com maior propensão à ocorrência de movimentos de massa. Além disso, fornece subsídios técnicos ao poder público para a definição de intervenções preventivas ou corretivas que reduzam, ou mesmo eliminem, a exposição da população a situações de perigo (Pereira, 2017).

O Mapa de Risco da comunidade Santa Clara (Figura 11), desenvolvido por Soares, Morais e Dias (2017), segue a metodologia proposta pelo Ministério das Cidades. Essa abordagem recomenda a utilização de uma escala cromática padronizada, baseada no sistema semafórico, para representar os diferentes níveis de risco: baixo, médio e alto. A cor roxa, adicionalmente, é empregada para sinalizar áreas classificadas como de risco muito alto, onde a probabilidade de deslizamentos e a severidade de seus possíveis impactos são significativamente elevadas.

Figura 11 - Mapa de risco da comunidade Santa Clara.



Fonte: Soares, Moraes e Dias (2017).

3.2 Parâmetros do talude

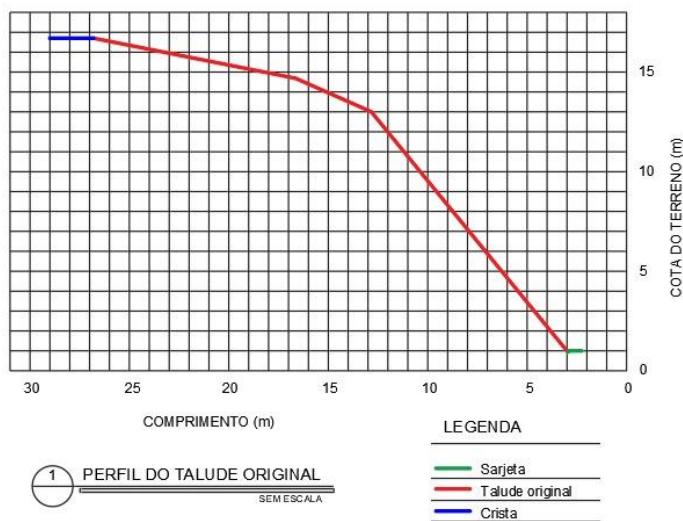
Considerando que diferentes setores da comunidade apresentam distintos níveis de suscetibilidade a movimentos de massa, a área selecionada para este estudo corresponde ao trecho do talude localizado às margens da BR-230, no Km 19, identificado como zona de risco muito alto (cor roxa) no mapa ilustrado na Figura 11.

Para representar adequadamente a geometria da encosta, Almeida (2016) executou um levantamento topográfico ao longo de todo o talude, em intervalos regulares de 5 m, cobrindo uma extensão total de aproximadamente 170 m. A partir desses dados, foi escolhida a seção transversal que melhor sintetiza as características geométricas da encosta, apresentada na Figura 12.

No que se refere à caracterização geotécnica, foram executados os ensaios de laboratório necessários à avaliação das propriedades do solo, possibilitando uma compreensão mais precisa de seu comportamento. Soares, Morais e Dias (2017) coletaram cinco amostras ao longo do talude, sendo três indeformadas e duas deformadas. As amostras indeformadas foram destinadas ao ensaio de cisalhamento direto, conduzido na umidade natural, resultando nos parâmetros de resistência: coesão $c = 9,02$ kPa e ângulo de atrito interno $\phi = 39^\circ$.

As amostras deformadas, por sua vez, foram utilizadas na análise granulométrica, que indicou tratar-se de um solo de graduação uniforme. Complementarmente, determinou-se o peso específico natural, obtido em aproximadamente 16 kN/m³.

Figura 12 - Perfil do talude original.



Fonte: Adaptado de Almeida (2016).

3.3 Orçamentos

Com o objetivo de apresentar de forma clara os custos associados às duas alternativas de estabilização — solo reforçado com geossintéticos e cortina atirantada — foram elaborados orçamentos comparativos capazes de fornecer uma estimativa preliminar dos investimentos necessários para cada solução.

Na composição orçamentária, consideraram-se apenas os serviços essenciais à execução das obras, tais como escavação, regularização do talude, implantação de sistemas de drenagem e construção dos elementos de contenção. Optou-se por não incluir despesas relativas à instalação e administração da obra, uma vez que esses valores seriam idênticos para ambas as alternativas e, portanto, não influenciariam a comparação entre os métodos.

Do mesmo modo, o Benefício e Despesas Indiretas (BDI) não foi aplicado, pois sua inclusão uniforme sobre todos os itens não alteraria o resultado relativo entre as soluções avaliadas. Dessa forma, os custos apresentados refletem unicamente as diferenças técnicas e construtivas de cada proposta.

Para a definição dos preços unitários foram utilizadas referências atualizadas, incluindo o SINAPI (base setembro/2025), o Sicre (base julho/2025) e a plataforma ORSE (base setembro/2025), complementadas por consultas a fornecedores para itens não contemplados por essas bases de dados.

Como a proposta de cortina atirantada havia sido orçada anteriormente, ainda em 2016, foi necessária a atualização de seus valores para condições econômicas atuais. Essa correção foi realizada por meio dos índices de reajusteamento de obras rodoviárias disponibilizados pelo DNIT, considerados os mais adequados em razão da similaridade com o tipo de intervenção analisada.

4. Resultados e discussões

4.1 Solução A: solo reforçado com geossintético

O pré-dimensionamento da solução em solo reforçado com geossintéticos foi conduzido com base no procedimento de cálculo descrito no referencial teórico, utilizando-se os parâmetros geotécnicos e geométricos do talude sintetizados na Tabela 1. Por se tratar de uma etapa preliminar de dimensionamento, adotou-se a hipótese de que o solo empregado no núcleo reforçado possui as mesmas propriedades do maciço natural. Essa premissa resulta em uma abordagem conservadora, uma vez que, na

prática, o solo compactado durante a execução tende a apresentar melhoria em seu comportamento mecânico. Além disso, a inclusão do geossintético contribui para o aumento da resistência global do conjunto, reforçando a segurança do pré-dimensionamento.

Tabela 1 - Resumo de parâmetros do talude.

Parâmetros do talude	
ϕ	39°
C	9,02 kPa
H	10m
γ	16 kN/m³
β (ângulo da face)	60°
Poro pressão	0

Fonte: Autoria própria.

A definição da altura da estrutura em solo reforçado considerou a geometria natural do talude. Optou-se por adotar uma altura de 10 m, de forma a garantir que a porção de maior inclinação fosse integralmente contemplada pelo reforço. A região reforçada foi projetada com um ângulo de 60° em relação à horizontal, aproveitando a possibilidade de execução de faces quase verticais proporcionada pela utilização de geossintéticos.

Os comprimentos de reforço obtidos para essa configuração são apresentados na Tabela 2, sendo calculados a partir da verificação da estabilidade externa. Nessa análise, o conjunto solo–geossintético é tratado de maneira análoga a um muro de gravidade, conforme discutido anteriormente.

Tabela 1 - Resumo dos resultados da estabilidade externa.

Parâmetros	Resultados
K_a	0,23
Ea	182,00 kN/m
L_r - deslizamento	2,63m
L_r - tombamento	3,89m
L_r – com a base comprimida sem sobrecarga	4,80m
σ	229,67 kN/m²
q_{max}	689,00 kN/m²
N_q	56
N_y	81,6
B'	5m
D	-2,87m

Fonte: Autoria própria.

O valor de q_{max} foi inicialmente determinado a partir do produto entre a tensão normal atuante (σ) e o fator de segurança adotado (3,0). Esse procedimento permite, na etapa seguinte, avaliar a necessidade de embutimento do reforço no solo de fundação (D). O resultado obtido para D foi negativo, o que indica, conforme o método apresentado por Vertematti (2015), que não há exigência de embutimento da base do solo reforçado. Ainda assim, considera-se prática usual a execução de uma camada mínima de fundação com aproximadamente 50 cm abaixo do terreno natural, a qual foi incorporada à solução proposta.

O valor de B' , correspondente ao comprimento do reforço, foi previamente definido com base nos resultados das análises de estabilidade interna, apresentadas posteriormente. A partir das verificações simultâneas de deslizamento, tombamento e ruptura de fundação, o comprimento mínimo que satisfaz todos os critérios de segurança é de 5 m.

Para proceder à avaliação da estabilidade interna, foi necessário especificar as propriedades do geossintético a ser empregado. Considerando que a estrutura projetada possui 10 m de altura, optou-se pelo uso de geogrelhas, que apresentam melhor desempenho em obras com alturas superiores a 4 m, quando comparadas aos geotêxteis. A geogrelha selecionada possui resistência nominal de 60 kN/m. Sobre esse valor, foram aplicados os fatores de redução associados à fluência, aos danos decorrentes da instalação e aos efeitos químicos e ambientais, resultando em uma resistência de projeto igual a 35,6 kN/m. As características detalhadas encontram-se apresentadas na Tabela 3.

Tabela 2 - Especificação da geogrelha.

Parâmetro	Especificação
Resistência longitudinal última	60 kN/m
Fator de redução devido ao fenômeno da fluência para 75 anos	1,50
Fator de redução devido a danos químicos e ambientais	1,05
Fator de redução devido a danos de instalação para solo tipo 3: areia siltosa	1,07
Fator de redução global	1,69
Resistência de projeto	35,6

Fonte: Pesquisa de mercado, (2019).

A avaliação da estabilidade interna foi conduzida a partir da determinação dos comprimentos de reforço necessários, utilizando-se os ábacos apresentados da Figura 6 como referência. Além disso, foram definidos tanto o comprimento mínimo de ancoragem quanto o espaçamento máximo entre as camadas de reforço, cujos valores estão indicados na Tabela 4.

Tabela 4 - Resumo dos resultados da estabilidade interna.

Parâmetros	Resultados
K_{req}	0,15
(L/H) Estabilidade Interna $\rightarrow L_r$	0,5 → 5m
(L/H) Deslizamento $\rightarrow L_r$	0,4 → 4m
L_b (Ancoragem)	0,21m
K_d	0,16
S_v	1,42m

Fonte: Autoria própria.

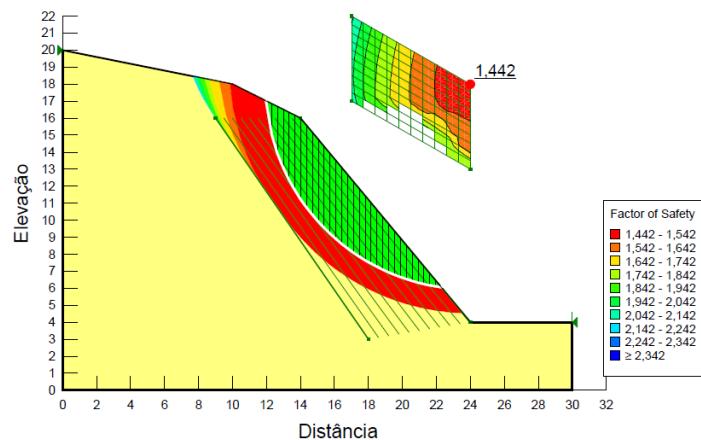
Para que a solução em solo reforçado apresente desempenho satisfatório, é necessário que os critérios de estabilidade interna e externa sejam atendidos simultaneamente. A partir das análises realizadas, verificou-se que o comprimento de reforço capaz de atender a ambas as condições foi de 5 m. No que se refere ao espaçamento entre as camadas de geossintético, a Tabela 4 indica um limite máximo de 1,42 m; assim, adotou-se o espaçamento de 1 m, favorecendo a execução da obra.

Com a geometria definida e os parâmetros do solo e do reforço estabelecidos, procedeu-se à análise da estabilidade global utilizando o software GeoSlope/W. Empregou-se o método do equilíbrio limite conforme a formulação de Morgenstern & Price, por ser considerado o procedimento mais rigoroso entre os métodos clássicos. Foram simulados dois cenários: o talude em sua condição natural e o talude com a inclusão dos reforços, permitindo avaliar o ganho de segurança proporcionado pelo uso do geossintético.

A Figura 13 apresenta o fator de segurança obtido para o talude sem reforço, o qual se mostrou inferior ao valor mínimo recomendado para áreas de risco elevado — igual a 1,5 — especialmente devido ao intenso fluxo de veículos na região. Com a

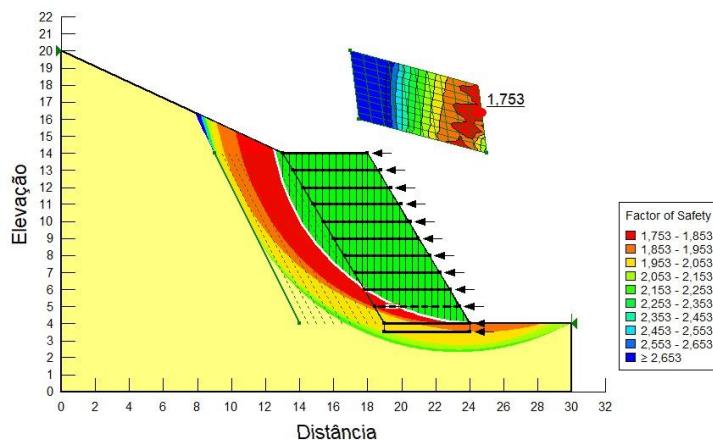
inserção das camadas de geossintético (Figura Figura 14), observou-se um acréscimo significativo no fator de segurança, que ultrapassou 1,7. Esse resultado evidencia a eficácia do reforço na melhoria da estabilidade geral do talude, mesmo considerando que alguns parâmetros adotados no pré-dimensionamento foram conservadores.

Figura 13 - Fator de segurança para o talude natural.



Fonte: Autoria própria.

Figura 14 - Fator de segurança para o solo reforçado com geossintético.



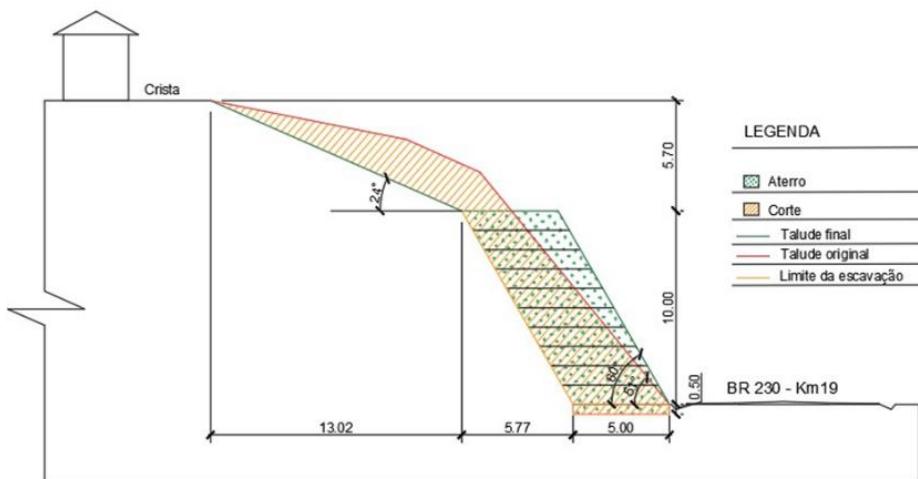
Fonte: Autoria própria.

Resultados semelhantes foram observados no estudo de Vysyaraju et al. (2025), no qual a inserção de geogrelhas promoveu um aumento significativo no fator de segurança do talude. Para uma inclinação de 60° , o FS inicial, sem qualquer forma de estabilização, era de apenas 0,38. Com a aplicação do reforço, esse valor foi elevado para 1,52, evidenciando a eficácia da solução reforçada. Os autores destacam que a escolha adequada da geogrelha, especialmente no que se refere à sua resistência à tração, é determinante para o desempenho global da estrutura. O estudo também aponta que uma combinação de reforços com diferentes valores de resistências e de comprimento de ancoragem pode atender ao fator de segurança, além de possibilitar otimização de custos no processo de estabilização.

A Figura 15 apresenta a seção referente à movimentação de terras, onde são identificadas as regiões de corte e aterro. Observa-se que houve a preocupação em equilibrar os volumes movimentados, de forma que o solo proveniente das escavações e da regularização do talude pudesse ser reaproveitado como material de preenchimento na estrutura de solo reforçado.

O perfil contendo os materiais especificados e sua forma de disposição ao longo do talude é apresentado na Figura 16. Observa-se, também, que a inclinação da área localizada acima da região reforçada foi suavizada, medida adotada para aumentar a estabilidade global do conjunto.

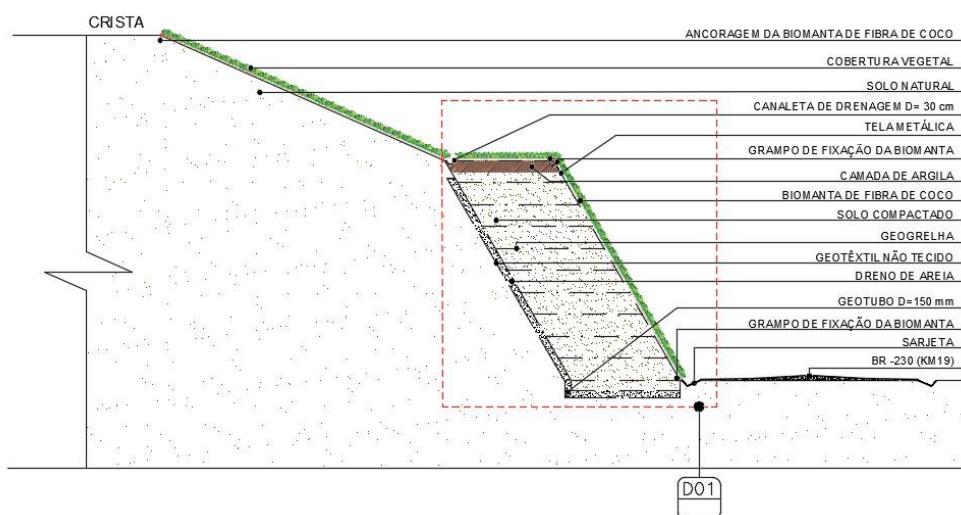
Figura 15 - Seção de movimentação de terra para proposta em solo reforçado.



Fonte: Autoria própria.

Em toda a extensão da face do talude foi prevista a aplicação de biomantas associadas à cobertura vegetal, como estratégia para mitigar processos erosivos. Esse sistema reduz a energia de impacto das gotas de chuva e contribui para diminuir a infiltração de água no terreno. Ademais, incorporou-se uma camada de argila, conforme recomendado na literatura, com a finalidade de restringir a passagem de água para o interior do maciço reforçado, assegurando a condição de poropressão nula considerada no dimensionamento da contenção.

Figura 16 - Solução em solo reforçado.



Fonte: Autoria própria.

Numerosos casos de falhas em estruturas de solo reforçado com geossintéticos estão associados à precipitação, portanto, um sistema de drenagem eficaz é crucial para evitar o acúmulo de pressão intersticial em solos de baixa permeabilidade, visto que chuvas prolongadas podem reduzir a resistência ao cisalhamento do solo (Divya, 2025). Sendo assim, prevê-se a instalação de uma canaleta de drenagem posicionada entre a superfície inclinada superior e o topo do maciço de solo reforçado. Essa canaleta tem a função de coletar e conduzir adequadamente a água pluvial que escoa pela porção superior do talude, garantindo sua destinação correta. Considerando que já existe uma canaleta de drenagem pertencente à rodovia, não se faz necessária a execução de uma estrutura de drenagem inferior adicional.

O sistema de drenagem inclui ainda a implantação de um dreno de areia, destinado a capturar a água infiltrada no maciço e evitar a elevação das pressões neutras no solo reforçado, condição que poderia comprometer a estabilidade da contenção. O dreno foi projetado com 30 cm de largura e envolto por geotêxtil, a fim de impedir a migração de partículas finas para seu interior, preservando sua eficiência hidráulica. Complementarmente, prevê-se a utilização de um geotubo para o encaminhamento da água drenada até o ponto de descarga adequado.

4.1.1 Orçamento

O orçamento elaborado para a solução em solo reforçado representa uma estimativa preliminar dos custos associados à execução da contenção, uma vez que se baseia no pré-dimensionamento e não contempla estudos detalhados sobre drenagem ou outros sistemas complementares que possam ser necessários. Foram considerados os serviços preliminares, as intervenções de drenagem, a estrutura de contenção e as medidas de controle de erosão. Para permitir a comparação direta com as demais alternativas orçamentárias apresentadas, adotaram-se os quantitativos previamente calculados para os itens comuns entre as soluções e selecionaram-se serviços equivalentes sempre que possível.

Destaca-se que não foram incluídos custos relativos à administração de obras nem BDI, uma vez que tais parcelas seriam aplicadas de forma uniforme a todas as opções analisadas e, portanto, não influenciariam a comparação dos valores.

Os preços unitários da geogrelha e da biomanta foram obtidos por meio de consulta direta ao mercado. Os demais insumos e serviços foram cotados com base nas tabelas SINAPI e ORSE, ambas com mês de referência em setembro de 2025, e tabela Sicro com mês de referência em julho/2025. O custo total estimado para a solução em solo reforçado foi de

R\$ 2.118.544,02 (dois milhões, cento e dezoito mil, quinhentos e quarenta e quatro reais e dois centavos), conforme detalhado na Tabela 5.

Tabela 5 - Orçamento básico da solução em solo reforçado com geossintético.

SOLUÇÃO A - EXECUÇÃO DE SOLO REFORÇADO COM GEOSINTÉTICO						
ITEM	CÓDIGO	Descrição	UND.	QUANT.	PREÇO UNITÁRIO	PREÇO TOTAL
1.0 - SERVIÇOS PRELIMINARES						
1.1	98524	LIMPEZA MANUAL DE VEGETAÇÃO EM TERRENO COM ENXADA. AF_03/2024	m ²	5.049,00	R\$ 2,72	R\$ 13.733,28
1.2	101207	ESCAVAÇÃO VERTICAL PARA EDIFICAÇÃO, COM CARGA, DESCARGA E TRANSPORTE DE SOLO DE 1 ^a CATEGORIA, COM ESCAVADEIRA HIDRÁULICA (CAÇAMBA: 0,8 M ³ / 111 HP), FROTA DE 2 CAMINHÕES BASCULANTES DE 18 M ³ , DMT ATÉ 1 KM E VELOCIDADE MÉDIA 14 KM/H. AF 05/2020	m ²	5.049,00	R\$ 9,99	R\$ 50.439,51
2.0 - DRENAGEM						
2.1	93358	ESCAVAÇÃO MANUAL DE VALA. AF_09/2024	m ³	140,25	R\$ 50,47	R\$ 7.078,42
2.2	101616	PREPARO DE FUNDO DE VALA COM LARGURA MENOR QUE 1,5 M (ACERTO DO SOLO NATURAL). AF_08/2020	m ²	255,00	R\$ 3,65	R\$ 930,75
2.3	COMPOSIÇÃO	CALHA EM CONCRETO SIMPLES, EM MEIA CANA, DIÂMETRO 300 MM	m	255,00	R\$ 27,95	R\$ 7.127,25
2.4	93382	REATERRAMENTO MANUAL DE VALAS, COM COMPACTADOR DE SOLOS DE PERCUSSÃO. AF_08/2023	m ³	80,33	R\$ 16,14	R\$ 1.296,53
2.5	102723	DRENO EM MURO DE CONTENÇÃO, EXECUTADO NO PÉ DO MURO, COM TUBO DE PVC CORRUGADO RÍGIDO PERFORADO, ENCHIMENTO COM BRITA, ENVOLVIDO COM MANTA GEOTÉXTIL. AF_07/2021	m	6.891,12	R\$ 98,62	R\$ 679.602,25
2.6	94319	ATERRO MANUAL COM SOLO ARGIL-ARENOSO E COMPACTAÇÃO MECANIZADA. AF_05/2016	m ³	467,50	R\$ 69,97	R\$ 32.710,98
3.0 - CONTENÇÃO						
3.1	101114	ESCAVAÇÃO HORIZONTAL EM SOLO DE 1A CATEGORIA COM TRATOR DE ESTEIRAS (100HP/LÂMINA: 2,19M ³). AF_07/2020	m ³	11.406,07	R\$ 3,69	R\$ 42.088,38
3.2	104737	REATERRAMENTO MANUAL DE VALAS, COM PLACA VIBRATÓRIA. AF_08/2023	m ³	12.750,00	R\$ 13,78	R\$ 175.695,00
3.3	1516299/SICRO	INSTALAÇÃO DE GEOGRELHA	m ²	13.090,00	R\$ 65,53	R\$ 857.800,79
3.4	10011/ORSE	FORNECIMENTO E INSTALAÇÃO DE TELA AÇO SOLDADA NERVURADA CA-60, MALHA 15X15CM, FERRO 3,4MM, PAINEL 2X3M, (1,00KG/M ²)	m ²	3.740,00	R\$ 18,79	R\$ 70.274,60
4.0 - CONTROLE DE EROSÃO						
4.1	4413905/SICRO	HIDROSSEMEADURA	m ²	5.753,06	R\$ 6,77	R\$ 38.948,18
4.2	COMPOSIÇÃO	BIOMANTA	m ²	5.753,06	R\$ 24,48	R\$ 140.818,10
CUSTO TOTAL DA OBRA						R\$ 2.118.544,02

Fonte: Autoria própria.

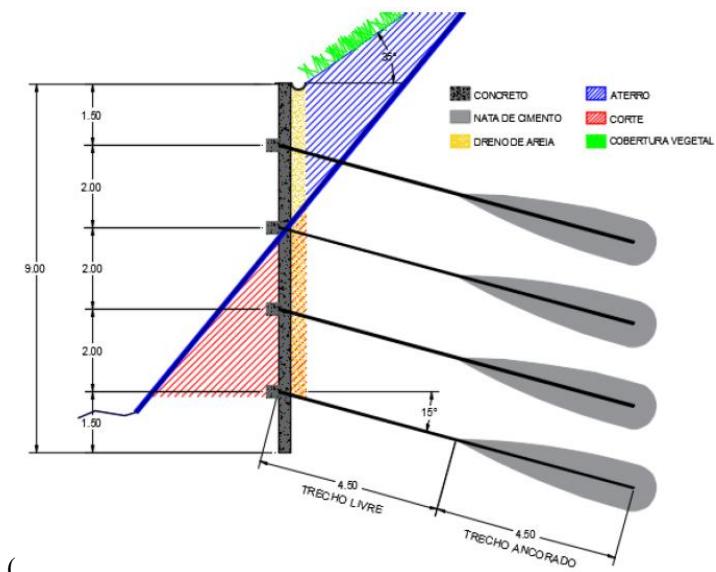
4.2 Solução B: cortina atirantada

Almeida (2016) indicou a cortina atirantada como alternativa de estabilização do talude, destacando sua elevada durabilidade, capacidade de suportar grandes esforços e versatilidade de aplicação em diferentes condições geotécnicas. Para exemplificar a solução, o autor realizou o pré-dimensionamento do sistema, definindo uma cortina com 9 m de altura, 0,30 m de espessura e face vertical.

Os tirantes foram projetados em monobarra, com comprimento médio de 9 m, de forma a garantir a ancoragem na região resistente do maciço. Foram adotados inclinação de 15° em relação à horizontal e espaçamentos de 2,5 m na direção horizontal e 2,0 m na vertical (Almeida, 2016).

Quanto ao tratamento superficial do talude, o autor recomendou a instalação de biomantas associadas à cobertura vegetal para controle de processos erosivos. A área vegetada foi projetada com inclinação aproximada de 35°, a fim de aumentar a estabilidade dessa porção da encosta. A configuração geral da solução encontra-se ilustrada na Figura 17.

Figura 17 - Solução em cortina atirantada.



Fonte: Almeida (2016).

O projeto também contemplou uma solução específica para o manejo das águas pluviais. Almeida (2016) propôs a execução de uma canaleta de drenagem utilizando meio-tubo de concreto com diâmetro de 300 mm, assentado sobre um filtro de areia com espessura compatível, garantindo a adequada condução do escoamento superficial.

Para o controle da água acumulada na porção interna do talude, imediatamente atrás da cortina atirantada, foram previstos barbacãs distribuídos com o mesmo espaçamento adotado para os tirantes. Essa configuração permite o alívio das pressões neutras por meio da drenagem da água percolada, contribuindo para a estabilidade global do maciço (Almeida, 2016).

4.2.1 Orçamento

Com o objetivo de evidenciar os custos associados a essa tipologia de contenção, Almeida (2016) desenvolveu um orçamento com base no pré-dimensionamento proposto, adotando como data-base janeiro de 2016. Considerando a defasagem temporal e a indisponibilidade de alguns itens nas tabelas atuais de referência, procedeu-se à atualização dos valores por meio dos índices de reajuste do DNIT, conforme descrito no Item 2.4 do referencial teórico.

Conforme apresentado na Tabela 6, o orçamento original totalizava R\$ 2.862.636,57 (dois milhões, oitocentos e sessenta e dois mil, seiscentos e trinta e seis reais e cinquenta e sete centavos). Após a aplicação dos reajustes, o valor estimado para a execução da solução alcançou R\$ 6.012.555,77 (seis milhões, doze mil, quinhentos e cinquenta e cinco reais e setenta e sete centavos), refletindo o aumento acumulado dos custos no período.

Observa-se, entretanto, que alguns itens apresentaram redução no índice de correção, especialmente os serviços de hidrossemeadura e instalação de biomanta. Essa redução decorre da mudança de categoria ocorrida a partir de 2017, quando tais serviços passaram de “conservação rodoviária” para “meio ambiente”. Como as categorias possuem composições e dinâmicas de custos distintas, os índices aplicados tornaram-se inferiores à referência originalmente adotada, resultando em reajustes negativos nesses itens.

Tabela 6 – Custa da solução em cortina atirantada.

Valor total inicial (2016)	Valor ajustado (set/2025)
R\$ 2.862.636,57	R\$ 6.012.555,77

Fonte: Autoria própria.

4.3 Análise comparativa

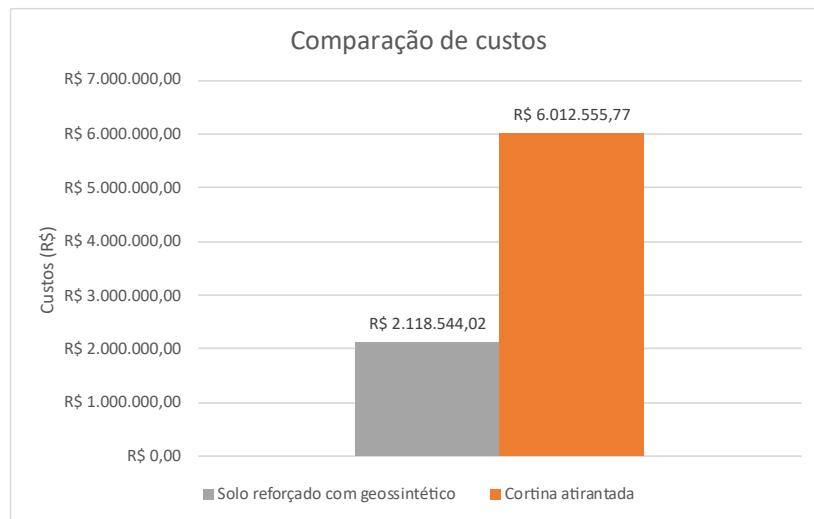
Com o propósito de verificar a hipótese de que a solução em solo reforçado com geossintéticos apresenta melhor desempenho econômico, realizou-se uma comparação direta entre os orçamentos das alternativas discutidas anteriormente.

A análise apresentada na Figura 18 evidencia que o custo estimado para a execução do solo reforçado é significativamente inferior ao da cortina atirantada, correspondendo a aproximadamente 35% do valor desta última. Tal diferença confirma a viabilidade econômica da solução com geossintéticos, que se mostra mais acessível financeiramente e potencialmente mais atrativa para implantação em cenários semelhantes.

Diante do exposto, conclui-se que a utilização do solo reforçado com geossintéticos apresenta vantagens econômicas significativas em relação à solução convencional analisada. Resultados semelhantes foram relatados por Tudorica e Bob (2024), que verificaram que soluções em solo reforçado apresentaram desempenho superior aos muros de concreto armado quando avaliadas sob a ótica da sustentabilidade. Os autores apontam que o uso de geogrelhas reduz significativamente o consumo energético, as emissões associadas ao processo construtivo e os custos globais de execução, tornando essa alternativa mais vantajosa tanto ambiental quanto economicamente.

Da mesma forma, o estudo de Vieira e Tonus (2022) reforça essa tendência. Ao comparar uma solução em solo reforçado com um muro de gravidade em concreto ciclópico para estabilização de um talude rodoviário no Paraná, os pesquisadores observaram que a alternativa com geogrelha apresentou redução de aproximadamente 12% no custo total, evidenciando seu potencial como opção economicamente competitiva.

Figura 18 - Comparação de custo das soluções de contenção.



Fonte: Autoria própria.

Contudo, destaca-se que a escolha do sistema de contenção mais adequado deve considerar, além dos custos envolvidos, outros critérios técnicos e construtivos, como condições geotécnicas locais, desempenho esperado, durabilidade, facilidade de execução e manutenção ao longo do tempo.

5. Conclusão

A engenharia geotécnica dispõe de uma ampla variedade de técnicas para contenção e estabilização de encostas, cabendo ao profissional responsável analisar as condicionantes locais, as prioridades do projeto e as limitações de recursos para selecionar a solução mais adequada. Nesse contexto, este trabalho buscou evidenciar o potencial do solo reforçado com geossintéticos como alternativa de estabilização de taludes, apresentando seu processo de dimensionamento e o orçamento preliminar necessário para avaliar sua competitividade frente a métodos convencionais.

Os geossintéticos, materiais poliméricos produzidos industrialmente e disponíveis em diferentes configurações e funções, vêm ampliando seu uso em obras de infraestrutura no Brasil. Seu emprego abrange sistemas de drenagem, controle de erosão, barreiras impermeabilizantes e, especialmente, reforço de solos. Como solução moderna de contenção, o reforço com geossintéticos permite elevar a estabilidade dos taludes e otimizar o desempenho global das estruturas.

A aplicação da técnica ao talude localizado no Km 19 da BR-230, em João Pessoa, onde há histórico de recorrentes escorregamentos, demonstrou sua eficiência. A inclusão do reforço resultou em fatores de segurança compatíveis com as recomendações normativas, evidenciando a capacidade do sistema em mitigar riscos geotécnicos em áreas críticas.

A análise preliminar dos custos das alternativas estudadas mostrou que o solo reforçado apresenta investimento significativamente inferior às soluções tradicionais, reforçando sua atratividade em intervenções que demandam execução rápida e orçamento limitado. Assim, o estudo confirma que o solo reforçado com geossintéticos constitui uma alternativa tecnicamente viável e economicamente vantajosa para obras de contenção em áreas de risco.

Referências

- ABNT. (2009). *NBR 11682: Estabilidade de encostas*. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).
- ABNT. (2018). *NBR ISO 10318-1: Geossintéticos – Parte 1: Termos e definições*. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).
- Almeida, A. D. C. (2016). *Propostas para estabilização de talude na Rodovia BR-230, km 19* [Trabalho de Conclusão de Curso ou Monografia de Graduação, a ser especificado, ou apenas Trabalho acadêmico]. Universidade Federal da Paraíba.
- Becker, L. B. (2006). *Comportamento de geogrelhas em muro de solo reforçado e em ensaios de arrancamento* [Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro]. MAXWELL.
- Brito, M. M., Moura, R. F. D., Miranda, V. D. D. S., & Mota, G. R. (2016). Análise dos fatores condicionantes de movimentos de massa no município de Porto Alegre a partir de registros históricos. *Revista Brasileira de Cartografia*, 68(Edição Especial Movimentos de Massa e Processos Erosivos), 1853–1872.
- Divya, P.V. (2025). Climate-Resilient Hybrid Reinforced Soil Structures: Insights from Instrumented Model Tests Using an Artificial Rainfall Simulator. *Indian Geotech J*. <https://doi.org/10.1007/s40098-025-01419-9>
- DNIT. (2023). *Instrução Normativa nº 1/DNIT-SEDE, de 25 de janeiro de 2023*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).
- Gerscovich, D. M. S. (2016). *Estabilidade de taludes* (2ª ed.). Oficina de Textos.
- Guidicini, G., & Nieble, C. M. (1983). *Estabilidade de taludes naturais e de escavação*. Blucher.
- Jewell, R. A. (1991). Application of revised design charts for steep reinforced slopes. *Geotextiles and Geomembranes*, 10, 203–233.
- Macedo, E. S., & Martis, P. P. D. (2015). Análise do banco de dados de mortes por deslizamentos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). In *Anais do 15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental* (p. 7). ABGE. <http://cbge2015.hospedagemdesites.ws/trabalhos/trabalhos/294.pdf>
- Macedo, E. S., & Sandre, L. H. (2022). Mortes por deslizamentos no Brasil: 1988 a 2022. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*, 12(1), 110–117.
- Morgenstern, N. R., & Price, V. E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. *Géotechnique*, 15(1), 79–93.
- Peralta, F. N. G. (2007). *Comparação de métodos de projeto para muros de solo reforçado com geossintéticos* [Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro]. MAXWELL. <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=11331@1>
- Pereira, N. N. T. (2017). *Proposta de metodologia para mapeamento de risco geológico-geotécnico de escorregamentos em João Pessoa-PB* [Trabalho de Conclusão de Curso]. Universidade Federal da Paraíba. <http://security.ufpb.br/ccec/contents/documents/tccs/2017.1/proposta-de-metodologia-para-mapeamento-de-risco-geologico-geotecnico-de-escorregamentos-em-joao-pessoa-2013-pb.pdf>
- Pereira, A. S. et al. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. [free ebook]. Santa Maria. Editora da UFSM.
- Silva, L. S. (2018). *Análise de curva de correlação entre pluviosidade e movimentos de massa nas encostas de João Pessoa (PB)* [Trabalho de Conclusão de Curso]. Universidade Federal da Paraíba. <http://ct.ufpb.br/ccec/contents/documents/tccs/2017.2/analise-de-curva-de-correlacao-entre-pluviosidade-e-movimentos-de-massa-nas-encostas-de-joao-pessoa-pb.pdf>
- Silva, X. A. S. (2016). *Mapeamento de áreas de risco na cidade de João Pessoa: Comunidades Riachinho e Santa Clara* [Trabalho de Conclusão de Curso]. Universidade Federal da Paraíba. http://ct.ufpb.br/ccec/contents/documents/tccs/copy_of_2016.1/mapeamento-de-areas-de-risco-na-cidade-de-joao-pessoa.pdf
- Soares, F. L., Moraes, G. S., & Dias, S. P. (2017). Mapeamento de área em risco de deslizamento e análise de estabilidade de talude na cidade de João Pessoa-PB. In *Anais da XII Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas – COBRAE 2017*.
- Tiga, J. F. (2013). *Análise espacial e estatística dos movimentos de massa deflagrados pelas chuvas dos dias 11 e 12 de janeiro de 2011 na região serrana do estado do Rio de Janeiro, Brasil* [Dissertação de Mestrado]. Universidade de Brasília.
- Timm, L. L. (2018). *Sistemas referenciais de custos rodoviários federais: Evolução histórica e métodos de reajuste* [Trabalho de Conclusão de Curso ou Monografia de Graduação, a ser especificado, ou apenas Trabalho acadêmico]. Universidade de Brasília.
- Torres, F. S. M. (2014). *Carta de suscetibilidade a movimentos de massa e erosão do município de Ipojuca-PE* [Dissertação de Mestrado]. Universidade Federal de Pernambuco.
- Tudorica, M. R., & Bob, C. I. (2024). Intervention works conducted to ensure the stability of a slope: A sustainability study. *Sustainability*, 16(4), 1544. <https://doi.org/10.3390/su16041544>
- Vertematti, J. C. (Coord.). (2015). *Manual brasileiro de geossintéticos* (2ª ed.). Blucher.
- Vieira, L., & Tonus, B. P. A. (2022). Contenção em solo reforçado com geogrelha: estudo de caso. *Geotecnia*, 156, 55–75. https://doi.org/10.14195/2184-8394_156_3
- Vysyraju, P., Gondu, V. R., & Yamsani, S. K. (2025). Stabilisation of coal-mine overburden dumps using geogrid reinforcements. *Indian Geotechnical Journal*. <https://doi.org/10.1007/s40098-025-01332-1>