

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

EDUARDO JOSÉ MARTINS

**DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURA DE CONTENÇÃO PARA A
ESTABILIZAÇÃO DE TALUDE ÀS MARGENS DA RODOVIA
ESTADUAL SC 477 – ESTUDO DE CASO (KM 133+800)**

FLORIANÓPOLIS, 2026.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

EDUARDO JOSÉ MARTINS

**DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURA DE CONTENÇÃO PARA A
ESTABILIZAÇÃO DE TALUDE ÀS MARGENS DA RODOVIA
ESTADUAL SC 477 – ESTUDO DE CASO (KM 133+800)**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador(a):

Profa. Fernanda Simoni Schuch, Dra

FLORIANÓPOLIS, 2026

Ficha de Identificação da obra elaborada pelo autor, através do cadastro de ficha de identificação disponível no portal discente do Sistema Integrado de Gestão Acadêmica - SIGAA, do IFSC.

Martins, Eduardo Jose

DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURA DE CONTENÇÃO PARA a ESTABILIZAÇÃO DE TALUDE ÀS MARGENS DA RODOVIA ESTADUAL SC 477 ESTUDO DE CASO (KM 133+800) / Eduardo Jose Martins ; orientador(a): Profa. Fernanda Simoni Schuch, Dra. -- Florianópolis : 2026. 88 p.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis. Curso de Bacharelado em Engenharia Civil, Florianópolis, 2026.

Inclui referências.

1. Estabilidade de Taludes. 2. Equilíbrio Limite. 3. Solo Grampeado. 4. CONTENÇÃO rodoviária. 5. SC 477. I. Dra, Profa. Fernanda Simoni Schuch,. II. Instituto Federal de Santa Catarina, Curso de Bacharelado em Engenharia Civil. III. Título.

DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURA DE CONTENÇÃO PARA A ESTABILIZAÇÃO DE TALUDE ÀS MARGENS DA RODOVIA ESTADUAL SC 477 – ESTUDO DE CASO (KM 133+800)

EDUARDO JOSÉ MARTINS

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Civil e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 25 de junho, 2026.

Banca Examinadora:

Fernanda Simoni Schuch, Dra - Orientadora
Instituto Federal de Santa Catarina

Fábio Krueger da Silva, Dr.
Instituto Federal de Santa Catarina

Rafael Fabiano Cordeiro, M.e
RAV Engenharia e Geotecnia

(Aos meus familiares e todos aqueles
que de alguma forma contribuíram
para que eu conseguisse
atingir a conclusão do curso.)

AGRADECIMENTOS

A jornada até a conclusão da Engenharia Civil não se percorre sozinho. Aos que estiveram ao meu lado em cada desafio superado, dedico minha mais profunda gratidão.

À minha família, meu porto seguro. O apoio incondicional, a compreensão nas horas de ausência e o incentivo constante foram o combustível essencial para chegar até aqui. Esta conquista é reflexo direto dos valores que vocês me transmitiram.

À minha orientadora, Profa. Dra. Fernanda Simoni Schuch, pela dedicação ímpar, rigor técnico e por me guiar com maestria na estruturação deste trabalho, enriquecendo imensamente esta pesquisa.

Ao professor Dr. Fábio Krueger da Silva, cujas aulas me inspiraram a seguir na área de projetos de infraestrutura, pelo tempo dedicado à avaliação e por suas valiosas contribuições à minha formação.

Ao engenheiro e amigo Rafael Cordeiro e à equipe da RAV Engenharia e Geotecnia. A generosidade em ceder os dados de campo viabilizou este estudo de caso, permitindo um aprendizado prático, sou extremamente grato pela confiança depositada.

Aos amigos Ismael Barreiros, Gisele Reginatto, Matheus Araújo e Catarina Marchi que também foram base para a construção do trabalho, e a todos os colegas de classe do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), campus Florianópolis, pelas noites de estudo compartilhadas e por tornarem os anos de graduação mais leves e memoráveis.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho e para o meu crescimento pessoal e profissional.

Muito obrigado.

“Tudo aquilo que o homem ignora, não existe para ele.

Por isso, o universo de cada um se resume no
tamanho de seu saber.” - Albert Einstein.

RESUMO

O presente estudo de caso visa propor uma solução técnica a uma instabilidade de talude da Rodovia SC-477, em Doutor Pedrinho (SC), que se encontra interditada há cerca de três anos. O objetivo principal é dimensionar uma obra de contenção e comparar a viabilidade técnica e econômica de quatro alternativas de intervenção: Retaludamento convencional, Retaludamento associado a um muro de gabião e por fim, a técnica de solo grampeado associado a um retaludamento. A metodologia de análise baseia-se no Método do Equilíbrio Limite, reconhecido por sua simplicidade e precisão. Foi utilizada uma abordagem determinística (STEIN et al., 2021) que é complementada pela classificação de risco da ABNT NBR 11682:2009 para mitigar a incerteza intrínseca do maciço e garantir um Fator de Segurança (FS) adequado. A modelagem da geometria do talude e das alternativas de contenção é conduzida no software Civil 3D, enquanto a análise de estabilidade e a busca pela superfície de ruptura mais crítica foram realizadas no software SLIDE 6.0. A estimativa de custo da contenção foi medida com base nas quantidades geométricas da solução adotada, através dos critérios de medição das tabelas SICRO. Conclui-se ao final do trabalho que, diante do cenário exposto a melhor solução técnica a ser adotada seria o projeto de uma contenção em Solo Grampeado, alinhando uma intervenção geotécnica de Retaludamento 1:1,5 na base do talude estudado.

Palavras-chave: Estabilidade de Taludes. Equilíbrio Limite. Solo Grampeado. Contenção rodoviária. SC 477.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Justificativa	3
1.2	Definição do Problema	5
1.3	Objetivo Geral.....	6
1.4	Objetivos Específicos	6
1.5	Estrutura do Trabalho	7
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	8
2.1	Origem dos solos.....	8
2.2	Investigações Geotécnicas.....	11
2.2.1	Investigações de campo	11
2.2.1.1	Sondagens a percussão.....	12
2.2.1.2	Sondagem mista	13
2.2.2	Investigações geotécnicas de laboratório.....	14
2.2.2.1	Granulometria dos Solos.....	15
2.2.2.2	Massa específica.....	17
2.2.2.3	Limite de Liquidez	17
2.2.2.4	Limite de plasticidade.....	18
2.2.2.5	Ensaio de cisalhamento direto	19
2.3	Resistência ao Cisalhamento dos solos	20
2.4	Movimentos de massa.....	22
2.4.1	Rotacional e Translacional	22
2.5	Métodos de análise de estabilidade de taludes	24
2.5.1	Método de equilíbrio limite.....	27

2.5.1.1	Método das fatias	28
2.5.1.2	Método de Fellenius	28
2.5.1.3	Método de Bishop Simplificado	28
2.5.1.4	Método de Spencer	29
2.6	Estabilização de taludes	31
2.6.1	Retaludamento	31
2.7	Empuxos de terra	32
2.8	Tipos de contenção	33
2.8.1	Muro de Gabião	34
2.8.2	Solo Grampeado.....	35
2.9	Normas para projetos em obras de contenção.....	36
3	MÉTODO DA PESQUISA	37
3.1	Descrição do local da obra	38
3.1.1	Geologia do local	41
3.2	Sequência metodológica	43
3.2.1	Referencial Teórico.....	43
3.2.2	Coleta de Dados	43
3.2.3	Sintetização e Análise de Dados	45
3.2.4	Definição das possíveis soluções.....	51
3.2.5	Modelagem das soluções	52
3.2.6	Comparação e escolha entre as soluções.....	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1	Análise 01: Retaludamento com inclinação 1:1	56
4.2	Análise 02: Retaludamento com inclinação 1:1,5.....	58
4.3	Análise 03: Muro de Gabião + Retaludamento com inclinação 1:1,5	59

4.4	Análise 04: Solo Grampeado + Retaludamento com inclinação 1:1,5 (Solução adotada em projeto).....	61
4.5	Projeto da Obra de Contenção: Solo Grampeado + Retaludamento com inclinação 1:1,5 e estimativa de custo	69
4.5.1	Estimativa de custo da solução adotada	69
4.5.1.1	Terraplenagem.....	69
4.5.1.2	Colocação dos Grampos.....	71
4.5.1.3	Dreno sub-horizontal.....	73
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
	APÊNDICE A – Projeto Geotécnico (Retaludamento 1:1,5 + Solo Grampeado).....	82
	ANEXO A – SONDAGENS MISTAS	83
	ANEXO B – ENSAIO CISALHAMENTO DIRETO	87

1 INTRODUÇÃO

A relação entre o solo e as estruturas construídas pelo homem constitui um dos alicerces da Engenharia Civil, desde fundações até grandes estruturas de contenção, o desempenho das construções depende diretamente das características do terreno em que se apoiam. Nesse contexto, (PINTO, 2025), diz que: toda e qualquer estrutura precisa interagir com o solo onde será implantada, tornando imprescindível o estudo aprofundado do comportamento do maciço terroso. A Mecânica dos Solos é a subárea da engenharia que fornece o embasamento teórico para isso, analisando a resposta do solo tanto à imposição de cargas, quanto à remoção delas, assim como também aborda a influência do fluxo d'água nos vazios dos materiais, exigindo do engenheiro não apenas conhecimento técnico, mas também criatividade e engenhosidade para desenvolver soluções adaptáveis às condições peculiares de cada local.

Embora estudiosos como Coulomb (1773), Rankine (1856) e Darcy (1856) tenham estabelecido bases teóricas fundamentais, o início do século XX foi marcado por uma série de insucessos catastróficos em obras (como as rupturas no Canal do Panamá e grandes taludes), evidenciando a insuficiência dos métodos de cálculo aplicados até então. Terzaghi (1936) apontou a causa fundamental: o solo não podia ser tratado pelas mesmas leis teóricas destinadas a materiais com comportamento bem definido, como o concreto ou o aço, tornando ineficaz a simples extrapolação de parâmetros laboratoriais para modelos genéricos (PINTO, 2025).

Apesar da evolução dos estudos, os desafios relacionados ao solo permanecem, principalmente em áreas de encostas e terrenos instáveis, gerando os movimentos de massa, que segundo (STEIN et al., 2021) apesar de serem classificados como fenômenos naturais, têm seu desenvolvimento e frequência significativamente exacerbados pela intervenção humana. Na prática da Engenharia Civil, observa-se que as causas primárias desses deslocamentos estão ligadas à ação antrópica desordenada, como o corte de encostas e a ocupação em áreas de risco. O desmatamento consequente dessas ações, visando a construção de infraestruturas, habitações ou vias, compromete a estabilidade do maciço e se configura como o fator de maior relevância para a deflagração dos deslizamentos.

Nesse cenário, a compreensão das forças que atuam sobre as estruturas de contenção assume papel central no planejamento de obras seguras e duradouras que consigam conter os movimentos de massa.

Em nível global, os movimentos de massa representam, juntamente com as enchentes, um dos desastres de maior recorrência. Os maiores impactos socioeconômicos desses fenômenos são sentidos em áreas urbanas, onde a alta densidade populacional e topografia acidentada potencializam os riscos e a extensão dos prejuízos, demandando atenção prioritária da Engenharia Geotécnica para sua mitigação (RIFFEL, GUASSELLI e BRESSANI, 2016).

No Brasil, mas precisamente em Santa Catarina, os movimentos de massa são significativos. Conforme matéria do (G1 SC) em 2023 um boletim da defesa civil do estado de Santa Catarina, divulgado no dia 08 de Outubro, apontou que 60 cidades decretaram situação de emergência, com pelo menos duas mortes e diversas rodovias interditadas em virtude de alagamentos e deslizamentos de terra. Ao menos duas rodovias federais tiveram transtornos no Norte do Estado por conta das chuvas. Na BR-116 ocorreram pontos de erosão na pista e na BR-280, o km 103 teve interdição parcial em São Bento do Sul. Ainda segundo a notícia, pelo menos 19 rodovias estaduais tiveram interdição parcial ou total, dentre elas a SC 390, trecho da famosa Serra do Rio do Rastro, no município de Lauro Muller, com interdição total causada por deslizamentos de encostas sobre a pista.

Também segundo (G1 SC, 2024), a rodovia SC-477 (local de estudo do presente trabalho), no trecho de Doutor Pedrinho, sofreu um colapso em dezembro de 2022, com a abertura de uma cratera decorrente de fortes chuvas, resultando na interrupção da via e na criação de um desvio precário. A situação exigiu um estudo técnico aprofundado que se estendeu por mais de 15 meses. Esse longo período de análise, justificado pelo Secretário de Infraestrutura e Mobilidade, foi necessário devido à natureza atípica do dano, que ultrapassou os problemas rotineiros de manutenção e demandou uma investigação complexa antes da licitação.

O estado de Santa Catarina possui uma geografia singular e peculiar que o torna um cenário recorrente para ocorrências de processos naturais dos mais diversos, culminando em desastres de magnitudes variadas (HERRMANN, 2014),

exigindo um trabalho geotécnico contínuo e preventivo junto às localidades afetadas, focado na mitigação de riscos, além de uma capacidade técnica eficiente de resposta.

Diante do cenário catarinense, o desenvolvimento de projetos de obras de contenção é fundamental devido à função estratégica das rodovias como rotas cruciais para o escoamento de mercadorias e o trânsito regional. A complexidade geotécnica intrínseca a esses locais exige rigor nos estudos e mobiliza a atenção de projetistas e financiadores públicos. Visando contribuir com o conhecimento nesta área e abordar os pontos críticos na elaboração de um projeto seguro, o presente trabalho se propôs a realizar a Elaboração de Projeto de Estrutura de Contenção no Âmbito do Projeto Rodoviário da SC-477 no Km 133+800.

1.1 Justificativa

Considerando o aumento expressivo dos eventos pluviométricos intensos que vêm assolando o estado de Santa Catarina ano após ano e considerando-se os registros de eventos extremos, como o ocorrido na primavera de 2015, quando a precipitação em Santa Catarina, incluindo a região do Vale do Itajaí, se aproximou dos 800 mm no período de setembro a outubro, provocando grandes movimentos de massa (DUARTE, 2015), torna-se necessário o aprofundamento dos estudos geotécnicos voltados à análise e ao comportamento dos solos, pois, como demonstram, Malko et al. (2014), a estabilidade dos taludes é fortemente influenciada pelo regime hídrico, sendo que o aumento do nível do lençol freático provoca a diminuição do Fator de Segurança da encosta.

As fortes chuvas registradas nos últimos anos, que atingiram níveis históricos de precipitação, provocaram diversos deslizamentos de encostas e instabilizações de taludes, assim como abertura de crateras em rodovias estaduais e federais, como o caso ocorrido em janeiro de 2025. Segundo matéria da CNN Brasil (2025), as chuvas intensas ocorridas no dia 17 de Janeiro, provocaram a abertura de uma cratera no Km 181 da BR 101 na região metropolitana de Florianópolis, a via foi interditada nos dois sentidos no trecho entre Biguaçu e Governador Celso Ramos com o trânsito precisando ser desviado pelo Contorno de Florianópolis, recém-inaugurado. Na ocasião o corpo de bombeiros registrou 366 ocorrências em 27 municípios, ao todo 2.007 pessoas foram atendidas pela corporação nesse dia, com uma vítima fatal.

Segundo dados da Defesa Civil, neste mesmo dia, os maiores acumulados de chuva foram registrados em Biguaçu (391 mm), Florianópolis (344 mm) e Tijucas (325 mm).

Situações como as citadas acabam comprometendo a segurança e a infraestrutura viária. Nesse contexto, o estudo detalhado das características do solo e o correto dimensionamento de estruturas de contenção são fundamentais para mitigar os impactos de eventos extremos, garantir a durabilidade das obras rodoviárias e preservar vidas humanas.

Haja visto a relevância da análise geotécnica no contexto das obras de infraestrutura, torna-se imprescindível que cada caso seja avaliado de forma individualizada, levando em conta as particularidades geológicas, geotécnicas e urbanísticas da área em estudo. Em situações que envolvem escorregamentos e instabilidades em taludes na beira de rodovias, é necessário adotar uma abordagem integrada que contemple tanto a estabilidade dos taludes quanto às condições de uso e ocupação do entorno.

O objeto de análise do presente estudo, é um talude que sofreu ruptura, localizado na SC 477, trecho localizado entre as cidades de Doutor Pedrinho e Rio Negrinho no estado de Santa Catarina. No dia 06 de Janeiro de 2023 o tráfego de veículos foi totalmente interrompido entre os quilômetros 124 e 139, em função da ruptura de um talude, causando trincas muito expressivas no pavimento da rodovia, tudo isso em decorrência de fortes chuvas ocorridas na região (SECOM, 2023). Técnicos da Secretaria de Estado da Infraestrutura e Mobilidade (SIE) realizaram vistorias in loco com o objetivo de avaliar as condições do terreno e determinar as medidas emergenciais necessárias para a reabertura do trecho afetado, porém até o presente momento, (julho de 2026), a rodovia continua interditada.

Figura 1 – Trincas na rodovia SC 477 geradas por ruptura de talude



Fonte: RAV ENGENHARIA E GEOTECNIA (2023).

Diante disso, esta pesquisa faz-se necessária para realizar estudos, análises geotécnicas e projeto e que possibilitem compreender as causas e os mecanismos de instabilidade do local, de modo a subsidiar a escolha de soluções técnicas seguras e economicamente viáveis. Assim, a pesquisa justifica-se pela necessidade de propor alternativas de engenharia que sejam mais resilientes diante dos eventos climáticos extremos que têm se intensificado em Santa Catarina nos últimos anos, em especial no trecho de Doutor Pedrinho na SC 477, mostrado na Figura 1, o qual será objeto de estudos desta pesquisa.

1.2 Definição do Problema

Diante do histórico de interdição e da complexidade geotécnica do trecho localizado na rodovia SC-477 (Km 133+800), a presente pesquisa estrutura-se a partir do seguinte questionamento central: Qual é a alternativa de obra de contenção ou intervenção geotécnica mais adequada, sob o ponto de vista técnico e de estabilidade global, para a recuperação do talude rompido no estudo de caso?

Para responder a este problema de pesquisa e validar a viabilidade da solução definitiva, a análise de estabilidade e o dimensionamento impõem o atendimento a premissas e condicionantes rigorosas do local, a saber:

1. **A preservação da pista vicinal em cota superior:** Localizada na crista do talude de montante, a via opera atualmente como desvio provisório de tráfego, sendo compulsória a garantia da sua integridade física e estabilidade tanto durante as fases de escavação (fase de obra) quanto em caráter definitivo.
2. **A adequação ao projeto geométrico:** Consideração da mudança de traçado horizontal da rodovia, idealizada para afastar a nova faixa de rolamento da zona de influência das trincas ativas geradas pela ruptura anterior.
3. **A possibilidade de soluções mistas:** A necessidade de mobilizar resistência ao cisalhamento suficiente para atingir os Fatores de Segurança (FS) exigidos por norma, avaliando-se a necessidade e a eficácia de associar a adequação topográfica (retaludamento) à inserção de elementos estruturais de contenção, devido à estratigrafia e à saturação do maciço.

1.3 Objetivo Geral

Propor a estabilização do talude às margens da rodovia estadual SC 477 (Km 133+800), a partir do dimensionamento de uma estrutura de contenção que atenda aos requisitos técnicos e econômicos, com base em dados de investigações geotécnicas.

1.4 Objetivos Específicos

- a) Identificar as condicionantes de projeto de contenção para um talude com ruptura por deslizamento rotacional. Coletar e analisar os dados necessários para o dimensionamento de uma obra de contenção.

- b) Dimensionar quatro soluções geotécnicas distintas, utilizando softwares disponíveis no mercado.
- c) Analisar, entre as alternativas disponíveis, aquela que se mostra mais adequada sob os pontos de vista técnico e econômico.
- d) Apresentar o projeto básico com pranchas e quantidades da alternativa geotécnica escolhida.

1.5 Estrutura do Trabalho

O capítulo 1 apresenta a introdução, a justificativa, a definição do problema, o objetivo geral, os objetivos específicos e a estrutura do trabalho.

O capítulo 2 refere-se à fundamentação teórica dos temas que dão embasamento técnico e científico necessário ao desenvolvimento do projeto.

O capítulo 3 descreve o método utilizado na pesquisa, abordando a descrição e local da obra, definição e modelagem das soluções, metodologia para comparações e escolha da melhor solução.

O capítulo 4 traz os resultados e discussões acerca da problemática levantada, mostrando a forma como chegou-se aos valores e quais foram as alterações necessárias para atender as normas e objetivos propostos no trabalho.

O capítulo 5 mostra as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

Por fim são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas durante a pesquisa do presente trabalho e as pranchas do projeto em anexo.

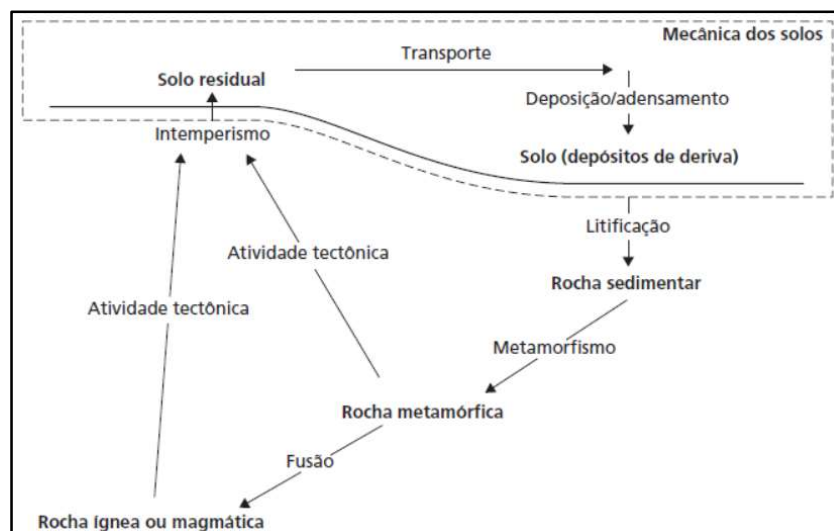
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste item da fundamentação teórica são apresentados os conceitos acerca da origem dos solos, a resistência ao cisalhamento dos solos, investigações geotécnicas de campo e de laboratório, movimentos de massa, os métodos de estabilidade de taludes, tipos de contenção, empuxo e por fim dimensionamento e normas em obras de contenção.

2.1 Origem dos solos

O solo é resultado do intemperismo (meteorização) processo que engloba a desintegração e a decomposição das rochas através de ações físicas, químicas e biológicas (CAPUTO; CAPUTO, 2022). A desintegração física, promovida por agentes como água e temperatura, é o mecanismo primário de formação das frações mais grossas (pedregulhos, areias) e intermediárias (siltes). Em contrapartida, a decomposição química, que envolve mecanismos como a oxidação e hidratação mediadas pela água, provoca a alteração mineralógica, gerando as argilas como produto final. A interação desses processos define o solo como uma função da rocha-mãe e dos agentes alteradores, sendo classificados como solos saprolíticos os materiais mais jovens e pouco intemperizados, que ainda preservam a estrutura original da rocha-mãe.

Figura 2 - O ciclo das rochas

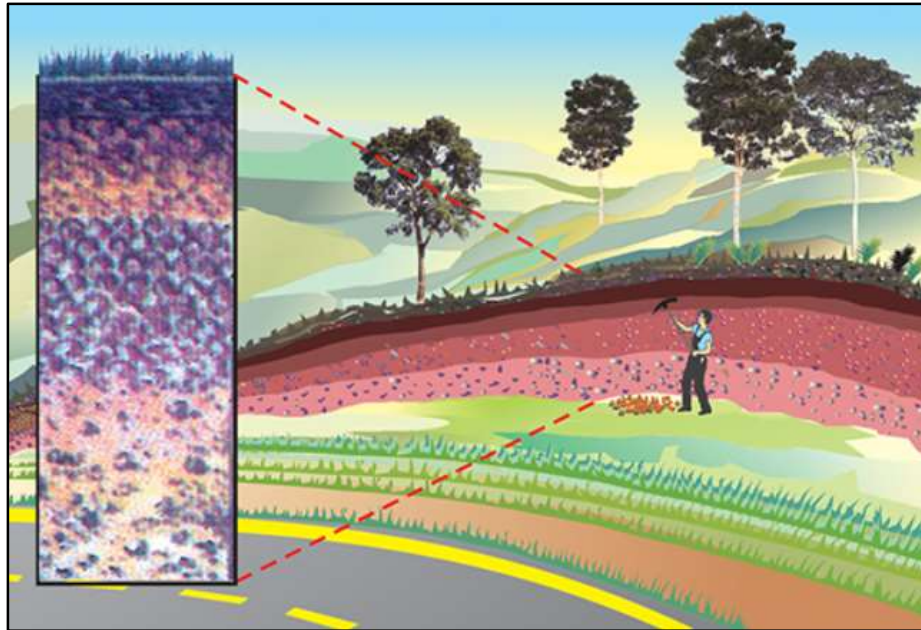


Fonte: KNAPPETT; CRAIG (2018).

A localização final dos materiais oriundos do intemperismo define a classificação inicial do solo. Se o material permanece *in situ*, sem deslocamento, é classificado como solo residual; caso contrário, será um solo transportado, deslocado por agentes como vento, gravidade, gelo ou água. Este processo de transporte não apenas redistribui o material, mas também modifica a forma e as dimensões das partículas, o que tem impacto direto na classificação granulométrica. Além da vasta variação dimensional das partículas, a classificação na Geotecnia é crucial, termos como "argila" e "silte" referem-se não apenas ao tamanho dos grãos, mas, fundamentalmente, às propriedades e ao comportamento mecânico que esses materiais apresentarão sob tensões, aspecto vital para o dimensionamento de obras (KNAPPETT; CRAIG, 2018).

O intemperismo transforma a rocha-matriz em saprolito, um material desagregado que, com a adição de húmus e a alteração mineralógica em argilas, inicia um processo evolutivo. É a partir da ação contínua e combinada de fenômenos físicos, químicos e biológicos que o solo desenvolve sua estrutura característica (LEPSCH, 2025). Assim, o saprolito relativamente homogêneo dá origem a uma sequência de camadas distintas, aproximadamente paralelas à superfície, de aspecto e constituição variados, que são denominados horizontes. Essa estratificação vertical é fundamental e deve ser analisada na determinação do perfil do solo. É possível verificar de forma prática os horizontes do solo em cortes na beira de rodovias, como ilustrado na Figura 3 abaixo.

Figura 3 – Taludes em estradas expondo o perfil do solo



Fonte:LEPSCH (2025).

Conforme (MURRIETA, 2018), enquanto os solos residuais geralmente apresentam resistência crescente com a profundidade, a variação de camadas nos sedimentares constitui uma fonte comum de problemas em fundações. Já os solos coluvionares, que são depósitos sedimentares deslocados primariamente pela gravidade, embora sua granulometria possa ser homogênea, esses solos em encostas são frequentemente caracterizados por estrutura porosa, baixos índices de resistência (baixo SPT) e alta susceptibilidade ao colapso estrutural sob carregamento, exigindo análises geotécnicas rigorosas em projetos de contenção.

Em resumo, a formação do solo é um complexo processo de intemperismo geológico que define não apenas a composição granulométrica do material, mas seu comportamento mecânico e sua estratificação em horizontes. Para a Engenharia Geotécnica, essa origem é fundamental para distinguir os perfis do solo e suas camadas de maior risco, cuja baixa resistência e vulnerabilidade a colapso demandam análises de estabilidade de taludes com a máxima precisão possível.

2.2 Investigações Geotécnicas

O sucesso de qualquer obra de engenharia está diretamente ligado a investigações geotécnicas preliminares. O maior risco na construção é a falta de conhecimento sobre o subsolo de fundação; falhas nesse estudo podem levar a custos de recuperação enormes ou até ao colapso, embora o investimento na investigação seja geralmente mínimo (cerca de 0,2% a 0,5% do valor da obra). Em projetos de grande percurso, como rodovias, esse reconhecimento é essencial para mapear a variedade do terreno e resolver questões cruciais de custo e planejamento, como a presença de rocha ao longo do caminho (CAPUTO; CAPUTO, 2022).

Os objetivos principais da investigação são: (1) determinar a sequência, as espessuras e a dimensão lateral dos estratos do solo e, quando apropriado, o nível do substrato rochoso; (2) obter amostras representativas dos solos (e rochas) para identificação e classificação e, se necessário, para o uso em ensaios de laboratório a fim de determinar os parâmetros adequados do solo; (3) identificar as condições da água subterrânea. A investigação também pode incluir a realização de ensaios in situ para avaliar as características apropriadas do solo. (KNAPPETT e CRAIG, 2014, p. 155).

2.2.1 Investigações de campo

A realização de um estudo teórico preliminar para minimizar as incertezas inerentes às condições do subsolo é indispensável, antes de se iniciar qualquer furo de sondagem (KNAPPETT; CRAIG, 2014). O objetivo primário dessa fase é compilar informações existentes que permitam antecipar as prováveis características do terreno. Para tal, o engenheiro faz uso coordenado de mapas geológicos e topográficos, registros de investigações anteriores, fotografias aéreas ou imagens de satélite. A compilação e análise de informações preexistentes, são vitais para identificar feições geológicas de interesse e otimizar a locação dos pontos de perfuração.

Tabela 1 - Tipos de Investigações de campo

Categoria	Tipo de Investigação / Ensaio	Finalidade Principal
Ensaio de Campo (In situ)	Sondagem a Percussão (SPT)	Determinação do índice de resistência (NSPT) e perfil estratigráfico.
	Sondagem Rotativa	Investigação de maciços rochosos e obtenção de testemunhos.
	Ensaio de Palheta (Vane Test)	Medição da resistência não drenada em argilas moles.
	Ensaio de Cone (CPTu)	Avaliação contínua da resistência de ponta e poropressão.
	Dilatômetro de Marchetti (DMT)	Obtenção de módulos de deformabilidade e histórico de tensões.

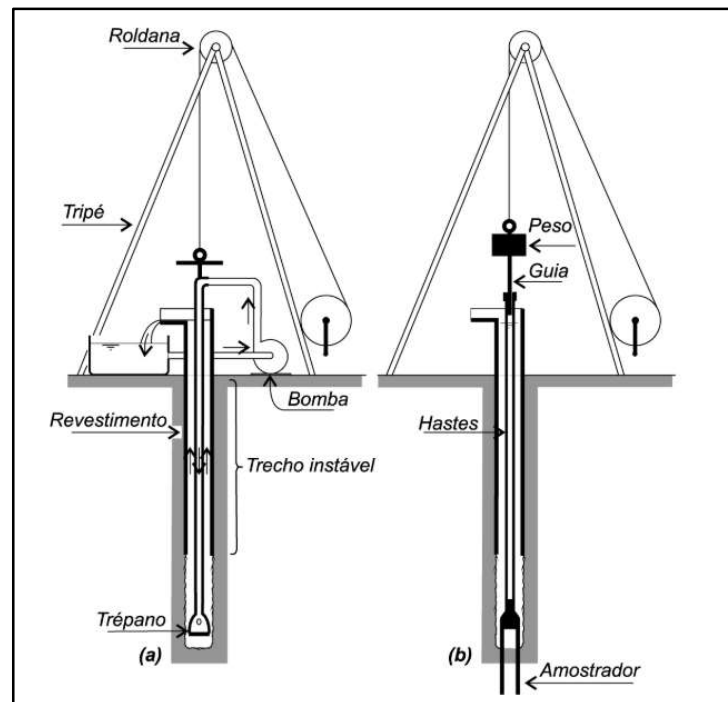
Fonte: Elaboração própria do Autor (2026).

Há diversos métodos de investigação de campo, pode-se citar a realização de sondagens simples, sondagens rotativas e/ou mistas, abertura de poços, sondagem com trado manual, entre outros como os citados na (Tabela 1). Todos estes objetivam coletar dados sobre o perfil de solo estudado para fundamentar projetos geotécnicos. Nos subitens a seguir apresenta-se a descrição das técnicas de sondagens utilizadas somente para se obter os dados de projeto desta pesquisa.

2.2.1.1 Sondagens a percussão

A Sondagem à Percussão é o método de perfuração que permite avançar em solos de variada compacidade e ultrapassar o nível freático (VELLOSO; LOPES, 2025). O furo avança através da desagregação do maciço pelo trépano (Figura 4) e da remoção do material desagregado por meio da lavagem (circulação de água). Para assegurar a estabilidade do furo durante o processo, utiliza-se o revestimento em solos instáveis, podendo-se recorrer à adição de bentonita em condições mais estáveis.

Figura 4 – Etapas na execução de sondagem a percussão



Fonte: VELLOSO; LOPES, (2025).

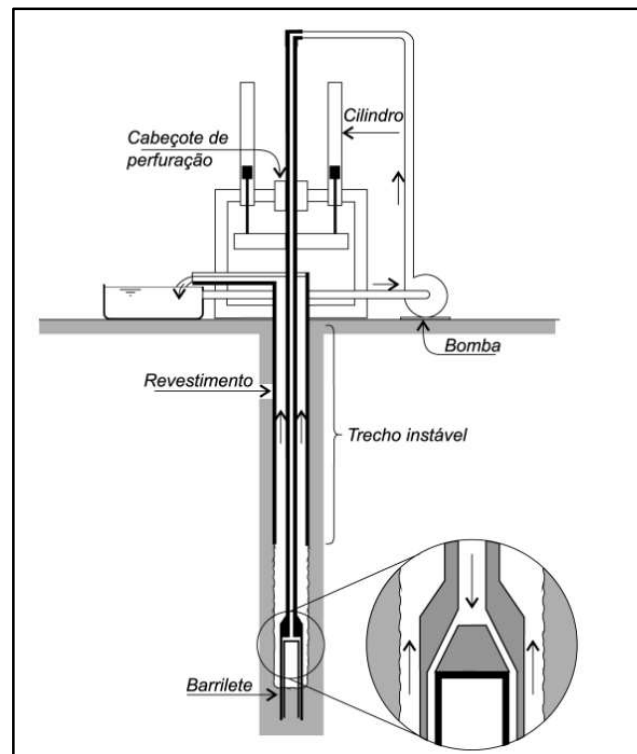
Embora a análise visual da amostra extraída forneça uma indicação preliminar da consistência ou compacidade do material, o estado do solo é determinado fundamentalmente pela resistência que ele oferece à cravação do amostrador (PINTO, 2025). Durante o ensaio, os golpes são registrados a cada incremento de 15 cm de cravação. Para determinar a resistência à penetração, conhecida como número N do SPT (Standard Penetration Test), os golpes do primeiro trecho de 15 cm são desprezados, e o índice N é definido pela soma dos golpes necessários para cravar os 30 cm subsequentes do amostrador. Este valor de N é o parâmetro geotécnico essencial utilizado para inferir o estado de compacidade ou consistência do solo em projetos de engenharia.

2.2.1.2 Sondagem mista

Em locais que abrangem uma transição solo-rocha, a Sondagem Mista é a metodologia adotada, combinando os equipamentos de percussão (SPT) e rotativo, com o protocolo de priorizar o SPT nos trechos de solo (VELLOSO; LOPES, 2025). A Sondagem Rotativa é utilizada para caracterizar ou transpor elementos rochosos,

como matacões ou maciços, operando por rotação e avanço forçado, com auxílio de circulação hídrica. Para a extração de amostras, essa técnica emprega o barrilete, uma ferramenta que utiliza uma coroa equipada com pastilhas de diamante ou tungstênio para realizar o corte e recuperar o material rochoso (o testemunho).

Figura 5 – Esquema de funcionamento de sonda rotativa



Fonte: VELLOSO; LOPES, (2025).

2.2.2 Investigações geotécnicas de laboratório

Confirme (DAS, 2016), a caracterização do solo exige a realização de ensaios laboratoriais específicos para determinar propriedades cruciais como distribuição granulométrica, plasticidade, compressibilidade e resistência ao cisalhamento. Embora a determinação de parâmetros *in situ* seja uma prática valiosa para contornar a perturbação das amostras, nem todos os dados necessários podem ser obtidos em campo devido a restrições econômicas e operacionais. Nesses cenários de informação incompleta, o profissional de engenharia é obrigado a fazer suposições técnicas, o que não é recomendado. Assim, para avaliar e validar com precisão os parâmetros, sejam eles medidos ou estimados, é indispensável que o engenheiro possua um conhecimento aprofundado da Mecânica dos Solos e,

fundamentalmente, da geologia do local. Este conhecimento é vital para lidar com a não-homogeneidade inerente aos depósitos naturais, bem como para entender a estratificação e a influência da água subterrânea.

Tabela 2 – Tipos de ensaios de laboratório

Categoria	Tipo de Investigação / Ensaio	Finalidade Principal
Ensaio de Laboratório	Caracterização Completa	Determinação de granulometria, limites de Atterberg e índices físicos.
	Ensaio de Cisalhamento Direto	Obtenção dos parâmetros de coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ).
	Ensaio Triaxial (UU, CU ou CD)	Avaliação da resistência sob diferentes condições de drenagem e confinamento.
	Ensaio de Adensamento	Estudo de recalques e compressibilidade de solos finos.
	Ensaio de Compactação (Proctor)	Determinação da umidade ótima e massa específica seca máxima.

Fonte: Elaboração própria do Autor (2026).

Assim como para os ensaios de campo, há diversos métodos de Investigações geotécnicas de laboratório, dentre eles o ensaio triaxial, adensamento, compactação entre outros como os citados na (Tabela 2). Para critério de simplificação, a seguir apresenta-se a descrição das Investigações geotécnicas de laboratório utilizadas somente para se obter os dados de projeto desta pesquisa.

2.2.2.1 Granulometria dos Solos

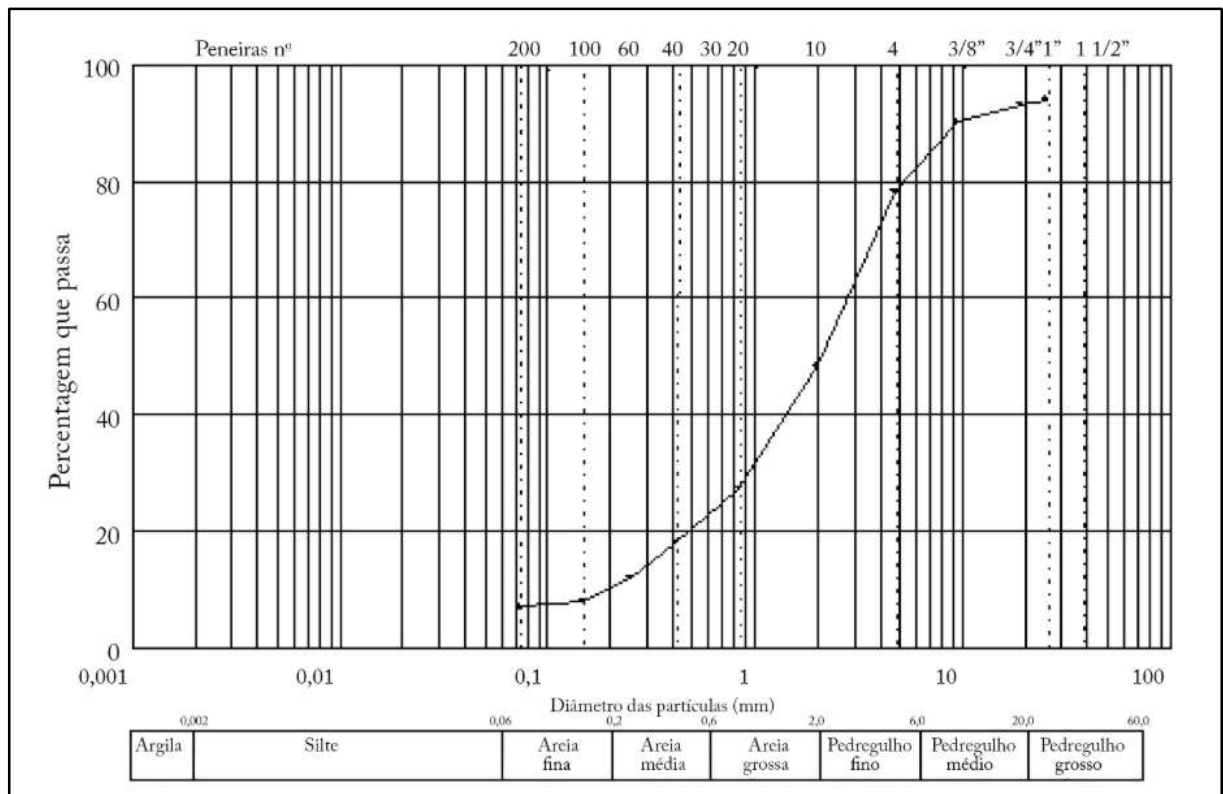
A Análise Granulométrica constitui o procedimento essencial para quantificar o tamanho das partículas presentes em um solo, expressando o resultado em termos percentuais de massa seca total (DAS; SOBHAN, 2019). Este processo se divide em dois métodos primários baseados na dimensão: o Ensaio de Peneiramento, destinado a partículas com diâmetros superiores a 0,075 mm, e o Ensaio de Sedimentação, reservado às frações mais finas, conforme (ABNT NBR 7181:2025). O

Ensaio de Peneiramento exige a desagregação da amostra e sua agitação em uma sequência de peneiras de malha decrescente (até a peneira Nº 200).

Com a massa retida em cada peneira determinada, calcula-se a porcentagem passante, plotando-se os resultados no gráfico semilogarítmico para obter a curva de distribuição granulométrica. Esta curva (Figura 6) é a representação gráfica essencial na Geotecnia; nela, a porcentagem que passa (eixo vertical) é plotada em escala aritmética contra o diâmetro das partículas (eixo horizontal) em escala logarítmica. A análise desta curva é crucial, pois permite a classificação do solo e a determinação dos diâmetros característicos, essenciais para a avaliação do comportamento do material.

No Ensaio de Sedimentação, a amostra é inicialmente imersa por um longo período em uma solução com agente defloculante (como hexametáfosfato de sódio), o que garante a separação individual das partículas. A suspensão é, então, transferida para uma proveta, onde um densímetro mede a massa específica ao longo do tempo. O diâmetro das partículas que permanecem em suspensão em um dado instante é calculado por meio da Lei de Stokes. Por fim também se obtém uma curva de distribuição granulométrica do solo, (DAS, 2016).

Figura 6 – Curva Granulométrica



Fonte: MURRIETA, (2018).

2.2.2.2 Massa específica

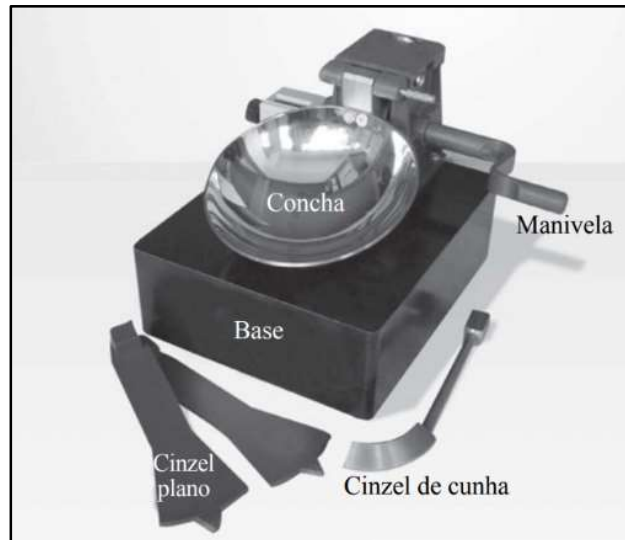
A massa específica dos grãos é um índice físico vital, representando a relação entre a massa e o volume das partículas sólidas do solo, excluindo-se totalmente os vazios. Este parâmetro, padronizado pela ABNT NBR 6458:2025, é fundamental para o cálculo de outros índices derivados, como o índice de vazios e a porosidade, sendo indispensável nas análises de estabilidade de taludes.

2.2.2.3 Limite de Liquidez

O Limite de Liquidez (LL) representa o teor de umidade que estabelece o ponto de transição do solo do estado líquido para o estado plástico (LAGETEC, 2016). Conforme a definição da norma brasileira (ABNT NBR 6459:2025), este limite é quantificado em laboratório pelo teor de água necessário para que uma ranhura, previamente aberta na pasta de solo no aparelho de Casagrande (Figura 7), feche

suas bordas inferiores em um comprimento de 13 mm após ser submetida a 25 golpes padronizados.

Figura 7 – Aparelho de ensaio de limite de liquidez e cinzéis.



Fonte: DAS; SOBHAN, (2019).

2.2.2.4 Limite de plasticidade

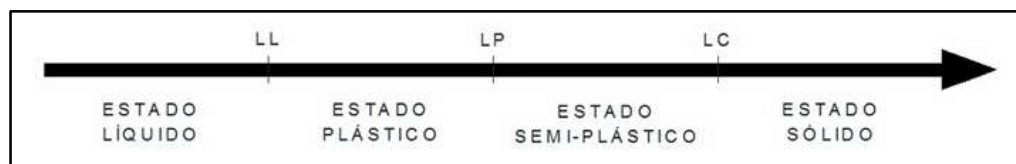
O Limite de Plasticidade (LP) define o teor de umidade que marca a passagem do solo do estado plástico para o estado semi-plástico (LAGETEC, 2016). Este conceito é visualmente demonstrado na (Figura 9), que ilustra a relação entre os limites de Atterberg (LL, LP, LC) e os estados de consistência do solo, de acordo com a norma brasileira (ABNT NBR 7180:2025), o LP é determinado pelo menor teor de água no qual a amostra de solo, ao ser rolada na palma da mão, é capaz de moldar-se em um cilindro com 3 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento sem que haja desagregação. O procedimento para obtenção desse limite é ilustrado na Figura 8, que demonstra a etapa de rolagem da massa de solo na palma da mão sobre uma placa de vidro. Quando o cilindro apresenta fissuras estando nas dimensões do cilindro padrão, esse momento marca o ponto exato da transição para o estado semissólido.

Figura 8 – Rolagem da massa de solo em uma placa de vidro para determinação do limite de plasticidade.



Fonte:DAS; SOBHAN, (2019).

Figura 9 – Limites de consistência



Fonte: LAGETEC (2016).

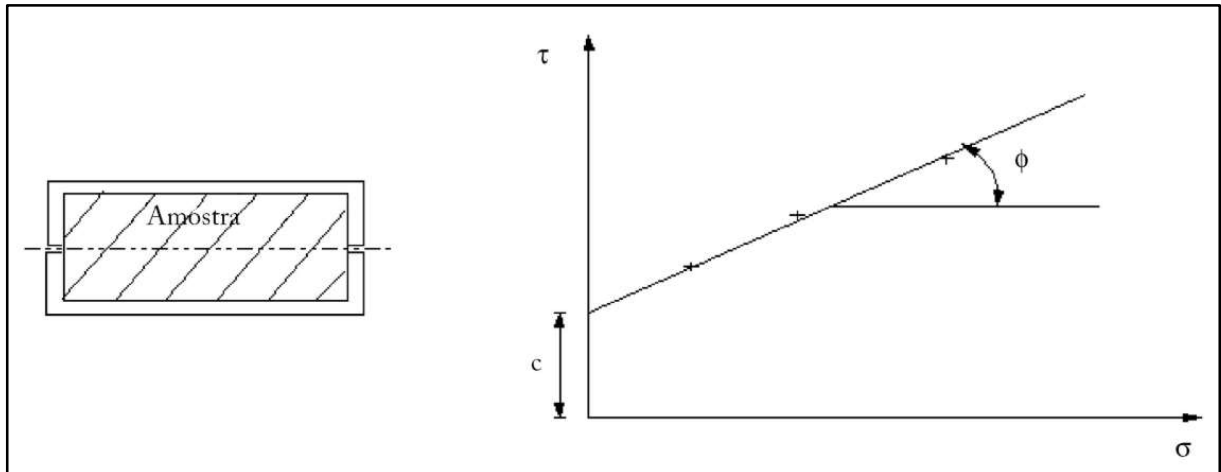
2.2.2.5 Ensaio de cisalhamento direto

O Ensaio de Cisalhamento Direto é o método mais simples e econômico para a determinação da resistência ao cisalhamento do solo, crucial para a estabilidade de taludes (DAS; SOBHAN, 2019). O equipamento utiliza uma caixa metálica dividida para aplicar uma força normal e, subsequentemente, uma força de cisalhamento horizontal, forçando a ruptura da amostra ao longo do plano de separação.

Para a determinação dos parâmetros de resistência do solo, o Ensaio de Cisalhamento Direto é repetido sob a aplicação de diferentes tensões normais (MURRIETA, 2018). O resultado obtido, plotado graficamente (Figura 10), fornece a envoltória de ruptura, a partir da qual são determinados os parâmetros de resistência ao cisalhamento do material (coesão e ângulo de atrito). O procedimento é versátil e aplicável a amostras de solos tanto coesivos quanto não-coesivos, sendo conduzido

de forma controlada por tensão (com esforço tangencial fixo) ou controlada por deformação (com velocidade de cisalhamento fixa).

Figura 10 – Ensaio de cisalhamento direto e envoltória de ruptura



Fonte: MURRIETA (2018).

2.3 Resistência ao Cisalhamento dos solos

A resistência ao cisalhamento, definida como a tensão máxima mobilizada no plano de ruptura no instante exato da ruptura, representa a capacidade interna do solo de suportar solicitações e manter sua integridade estrutural (CAPUTO; CAPUTO, 2022). A avaliação precisa dessa propriedade é imprescindível para viabilizar o dimensionamento seguro de obras geotécnicas, como estruturas de contenção, fundações e análises de estabilidade de taludes.

O arcabouço teórico que rege esse comportamento fundamenta-se nos preceitos da mecânica clássica iniciados por Coulomb em 1776, posteriormente aprimorados pela formulação gráfica de Mohr (1910), pelo princípio das tensões efetivas de Terzaghi (1925) e pelas investigações sobre coesão e ensaios laboratoriais de Hvorslev e Bishop (MURRIETA, 2018).

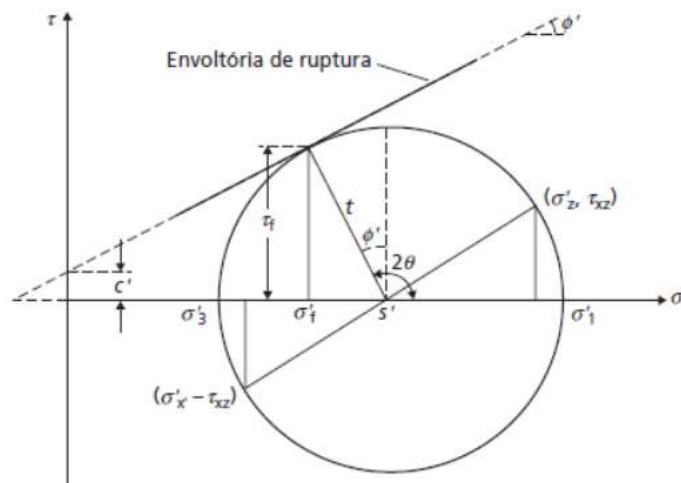
A partir dessa evolução, consolidou-se o entendimento de que a ruptura de um maciço ocorre ao longo de planos de deslizamento específicos, sendo governada pela interação de dois parâmetros fundamentais: a coesão (c), resultante de forças de atração química e capilaridade entre as partículas; e o ângulo de atrito interno (ϕ), que

engloba a fricção física e o intertravamento mecânico dos grãos (CAPUTO; CAPUTO, 2022).

Dessa forma, em solos puramente granulares sob tensão confinante nula ($\sigma = 0$), a resistência ao cisalhamento (τ) também é nula, sendo mobilizada integralmente pelo atrito. Em contrapartida, solos finos argilosos mantêm uma estabilidade intrínseca mesmo sem tensões externas aplicadas, devido à parcela de resistência independente do confinamento, definida como coesão. Essa generalização do comportamento da maioria dos solos é tradicionalmente conhecida como Critério de Ruptura de Mohr-Coulomb, expresso pela seguinte equação:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

Figura 11 - Envoltória de Coulomb



Fonte: KNAPPETT; CRAIG (2018).

Neste critério, a resistência máxima resulta da composição linear da parcela coesiva (c) e da parcela friccional ($\sigma \tan \phi$). Graficamente **Figura 11**, conforme postulado por Mohr, o solo permanece estável desde que o círculo representativo de seu estado de tensões se mantenha circunscrito abaixo da envoltória de resistência do material (MURRIETA, 2018).

2.4 Movimentos de massa.

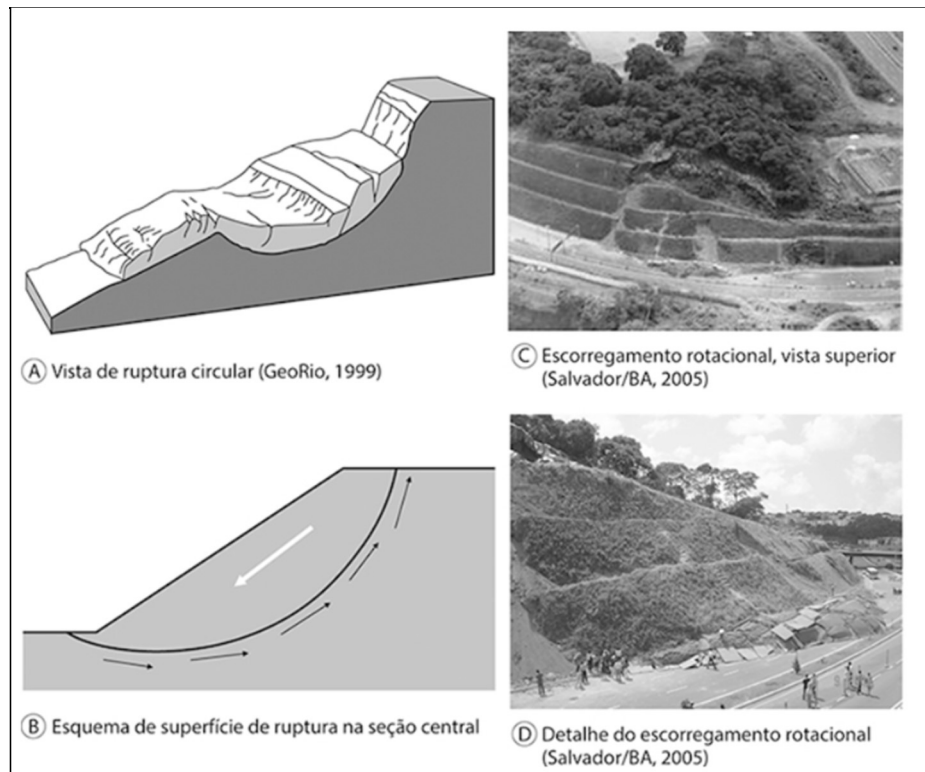
Movimentos de massa são definidos como o deslocamento de um volume de solo ou rocha, sendo o principal fenômeno associado à instabilidade de encostas (VARNES, 1978, *apud* GERSCOVICH, 2025). Segundo a autora embora existam vários tipos de classificação, a de Varnes é o padrão internacionalmente aceito, organizando os movimentos em queda, tombamento, escorregamento, expansão lateral, escoamento e complexo, sendo utilizado tanto para solos quanto para rochas. Contudo, a aplicação em ambientes tropicais, como no Brasil, exige adaptações regionais.

O escorregamento é um tipo de movimento de massa que envolve a descida de um volume de solo ou rocha que desliza sobre uma superfície de ruptura já definida, ou em uma camada fina onde ocorre intensa deformação por cisalhamento (USGS, 2008). Tecnicamente, a característica distintiva deste fenômeno é que o processo de falha não é imediato em toda a área. O deslocamento do material começa de forma localizada e, a partir desse ponto de origem, o volume de material que se move aumenta e se propaga pela encosta.

2.4.1 Rotacional e Translacional

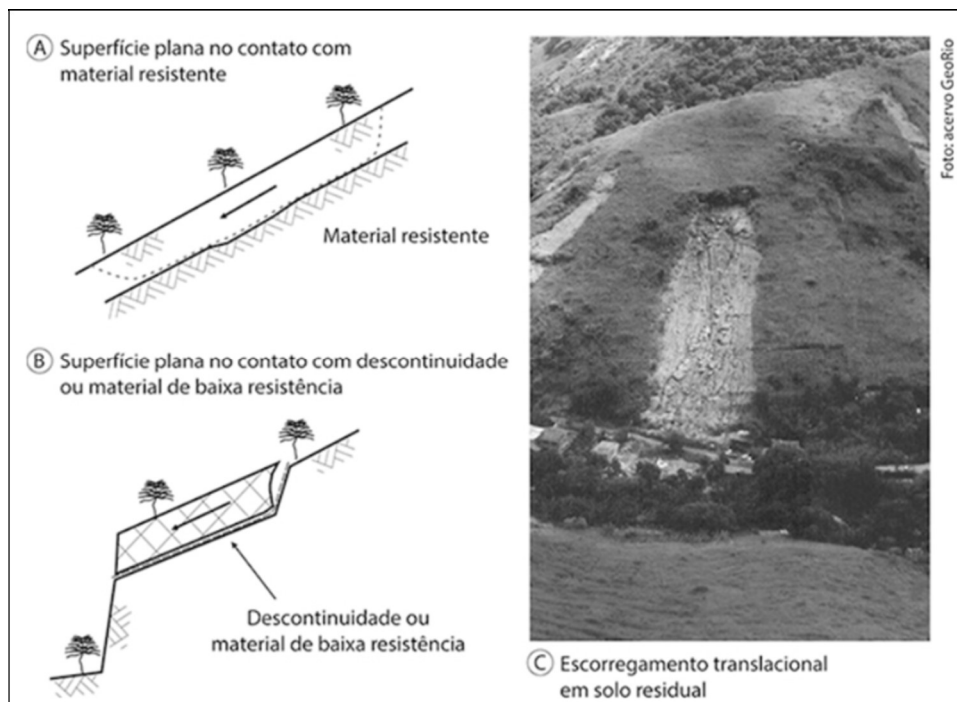
A classificação dos escorregamentos é definida pela geometria da superfície de ruptura (KNAPPETT; CRAIG, 2014). Nos movimentos rotacionais (Figura 12), a superfície de falha é curva (circular ou não-circular), enquanto nos translacionais, a ruptura é predominantemente plana e rasa, tendendo a ser paralela ao talude.

Figura 12 - Superfícies de ruptura – escorregamento simples rotacional



Fonte: GERSCOVICH (2025).

Figura 13 - Exemplos de superfícies de ruptura translacional

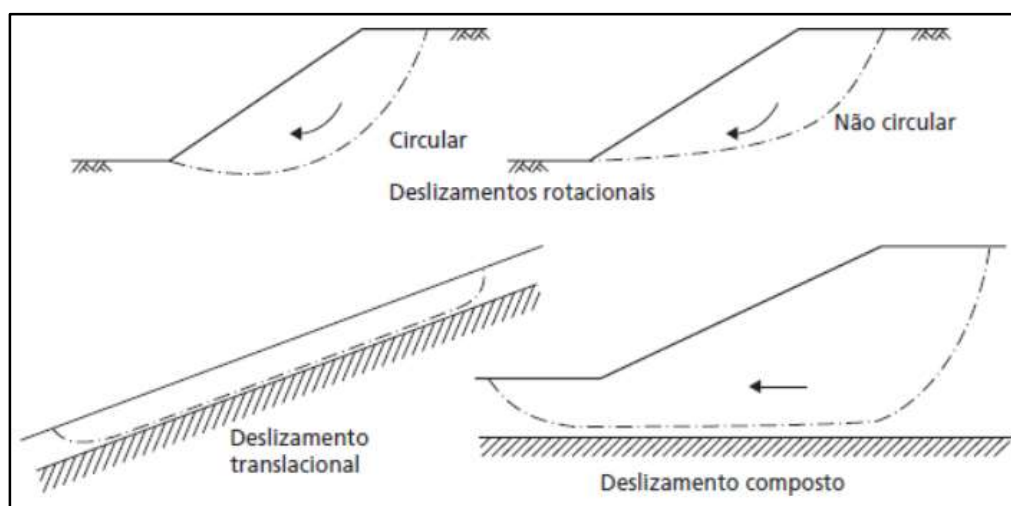


Fonte: GERSCOVICH (2025).

O deslizamento composto combina essas geometrias (plana e curva). Esta distinção é ilustrada na Figura 14 (Tipos de ruptura de taludes), que é fundamental para definir o método de cálculo apropriado.

As velocidades desses movimentos de massa são amplas, variando desde o lento (rastejo) até quedas rápidas de caráter catastrófico. As causas prováveis para a deflagração da maioria dos escorregamentos em encostas são principalmente o aumento da pressão neutra (por infiltração de chuvas intensas) e a ação antrópica, como o corte na base do talude ou a aplicação de sobrecargas indevidas, fatores que reduzem a resistência ao cisalhamento e levam o maciço à iminência da ruptura (KNAPPETT; CRAIG, 2014).

Figura 14– Tipos de ruptura de taludes



Fonte: KNAPPETT; CRAIG, (2014).

2.5 Métodos de análise de estabilidade de taludes

O estudo de estabilidade de taludes segue uma metodologia sequencial e integrada, iniciando-se pela definição da topografia e das sobrecargas incidentes no maciço. Em seguida, é indispensável a fase de investigação de campo para mapear a estratigrafia, o nível freático e os elementos estruturais enterrados, além da extração de amostras indeformadas. No laboratório, realizam-se ensaios de caracterização e de resistência ao cisalhamento para a definição dos parâmetros de projeto. A etapa final consiste na adoção de métodos de dimensionamento para a obtenção do fator de segurança (FS) ou das tensões e deformações (GERSCOVICH, 2025).

A análise de estabilidade envolve um conjunto de procedimentos visando à determinação de um índice ou grandeza que permita quantificar o quão próximo da ruptura um determinado talude se encontra, para um determinado conjunto de condicionantes atuantes (pressões neutras, sobrecargas, geometria, etc). Pode-se utilizar para uma análise de estabilidade de taludes, os métodos analíticos, que se baseiam na teoria do equilíbrio limite, análise limite e nos modelos matemáticos de tensão deformação. (PEREIRA, 2013, p. 22).

Para a análise de estabilidade, tipicamente tratada como um problema bidimensional, são empregadas as técnicas de Equilíbrio Limite. Este método pressupõe que o maciço está na iminência de falhar ao longo de uma superfície de deslizamento suposta. O procedimento finaliza com o balanceamento de forças no estado limite último: as forças atuantes (componentes gravitacionais que causam o deslizamento) são majoradas, e as forças resistentes (cisalhamento e oposição ao movimento) são minoradas para garantir a segurança geotécnica do projeto (KNAPPETT; CRAIG, 2014).

O objetivo central da análise de estabilidade é avaliar a ocorrência de escorregamentos, utilizando uma abordagem determinística que define o Fator de Segurança (FS) pela comparação entre a resistência ao cisalhamento disponível e as tensões cisalhantes mobilizadas no maciço (GERSCOVICH, 2025).

$$FS = \frac{S}{\tau} \quad (1)$$

O Fator de Segurança Admissível, valor mínimo exigido no projeto, é estabelecido com base nas consequências de uma eventual ruptura, considerando perdas humanas e econômicas. Para gerenciar esse risco, a norma ABNT NBR 11682:2009 exige que o projeto seja enquadrado em um Nível de Segurança específico. Essa classificação deve ser preditiva, considerando não apenas as condições atuais, mas também o uso futuro da área, protegendo a mesma contra ações que venham desestabilizar o talude.

Figura 15 – Fatores de segurança mínimos para deslizamento

Nível de segurança contra danos materiais e ambientais	Nível de segurança contra danos a vidas humanas			
		Alto	Médio	Baixo
	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 NBR 11682:2009

Na análise da estabilidade de encostas, os engenheiros geotécnicos empregam modelos matemáticos que tratam a massa de solo sujeita ao deslizamento de duas formas: como um bloco único e rígido ou por meio da divisão do material em fatias (BARROS, 2017). O método que utiliza a divisão em fatias (ou lamelas) é preferível e oferece uma visão muito mais completa e precisa do problema de instabilidade. Isso ocorre porque, ao contrário do modelo de bloco rígido, a técnica de fatias permite incorporar a realidade complexa do subsolo, considerando fatores geotécnicos como a existência de diferentes camadas de solo (estratificações), a influência da água (pressões neutras e lençol freático) e a presença de cargas aplicadas na superfície. Essa capacidade de considerar a heterogeneidade e as variáveis de campo torna o método de subdivisão essencial para o dimensionamento seguro de projetos.

Além das análises de estabilidade determinísticas, por equilíbrio limite, tem-se métodos probabilísticos pela análise de tensão (como o Método dos Elementos Finitos - MEF). O método do Equilíbrio Limite baseia-se na hipótese de equilíbrio estático da massa de solo na iminência de escorregamento, sendo amplamente utilizado na prática geotécnica devido à sua simplicidade, rapidez e precisão (STEIN et al., 2021). Em contraste, a análise de Tensão (MEF), que modela as relações entre tensões e deformações do material, oferece uma representação mais realista do maciço, mas exige uma maior quantidade de dados para sua aplicação. Devido a essa

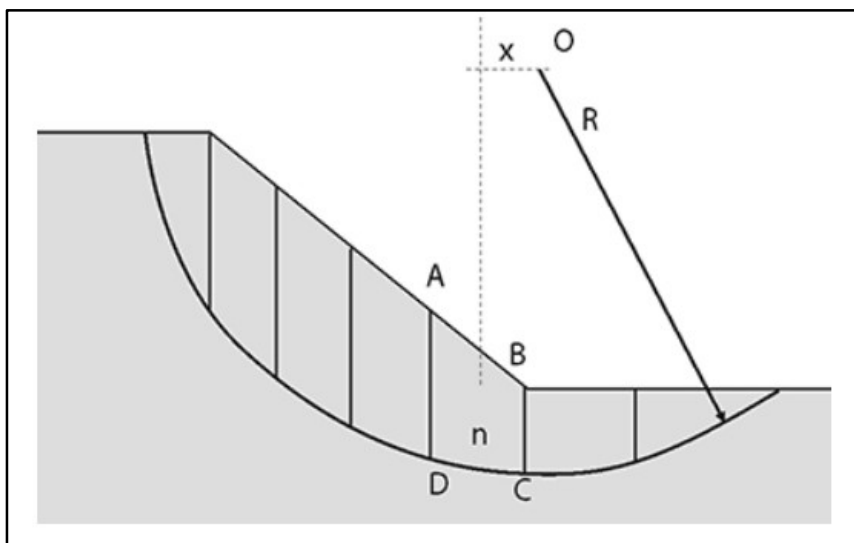
complexidade e à dificuldade na obtenção dos parâmetros necessários, os métodos de Equilíbrio Limite permanecem como a abordagem predominante para a estabilidade de taludes em maciços terrosos.

Nos Subitens abaixo descreve-se os métodos de análise utilizados nesta pesquisa.

2.5.1 Método de equilíbrio limite

O Método do Equilíbrio Limite visa determinar o equilíbrio de uma massa ativa de solo, que é delimitada por uma superfície de ruptura de geometria arbitrária (circular, poligonal ou outra) (GERSCOVICH, 2025). A premissa central é que a falha do maciço ocorrerá ao longo de toda essa superfície simultaneamente quando o Fator de Segurança (FS) for igual a 1. O procedimento postula, inicialmente, um mecanismo de ruptura e trata a massa de solo acima da superfície como um corpo livre, o qual é subdividido em fatias (Figura 16). O equilíbrio é resolvido pelas equações da estática: o balanço de forças é verificado para cada fatia individualmente, e o equilíbrio de momentos é estabelecido pela comparação entre os somatórios dos momentos estabilizantes e instabilizantes, sendo a tensão cisalhante mobilizada uma das principais incógnitas a ser determinada.

Figura 16 – Exemplo de divisão em fatias de uma superfície circular



Fonte: GERSCOVICH, (2025)

2.5.1.1 Método das fatias

O Método das Fatias (ou lamelas) é o procedimento fundamental na análise de Equilíbrio Limite, baseado na diminuição da massa de solo ativa em segmentos verticais, que são individualmente avaliados pelas equações da estática (STEIN et al., 2021). O objetivo central do método é, por meio de um processo iterativo, identificar a superfície de ruptura associada ao Fator de Segurança (FS) mínimo. As variações deste método diferem nas simplificações adotadas no cálculo, principalmente no tratamento das forças entre fatias (laterais e verticais).

2.5.1.2 Método de Fellenius

De acordo com (STEIN et al., 2021) o método de Fellenius introduziu o primeiro procedimento de Equilíbrio Limite para a análise de estabilidade com superfície de ruptura circular. Este método é amplamente reconhecido por sua simplicidade, mas se baseia em simplificações significativas, ele despreza as forças laterais (normais e tangenciais) atuantes nas faces entre lamelas, e o equilíbrio de forças é resolvido exclusivamente na direção normal à base da fatia (o raio do círculo de ruptura). Essa simplificação, especialmente em relação às poropressões, leva a imprecisões no cálculo das forças normais. Contudo, o resultado prático é que o Método de Fellenius tende a ser conservador (fornecendo um Fator de Segurança mais baixo) em comparação com métodos mais complexos, o que é especialmente notável em análises de círculos profundos e sob alta pressão neutra.

2.5.1.3 Método de Bishop Simplificado

O Método de Bishop Simplificado é uma evolução do método original que, por conveniência de cálculo, desconsidera as forças laterais (forças de atrito) entre as fatias. Essa simplificação é aceita na prática da engenharia, pois resulta em um erro de apenas cerca de 1% no valor final do Fator de Segurança (FS) (STEIN et al., 2021). O método assume duas hipóteses centrais: a resultante das forças entre fatias é horizontal e o equilíbrio de forças é imposto na direção vertical. Devido à complexidade da sua equação, o valor do FS é determinado por um processo iterativo. Inicia-se com

um valor arbitrário de FS_0 no lado direito da equação, repetindo-se o cálculo até que os valores de FS se encontrem, garantindo a solução do equilíbrio.

O Método é reconhecido por fornecer resultados de Fator de Segurança (FS) mais precisos e rigorosos, apresentando melhor concordância com métodos mais complexos quando comparado ao Método de Fellenius (PUC-RIO, 2012). Contudo, essa precisão tem limitações, exigindo cautela do projetista. Há registros de que o método pode apresentar problemas e imprecisões quando a superfície de ruptura possui uma inclinação acentuada próxima ao pé do talude, uma vulnerabilidade que se torna mais crítica na análise de círculos de ruptura profundos.

2.5.1.4 Método de Spencer

De acordo com Gerscovich (2025), o método proposto por Spencer (1967) destaca-se na mecânica dos solos por ser uma abordagem rigorosa de cálculo. Diferentemente dos métodos de superfícies planares, que se restringem ao equilíbrio de força e das abordagens circulares pioneiras, que introduzem simplificações para as forças entre as fatias, a formulação de Spencer não negligencia os esforços interlamelares e propõe-se a satisfazer simultaneamente todas as equações de equilíbrio (forças e momentos).

Para solucionar a indeterminação matemática gerada pela diferença entre o número de equações e de incógnitas do sistema, o método introduz a hipótese simplificadora de que as forças entre as fatias atuam sob um ângulo de inclinação constante, denominado $\emptyset$. A formulação garante que, se o somatório dos momentos provenientes das forças externas em relação ao centro de rotação é nulo, o mesmo equilíbrio deve ser refletido pelas forças internas do maciço (GERSCOVICH, 2025).

A aplicação dessa metodologia fundamenta-se em um procedimento iterativo, que pode ser sintetizado na seguinte lógica de cálculo preconizada por Gerscovich (2025):

- Estipula-se uma superfície geométrica de ruptura circular para a análise;
- Assume-se um valor inicial para a inclinação constante das forças interlamelares ($\emptyset$), sendo recomendável adotar um ângulo estritamente menor que a inclinação da face do talude ($\emptyset < \beta$);

- Equaciona-se a força resultante de cada fatia individual, isolando o Fator de Segurança (FS) como a principal incógnita matemática do sistema;
- Determina-se o valor de FS em duas frentes distintas: primeiramente através da equação de equilíbrio de forças e, de forma subsequente, pela equação de equilíbrio de momentos;
- Comparam-se os resultados obtidos. O processo é iterado com novos valores arbitrários para a inclinação ($\emptyset$) até que haja a convergência total do sistema, ou seja, até que os Fatores de Segurança encontrados por ambas as equações sejam perfeitamente idênticos.

Por fim, cabe ressaltar que as ferramentas computacionais avançadas utilizadas na engenharia geotécnica, a exemplo do software *Slide* (utilizado nesta pesquisa), disponibilizam um vasto leque de métodos de equilíbrio limite para análise, permitindo o cálculo do FS por formulações como as de Bishop, Janbu e Morgenstern-Price. Contudo, para compor o escopo desta pesquisa, optou-se por apresentar os preceitos dos métodos pioneiros e aprofundar o referencial teórico estritamente no método de Spencer, uma vez que esta foi a diretriz matemática rigorosa adotada como base para fundamentar todas as simulações e escolhas técnicas do presente trabalho.

2.5.2 Fator de Segurança

Conforme (STEIN et al., 2021), o fator de segurança é definido como:

$FS < 1$ = talude instável;

$FS = 1$ = talude em equilíbrio-limite;

$1 < FS < 1,5$ = talude com estabilidade precária;

$FS \geq 1,5$ = talude estável.

A função primordial do engenheiro encarregado da análise de estabilidade é determinar o Fator de Segurança (FS) do talude. Este índice é definido pela razão entre a resistência média ao cisalhamento do solo disponível e a tensão média de cisalhamento desenvolvida ao longo da superfície potencial de ruptura (DAS; SOBHAN, 2019). A resistência ao cisalhamento do solo, que é a força resistente no cálculo, é composta por dois elementos geotécnicos fundamentais: a coesão e o atrito,

encontrados através dos ensaios de cisalhamento direto, já mencionados anteriormente.

2.6 Estabilização de taludes

A estabilização de taludes engloba o conjunto de intervenções de engenharia aplicadas a maciços terrosos ou rochosos com o objetivo primordial de mitigar o risco de movimentos de massa e garantir a segurança global das infraestruturas. Sob a ótica da mecânica dos solos, o princípio técnico de qualquer método de estabilização consiste em reestabelecer o equilíbrio do sistema, assegurando que a resistência ao cisalhamento mobilizada pelo maciço supere os esforços instabilizantes que propiciam a rutura (CAPUTO; CAPUTO, 2022).

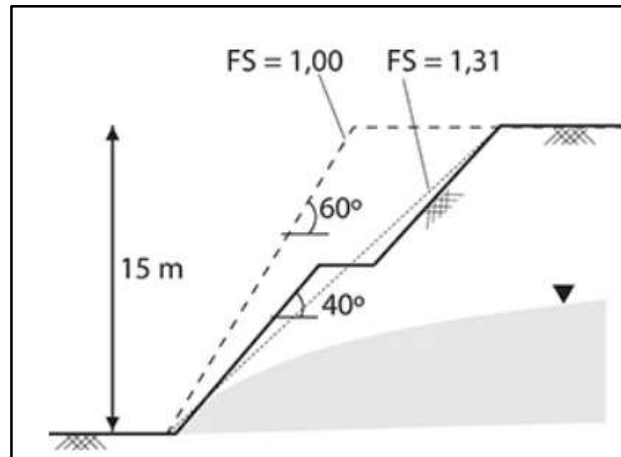
Para atingir este estado de segurança e viabilizar os projetos de engenharia, as soluções geotécnicas atuam essencialmente através de duas abordagens: a adequação topográfica e geométrica da própria encosta para o alívio de tensões, ou a introdução de elementos estruturais concebidos para suportar e transferir os esforços do terreno (STEIN et al., 2021).

2.6.1 Retaludamento

O retaludamento (Figura 17) consiste em uma intervenção de terraplanagem que objetiva alterar a geometria da superfície de taludes instáveis, visando restaurar os requisitos mínimos de estabilidade e drenagem do maciço (STEIN et al., 2021). Essa solução é frequentemente considerada a mais econômica e eficaz para tratar o desequilíbrio, prevenindo movimentos de massa mais severos. O princípio mecânico para o aumento do Fator de Segurança baseia-se na otimização dos momentos estabilizantes e instabilizantes: alivia-se o peso junto à crista (diminuindo o momento atuante) e acrescenta-se peso junto ao pé do talude (gerando um momento resistente) (MASSAD, 2003, *apud* STEIN et al., 2021). Devido à sua clareza e eficácia, o retaludamento também possui uma função de proteção superficial, pois, ao controlar a drenagem e orientar o escoamento, ele reduz a

infiltração de chuva e inibe processos erosivos (GERSCOVICH, 2016, *apud* STEIN et al., 2021).

Figura 17 – Exemplo de solução de retaludamento para estabilização do talude



Fonte: GERSCOVICH, (2025)

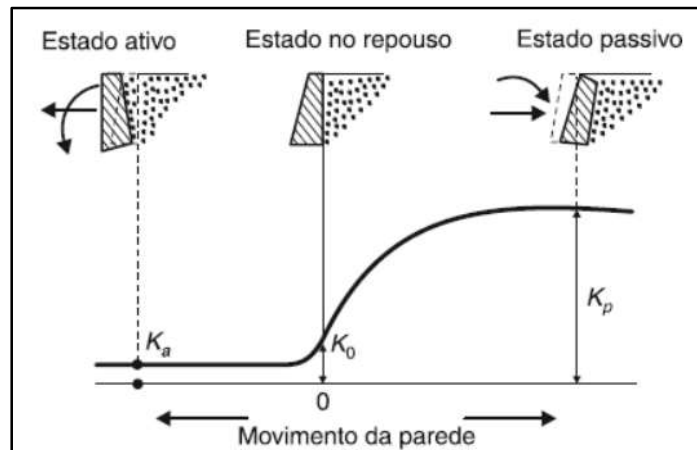
2.7 Empuxos de terra

O empuxo de terra é definido como a resultante da distribuição das tensões horizontais que um maciço de solo exerce sobre as estruturas com ele em contato (GERSCOVICH; SARAMAGO; DANZIGER, 2025). A quantificação da magnitude desse empuxo é fundamental para o dimensionamento de qualquer estrutura de contenção, como muros de arrimo e encontros de pontes. O valor e a distribuição final dessas tensões horizontais dependem intrinsecamente do processo de interação solo-estrutura ao longo das fases construtivas. O mecanismo é dinâmico: o empuxo provoca deslocamentos horizontais na estrutura.

A magnitude das tensões horizontais do solo (empuxos) é diretamente influenciada pelo modo de deslocamento da estrutura de contenção, o que determina o estado de equilíbrio a ser considerado (CAPUTO; CAPUTO, 2022). Essa relação é ilustrada na Figura 12, nela o Empuxo no Repouso (E_0), ocorre em estruturas rígidas que não sofrem deslocamentos laterais significativos (calculado com o coeficiente K_0). Por outro lado, o empuxo que atua sobre a estrutura é classificado em dois estados plásticos, sendo o Empuxo Ativo (E_a) aquele que se manifesta quando a parede se afasta do maciço (distensão do solo), o que provoca a diminuição da tensão horizontal, sendo calculado com o coeficiente K_a . Diz-se que o maciço é ativo, pois empurra o muro, enquanto o Empuxo Passivo (E_p) ocorre quando a parede avança contra o

maciço (compressão do solo), o que resulta no aumento máximo da tensão horizontal, sendo calculado com o coeficiente K_p (Figura 18). Nesse caso, o maciço atua resistindo ao movimento transmitido.

Figura 18 – Tipos de empuxos em função dos deslocamentos do maciço



Fonte: CAPUTO; CAPUTO (2022).

2.8 Tipos de contenção

Em muitas situações de engenharia geotécnica, a simples modificação da geometria do talude (retaludamento) ou aprimoramento da drenagem não são suficientes para resolver problemas de instabilidade, especialmente quando o projeto exige a máxima otimização do espaço para implantação ou quando o maciço precisa suportar carregamentos elevados (como o tráfego rodoviário ou edificações) (STEIN et al., 2021). Nesses casos, a solução requer a utilização de estruturas de contenção, elementos projetados para resistir ativamente aos empuxos do maciço. Embora existam registros milenares de contenções rudimentares (como pedras arrumadas), a área evoluiu significativamente, dispondo atualmente de um amplo conjunto de materiais, técnicas e equipamentos especializados, o que permite sua aplicação em diversas situações complexas da Engenharia Civil.

Tabela 3 – Tipos de Contenção

Aplicação Principal	Tipo de Contenção	Características Principais
Aterro	Muro de Terra Armada	Sistema de solo reforçado com fitas metálicas inextensíveis e face em escamas de concreto.
Aterro	Muro Terrae	Contenção em solo reforçado com geogrelhas e face composta por blocos de concreto pré-moldados.
Aterro	Sistema Terramesh	Estrutura de solo reforçado que utiliza malha hexagonal de dupla torção associada a um paramento frontal em gabião.
Corte	Cortina Atirantada	Estrutura esbelta de concreto armado (ou projetado) ancorada no maciço por tirantes protendidos.
Corte	Parede Diafragma	Painéis de concreto armado moldados no solo antes da escavação do maciço, muito utilizados em subsolos urbanos.
Corte	Solo Grampeado	Sistema de contenção passiva utilizando chumbadores (grampos) instalados no maciço, geralmente com face em concreto projetado.
Mista (Corte e Aterro)	Muro de Gabião	Estrutura de gravidade, flexível e drenante, constituída por gaiolas de tela metálica preenchidas com rochas.
Mista (Corte e Aterro)	Muro de Arrimo por Gravidade	Estruturas massivas em pedra argamassada ou concreto ciclópico, cuja estabilidade provém do próprio peso.

Fonte: Elaboração própria do Autor (2026).

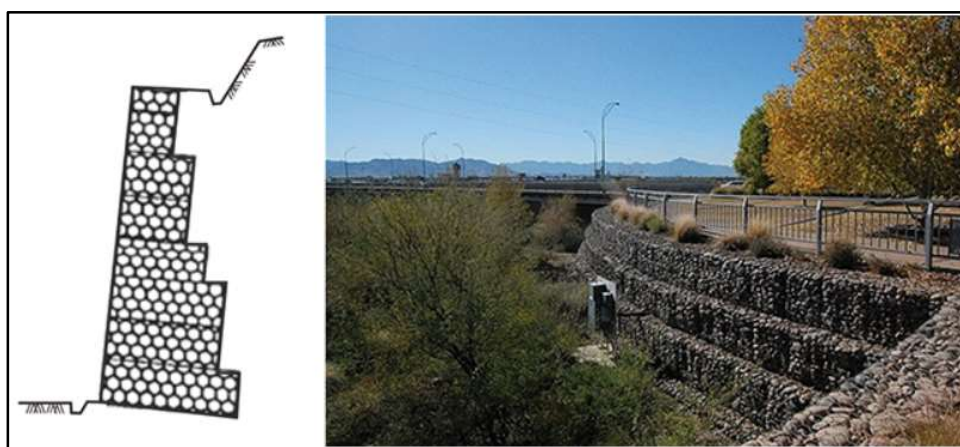
A exemplo dos métodos de investigação de campo e de laboratório, existe uma vasta diversidade de sistemas estruturais concebidos para a contenção de maciços, conforme sintetizado na Tabela 3. Para situações de aterro, destacam-se as soluções em solo reforçado, como os muros de Terra Armada, muros de blocos segmentais (sistema Terrae) e o sistema Terramesh. Já para cenários de escavação e corte, são usuais técnicas ativas e passivas, como as cortinas atirantadas, as paredes diafragma e o solo grampeado. Existem, ainda, soluções de ampla versatilidade que atendem a ambas as condições topográficas, representadas pelos muros de arrimo por gravidade, tais como as estruturas em pedra argamassada e os muros de gabião. Dentre as diversas alternativas estruturais existentes, as subseções a seguir detalharão de forma específica apenas os tipos de contenção e estabilização modelados e avaliados para a obtenção dos dados de projeto desta pesquisa.

2.8.1 Muro de Gabião

Os muros de gabiões são estruturas de contenção construídas com gaiolas metálicas preenchidas com pedras, cuja malha é fabricada com fios de aço galvanizado em dupla torção hexagonal (GERSCOVICH; SARAMAGO; DANZIGER, 2025). Em muros de grande altura, unidades mais baixas (e mais rígidas) devem ser

posicionadas na base para suportar as tensões de compressão mais significativas. A principal vantagem construtiva da dupla torção é a alta resistência mecânica da rede, que preserva a forma e a flexibilidade da malha mesmo sob deformações (Maccaferri, 1990, *apud* GERSCOVICH et al., 2025). Essa flexibilidade, juntamente com a permeabilidade, é a característica essencial do gabião (Figura 19), permitindo que a estrutura acomode recalques diferenciais e dissipe pressões hidrostáticas. O arame é protegido contra intempéries e solos agressivos por galvanização dupla ou revestimento de PVC.

Figura 19 – Muros de gabiões



Fonte: GERSCOVICH; SARAMAGO; DANZIGER, (2025)

2.8.2 Solo Grampeado

O solo grampeado é uma técnica de reforço que insere elementos resistentes à tração (grampos) no maciço, criando um compósito com estabilidade superior (SPRINGER, 2001, *apud* STEIN et al., 2021). Os grampos são formados por barras de aço envoltas em uma injeção de calda de cimento ao longo de todo o seu comprimento, sendo usualmente instalados através de perfuração (pré-furo). A técnica é versátil, podendo ser aplicada em taludes naturais, rochosos ou em escavações. Sua execução em desníveis parciais é obrigatoriamente feita em etapas sucessivas, garantindo a estabilidade em cada fase. Em face dessa característica executiva, o solo grampeado é tecnicamente indicado para maciços que possuam coesão suficiente para se manterem estáveis após as escavações temporárias, antes da efetiva instalação e injeção dos elementos de reforço.

Conforme a norma ABNT NBR 16920-2:2021, o Solo Grampeado é uma técnica de estabilização geotécnica que transforma o maciço terroso em um compósito com características mecânicas aprimoradas através da inserção de reforços resistentes à tração. O sistema é composto por três elementos: o solo, os grampos (metálicos ou poliméricos, que absorvem os esforços de cisalhamento) e o paramento (face de acabamento). A função primária é aumentar a estabilidade do maciço, permitindo que ele suporte cargas superiores e reduza o risco de movimentos de massa.

A importância da técnica em projetos rodoviários reside na sua versatilidade e eficácia para garantir a segurança da via contra deslizamentos e assegurar a durabilidade das contenções sob o efeito de cargas dinâmicas, o que resulta em uma eficiência de custo significativa a longo prazo.

2.9 Normas para projetos em obras de contenção

Do ponto de vista normativo, a definição do risco e do Nível de Segurança do projeto deve seguir as diretrizes da ABNT NBR 11682:2009, enquanto as soluções de reforço, como o solo grampeado, exigem a conformidade com normas específicas, como a NBR 16920-2 (ABNT, 2021), que regulamentam a execução e o dimensionamento desses sistemas. O sucesso do projeto depende, portanto, da integração entre o rigor da modelagem (GERSCOVICH, 2025) e o atendimento aos requisitos de segurança estipulados pelas normas brasileiras.

A modelagem e o cálculo dessas verificações de estabilidade são frequentemente realizados em softwares especializados, como o SLIDE 6.0, que processa a determinação iterativa do FS mínimo, sendo a geometria do talude previamente definida em programas como o Civil 3D.

3 MÉTODO DA PESQUISA

O método utilizado na pesquisa (Figura 20) tem como etapas: a revisão bibliográfica, que apresenta os conceitos fundamentais e a base teórica que sustentam o desenvolvimento do estudo, a coleta de dados para conseguir estimar as camadas de solo através das sondagens, sintetização de tais informações, definição e modelagem das possíveis soluções, a comparação e escolha da solução de contenção e, por fim, a elaboração do projeto básico, acompanhando as quantidades e estimativa de valor global da obra.

Figura 20 – Método de pesquisa



Fonte: Elaboração própria do Autor (2025).

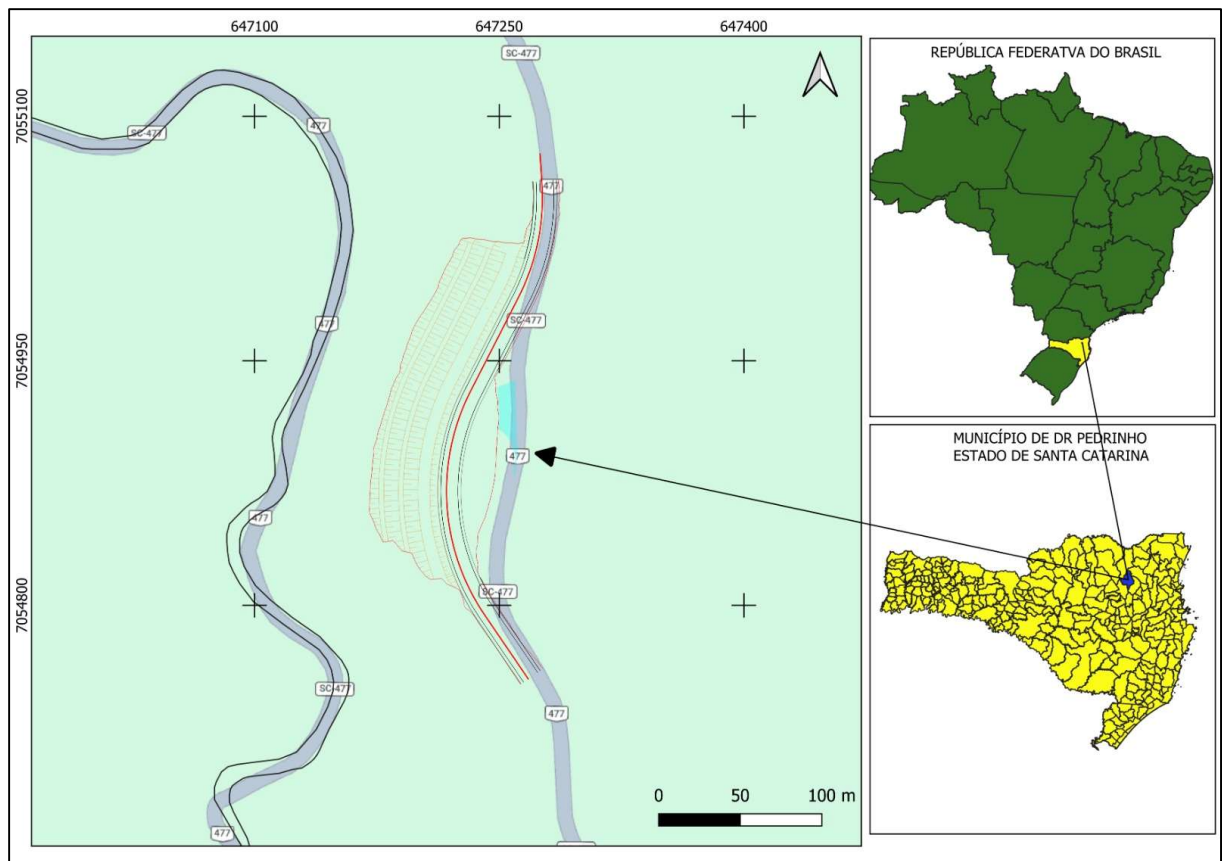
Em consonância com as diretrizes institucionais de ética e integridade acadêmica, declara-se o uso secundário da ferramenta de Inteligência Artificial Gemini (desenvolvida pela Google) na etapa de redação e revisão da escrita do trabalho. A aplicação da referida ferramenta limitou-se estritamente ao aprimoramento e refinamento da linguagem culta e adequação gramatical de trechos previamente elaborados pelo autor, visando elevar a coesão textual e a fluidez dos assuntos técnicos. Destaca-se que todo o conteúdo científico, interpretação de dados, modelagens computacionais e conclusões apresentadas permanecem como fruto do desenvolvimento intelectual autônomo e de autoria exclusiva do pesquisador.

A seguir apresenta-se uma descrição mais detalhada da sequência metodológica utilizada, que envolve desde a definição da modelagem da solução até os resultados obtidos. Mas primeiramente faz-se necessário uma descrição detalhada da área de estudo.

3.1 Descrição do local da obra

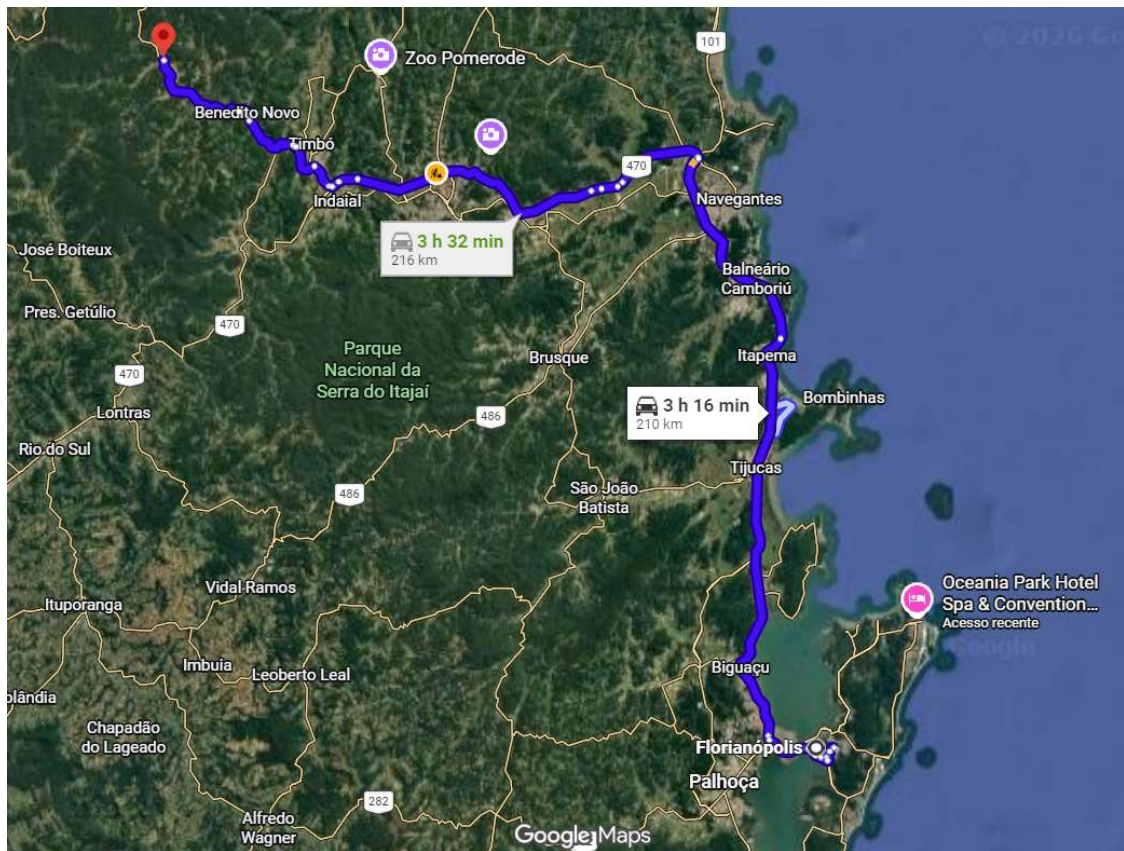
O local do presente estudo (Figura 21) está entre os quilômetros 124 e 139 da Rodovia SC 477 no município de Doutor Pedrinho, na região norte do estado de Santa Catarina a aproximadamente 215 Km de distância da capital Florianópolis (Figura 22), numa cota altimétrica de 740 metros acima do nível do mar.

Figura 21 – Localização do estudo de caso em Santa Catarina



Fonte: Adaptado do software QGIS (2026).

Figura 22 – Distância local de estudo até Florianópolis



Fonte: Adaptado de Google Earth (2026).

O trecho interditado sofreu uma ruptura dia 06/01/2023 acarretando trincas no pavimento da rodovia, fazendo com que o trânsito fosse desviado por uma rua vicinal adjacente. O local continua interditado num período que já contabilizada 3 anos de espera. Até o presente momento o trânsito é desviado pela rua mostrada na Figura 23, trazendo transtornos a quem transita pelo trecho, principalmente em dias de chuva onde ocorrem atoleiros.

Figura 23 – Local da obra de estudo



Fonte: Adaptado de Google Earth (2025).

Na imagem abaixo (Figura 24), é possível observar através de uma imagem aérea, o local da ruptura, onde é possível verificar que já houve movimentação de máquinas no local, inclusive para a coleta de sondagens. É possível ver também o desvio que passa numa cota acima da rodovia SC 477 e o ponto de encontro entre o desvio e a rodovia.

Figura 24 – Local da obra de estudo

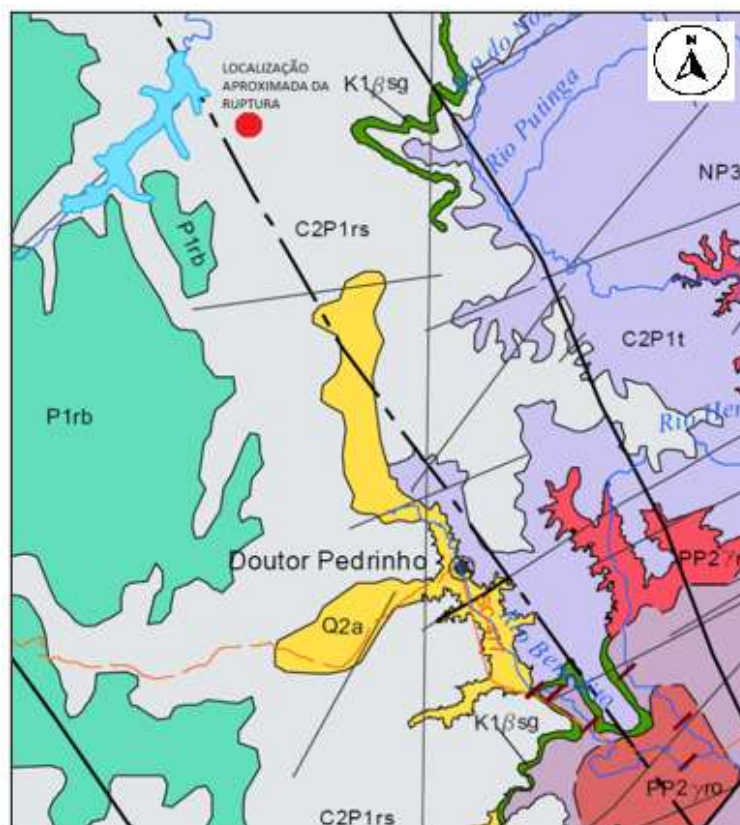


Fonte: Adaptado canal Engenharia & Obras Youtube (2025).

3.1.1 Geologia do local

De acordo com o (Mapa Geológico do Estado de Santa Catarina, 2014), Escala 1:500 000, elaborado pela CPRM, na região da SC-477, no município de Doutor Pedrinho, ocorrem as rochas sedimentares da Formação Rio Bonito, Formação Taciba e Membro Rio do Sul, estando o trecho em estudo assentado sobre as rochas do Membro Rio do Sul (Figura 25).

Figura 25 – Geologia do local de estudo



Fonte: Adaptado RAV ENGENHARIA E GEOTECNIA (2023).

Conforme relatório da RAV ENGENHARIA E GEOTECNIA (2023), a Formação Rio do Sul (C2P1rs), ocorre numa faixa alongada no sentido norte/sul, sendo mais larga no Norte nos municípios de Mafra, Rio Negrinho, São Bento do Sul, Doutor Pedrinho, Presidente Getúlio, Rio do Sul, Aurora, Ituporanga, Alfredo Wagner, Grão Pará, Urussanga, Içara. A porção mais inferior da Formação em Santa Catarina é constituída de folhelhos e argilitos, cinza-escuros a pretos, localmente com aspecto várvido, designados de folhelho Lontras, (Guaraúna no Paraná). Ocorrem diamictitos acinzentados, escuros, com matriz arenosa, que gradam ou intercalam-se com arenitos finos e muito finos, que na área tipo compõem um pacote com cerca de 200 metros de espessura, que por sua vez é recoberto por folhelhos, frequentemente várvidos, ritmitos, argilitos e siltitos, cinza escuros a avermelhados, às vezes com laminação. Esta sequência constitui a parte superior da formação que em conjunto com a inferior, totaliza 350 m de espessura na região de Rio do Sul, onde alcança seu máximo desenvolvimento. O ambiente de deposição desta Formação é interpretado

como essencialmente marinho profundo para a porção basal, onde os sedimentos não foram influenciados por ondas e correntes de marés. A porção superior apresenta características de deposição em áreas rasas, sob influência das marés, e eventualmente, em condições continentais (Mapa Geológico do Estado de Santa Catarina, 2014).

3.2 Sequência metodológica

O programa metodológico adotado neste trabalho foi estruturado de forma cronológica e sistemática, visando garantir a correta avaliação do comportamento do maciço e a definição da solução de engenharia mais adequada. As etapas do desenvolvimento da pesquisa encontram-se descritas a seguir.

3.2.1 Referencial Teórico

A etapa inicial consistiu no levantamento e revisão bibliográfica de conceitos fundamentais da mecânica dos solos e da engenharia geotécnica. Foram consultados livros clássicos, artigos científicos, dissertações e, primordialmente, as diretrizes da norma NBR 11682 (Estabilidade de Encostas) e NBR 16920-2 (Muros e taludes em solos reforçados Parte 2: Solos grampeados). Essa base teórica foi indispensável para embasar o estudo sobre os mecanismos de ruptura, empuxos de terra, comportamento de solos saturados e os métodos de equilíbrio limite (como Bishop e Spencer) que fundamentam os cálculos computacionais.

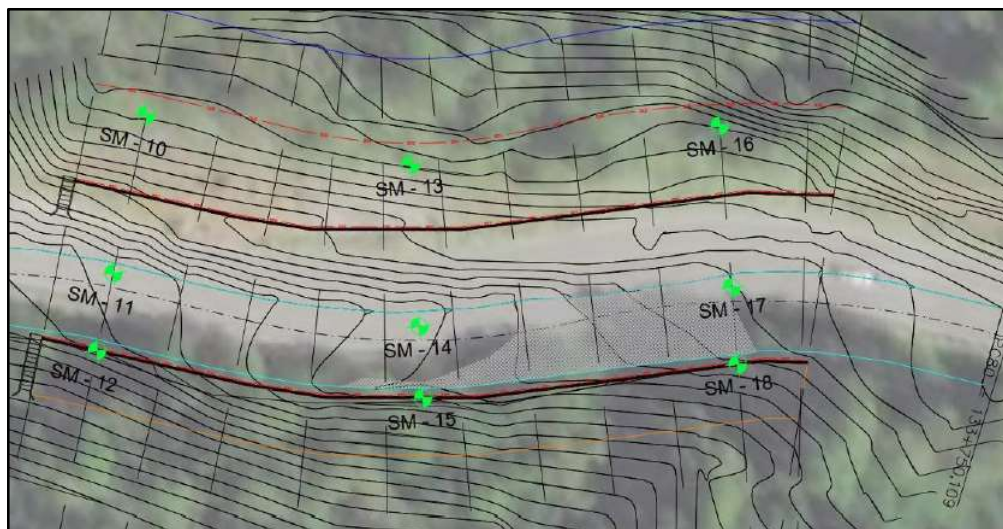
3.2.2 Coleta de Dados

A coleta de dados concentrou-se na busca por informações a respeito do local estudado no trecho da rodovia SC-477, na ruptura do talude. Esta fase envolveu o levantamento do histórico de instabilidades da região, dados geométricos, composto por um levantamento topográfico e um projeto geométrico para adequação do novo traçado da pista. Além disso obteve-se os laudos de sondagens (SM) e ensaios de caracterização (fornecidos por empresa parceira), realizados *in situ* e em laboratório,

essas investigações foram determinantes para identificar a estratigrafia local e delimitar a profundidade e tipo das camadas de solo e o nível do lençol freático.

A campanha de investigações geotécnicas de campo, realizada por empresa parceira que forneceu os dados, foi composta por 09 furos de sondagem mista (SM), localizadas junto a pista, onde ocorreram as trincas e na base do talude escorregado, alinhados transversalmente ao eixo da pista existente (Figura 26).

Figura 26 – Planta de locação furos de sondagens



Fonte: RAV ENGENHARIA E GEOTECNIA (2023).

Além disso, foram realizadas pela empresa que concedeu os dados da pesquisa, investigações de laboratório (ensaio de cisalhamento direto), para levantamento das características geotécnicas do solo. Abaixo, a Figura 27 apresenta a localização dos pontos utilizados para a realização dos ensaios.

Ressalta-se que, por questões de sigilo não serão revelados os nomes das empresas cujos dados são utilizados nesta pesquisa, apenas será mencionado o termo: empresa parceira.

Figura 27 – Posição dos pontos para o ensaio de cisalhamento direto



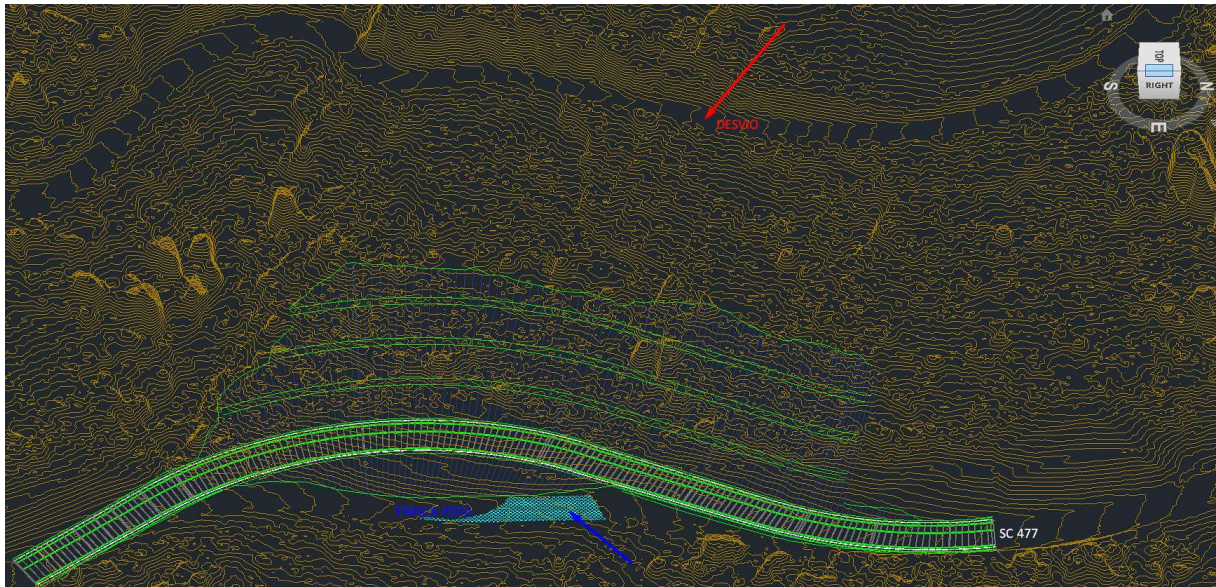
Fonte: RAV ENGENHARIA E GEOTECNIA (2023).

3.2.3 Sintetização e Análise de Dados

Por tratar-se de um estudo de caso, baseado em uma obra de infraestrutura real, a definição dos parâmetros geotécnicos do maciço seguiu as premissas para o local do escorregamento. Desta forma, procedeu-se à análise técnica e à sintetização das informações a partir de dados secundários cedidos pela empresa parceira, os quais integraram o levantamento topográfico, o projeto geométrico, os laudos de sondagem mista e o relatório de ensaios de cisalhamento direto.

Na Figura 28 tem-se a modelagem feita no civil 3D através do levantamento topográfico e projeto geométrico fornecido pela empresa parceira, a fim de viabilizar a montagem das seções transversais, definição da seção crítica e montagem da planta e vista frontal do presente trabalho. Observa-se na parte superior da visualização da modelagem no software, o desvio provisório (seta vermelha) e o novo traçado do projeto geométrico, desviando das trincas na pista existente (seta azul).

Figura 28 – Modelagem da superfície de terreno natural e projeto geométrico (Civil 3D)

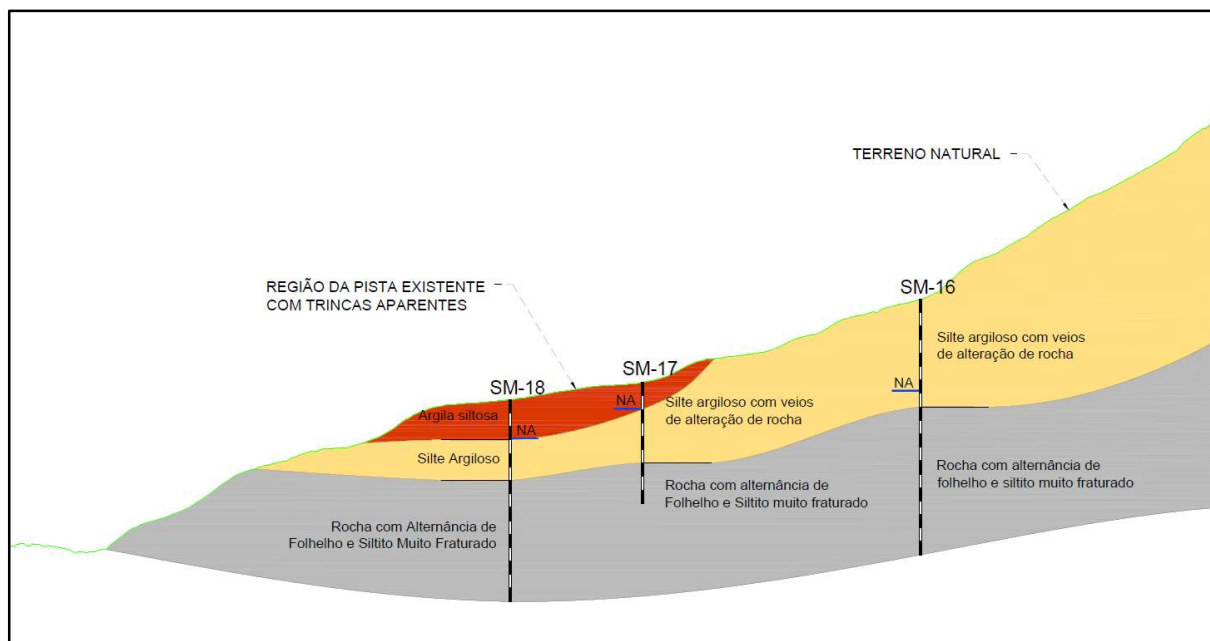


Fonte: Elaboração própria do Autor (2026).

Na Figura 29 é apresentado o perfil geológico-geotécnico da área de estudo, elaborado a partir dos dados de campo do relatório de sondagens mistas (SM) fornecido pela empresa parceira. Para fins de dimensionamento, foi estabelecida uma seção transversal típica que representa a estratigrafia prevalente no trecho de Doutor Pedrinho. Na construção desse perfil considerou-se não apenas a caracterização visual do material contida nos laudos, mas também a variação do número de golpes (SPT) em cada furo de sondagem.

O perfil modelado revela uma variação lateral das camadas: junto ao eixo da rodovia, observam-se tipicamente três camadas (argila, silte e rocha); todavia, à medida que a encosta ganha altitude, a estratigrafia se simplifica, predominando as camadas de silte sobre a rocha. Este modelo preliminar da estratigrafia é essencial para subsidiar a análise de estabilidade e a modelagem das soluções geotécnicas.

Figura 29 – Perfil geotécnico geológico do local de estudo



Fonte: Adaptado RAV ENGENHARIA E GEOTECNIA (2025).

O perfil geológico-geotécnico e a transição entre o solo e o topo rochoso (folhelho) foram mapeados diretamente por meio dos laudos das sondagens mistas. Contudo, devido às limitações intrínsecas dos ensaios de cisalhamento direto em amostrar de forma homogênea todas as camadas, em especial as mais profundas e de transição, fez-se necessária a adoção de correlações técnicas. A partir dos laudos de ensaio de cisalhamento direto adotou-se os parâmetros das envoltórias de ruptura 7 e 8, associados a estimativas empíricas consagradas para os horizontes profundos onde o ensaio não foi exequível.

Assim, para o desenvolvimento das modelagens de estabilidade deste TCC, foram adotados os valores consolidados em estudo existente na região (RAV ENGENHARIA, 2023): o peso específico (γ), a coesão efetiva (c') e o ângulo de atrito interno (ϕ) de cada material, analisados pelos mesmos laudos de sondagem mista e ensaios de cisalhamento direto, assim como visita técnica em campo por engenheiro geotécnico experiente.

Embora tenha-se adotado os parâmetros geotécnicos fornecidos pela empresa parceira, verificou-se a literatura clássica, onde diferentes autores, apresentam correlação do N_{spt} com parâmetros geotécnicos, conforme tabelas e fórmulas que seguem abaixo.

Tabela 4 - Peso específico de solos argilosos

NSPT	Consistência	Peso Específico (kN/m³)
≤ 2	Muito mole	13
3 - 5	Mole	15
6 - 10	Média	17
11 - 19	Rija	19
≥ 20	Dura	21

Fonte: Godoy, 1972

Tabela 5 - Peso específico de solos arenosos

NSPT	Compacidade	γ_{sat}
< 5	Fofa	19
5 - 8	Pouco Compacta	19
9 - 18	Medianamente Compacta	20
19 - 40	Compacta	21
> 40	Muito Compacta	21

Fonte: Godoy, 1972

Tabela 6 - Parâmetros médios dos solos

Tipo de Solo	Faixa de SPT	Modulo de elasticidade (t/m ²)	Peso Específico Natural (t/m ³)	Peso Específico Saturado (t/m ³)	Ângulo de atrito efetivo (φ)	Coesão efetiva (t/m ²)
Areia pouco siltosa/pouco argilosa	0 - 4	2000 - 5000	1,7	1,8	25°	-
Argila porosa vermelha e amarela	6 - 10	1000 - 2000	1,7	1,8	25°	3
Argila porosa vermelha e amarela	≥ 10	2000 - 3000	1,8	1,9	25°	3,0 a 7,0
Argila siltosa pouco arenosa (terciário)	0 - 2	100	1,7	1,8	20°	0,75
Argila siltosa pouco arenosa (terciário)	6 - 10	250 - 500	1,9	1,9	24°	2
Argila siltosa pouco arenosa (terciário)	11 - 19	500 - 1000	1,9	1,9	24°	3
Argila siltosa pouco arenosa (terciário)	20 - 30	3000 - 10000	2	2	25°	4
Argila siltosa pouco arenosa (terciário)	≥ 30	10000 - 15000	2	2	25°	5
Argila arenosa pouco siltosa	0 - 2	500	1,5	1,7	15°	1
Argila arenosa pouco siltosa	3 - 5	500 - 1500	1,7	1,8	15°	2
Argila arenosa pouco siltosa	6 - 10	1500 - 2000	1,8	1,9	18°	3,5
Argila arenosa pouco siltosa	11 - 19	2000 - 3500	1,9	1,9	20°	5
Argila arenosa pouco siltosa	≥ 20	3500 - 5000	2	2	25°	6,5
Silte arenoso pouco argiloso (residual)	5 - 8	8000	1,8	1,9	25°	1,5
Silte arenoso pouco argiloso (residual)	9 - 18	1000	1,9	2	26°	2
Silte arenoso pouco argiloso (residual)	19 - 41	15000	2	2	27°	3
Silte arenoso pouco argiloso (residual)	≥ 41	20000	2,1	2,1	28°	5

Fonte: Adaptado de Joppert Júnior, 2007

Para Teixeira (1996), a estimativa do ângulo de atrito interno é dada por:

$$\varphi' = \sqrt{20 \times N_{spt}} + 15^\circ \quad (1)$$

Tem-se que, cruzando os valores médios de N_{spt} encontrados nos laudos de sondagem (ANEXO-A), e fazendo tais correlações embasadas em literaturas consagradas, comparando juntamente com os parâmetros dispostos nos ensaios de cisalhamento direto (ANEXO-B), mais especificamente as envoltórias 7 e 8, conclui-se que os parâmetros concedidos por empresa parceira, possuem valores que estão dentro de uma faixa coerente, trazendo segurança e confiabilidade em sua utilização nas modelagens de análise de estabilidade. Por esse motivo adotou-se tais valores como referência.

Essa abordagem garante que as simulações no software *Slide* partam de uma base de dados perfeitamente condizente com a realidade prática local, permitindo focar o escopo científico do trabalho na avaliação crítica dos fatores de segurança, no comportamento mecânico dos diferentes tipos de contenção e na proposição de novas soluções de engenharia.

Sendo assim, a estratigrafia do terreno foi modelada com base nos dados de investigação de campo e laboratório, dividindo o perfil em três camadas representativas, conforme os dados geotécnicos fornecidos pela empresa parceira e adotando o critério de resistência de Mohr-Coulomb para os solos. Os parâmetros geotécnicos inseridos constam na Tabela 7:

- **Silte Argiloso:** Camada superior, com peso específico de 17.5 kN/m^3 , coesão efetiva de 14.5 kN/m^2 (kPa) e ângulo de atrito de 32° .
- **Silte com Alteração de Rocha:** Camada intermediária, apresentando peso específico de 18.5 kN/m^3 , coesão de 18 kN/m^2 (kPa) e ângulo de atrito de 35° .
- **Folhelho:** Camada de embasamento, definida com peso específico de 20 kN/m^3 e resistência infinita (*Infinite strength*), o que serve como fronteira rígida impedindo que a superfície de ruptura atravessasse o maciço rochoso.

Tabela 7 - Parâmetros Geotécnicos utilizados nas análises.

Material	Peso Específico (γ)	Coesão (c')	Ângulo de Atrito (ϕ')	Critério de Resistência
Silte Argiloso	17,5 kN/m ³	14,5 kN/m ²	32°	Mohr-Coulomb
Silte com Alteração de Rocha	18,5 kN/m ³	18,0 kN/m ²	35°	Mohr-Coulomb
Folhelho	20,0 kN/m ³	-	-	Resistência Infinita

Fonte: Elaboração própria do Autor (2026).

É importante contextualizar uma aparente discrepância técnica levantada durante as análises: os parâmetros de resistência ao cisalhamento e peso específico adotados pela projetista apresentam-se superiores aos valores médios rasos estimados a partir dos laudos de sondagem e dos ensaios de laboratório. No entanto, essa adoção possui um sólido embasamento executivo. O projeto de contenção prevê um retaludamento que realizará o expurgo de toda a massa instabilizada, intemperizada e de baixa resistência mecânica presente nas camadas superiores. À medida que a escavação avança, o maciço exposto atinge cotas de um solo residual mais competente e confinado, caracterizado por valores de N_{spt} comprovadamente maiores em profundidade. Dessa forma, os parâmetros adotados no software refletem de maneira fiel as propriedades geomecânicas do solo definitivo que restará na encosta pós-obra, e não do material superficial que será descartado.

3.2.4 Definição das possíveis soluções

A partir do diagnóstico das fragilidades do maciço e do entendimento de sua geometria, foram idealizadas as primeiras propostas de intervenção. O processo de triagem considerou a viabilidade executiva frente à geologia e geometria local, selecionando quatro alternativas principais a serem testadas e combinadas para a estabilização do talude: o retaludamento simples, com as inclinações de 45° e 34° (suavização geométrica), o muro de arrimo por gravidade (gabião) e o reforço do maciço via solo grampeado, podendo tanto o muro de gabião quanto o solo grampeado estarem associados ao retaludamento.

3.2.5 Modelagem das soluções

Antes de iniciar as simulações computacionais de estabilidade, foi necessário estruturar-se a geometria tridimensional do terreno e as propostas de intervenção. Para isso, utilizou-se o software da *Autodesk, Civil 3D*, ferramenta indispensável para processar os dados topográficos reais do local. No ambiente do software, projetou-se o um novo traçado do eixo rodoviário da SC-477, cujo alinhamento horizontal foi alterado, com o objetivo estratégico de desviar da trinca manifestada na pista existente, assim como remover parte do material trincado no talude escorregado, diminuindo consequentemente o peso do mesmo.

A partir do modelo digital do terreno e do novo alinhamento (fornecidos pela empresa parceira), foram geradas as seções transversais ao longo do trecho afetado, e a partir de critérios técnicos e de vistoria em campo definiu-se a **seção crítica** a ser analisada, localizada especificamente na **Estaca 133+800**. Os critérios determinantes para a escolha desta seção foram:

- a) **Proximidade com a Trinca Ativa:** Trata-se da seção transversal com maior influência direta e vulnerabilidade em relação à fissura aberta na pista;
- b) **Proximidade com o Desvio Provisório:** É o ponto onde o corpo do talude de corte fica mais próximo da rua vicinal localizada na crista superior, via que atualmente absorve o fluxo de veículos como desvio provisório, tornando a garantia de sua estabilidade um fator de extrema prioridade e risco elevado.

Com a geometria da seção crítica (Estaca 133+800) consolidada e exportada do Civil 3D, os dados foram introduzidos no software *Slide*. Nesta fase de modelagem geotécnica, o perfil topográfico e os elementos das estruturas de contenção foram submetidos às condições piezométricas locais. A presença da água no maciço foi representada de forma direta pela inserção da linha do Nível d'água (*Water Surface*), mapeada e transposta a partir dos laudos das sondagens mistas realizadas no local, sendo estimada sua altura somente na porção superior onde não havia pontos de sondagem. Essa configuração permitiu ao software simular com mais

precisão a redução da tensão efetiva e o efeito deletério causado pela saturação natural das camadas.

Por fim, o algoritmo processou as superfícies de ruptura potenciais através de métodos de equilíbrio limite para determinar os respectivos Fatores de Segurança globais de cada cenário, adotando-se o nível alto de segurança contra danos a vidas humanas, assim como nível alto para segurança contra danos materiais e ambientais (conforme descrito na Figura 15), esta escolha se justifica pelo fato de já ter havido um escorregamento em fase de obra da rodovia, assim como a proximidade com o desvio na parte superior, que permite a passagem de veículos, chegando como referência a um fator de segurança de no mínimo 1,50.

Foi adotado como base de cálculo o método de Spencer. Tal método, mais rigoroso, é indispensável para este estudo, uma vez que a interação do maciço com estruturas de contenção, como o solo grampeado, induz um possível desenvolvimento de superfícies de ruptura não circulares e compostas.

3.2.6 Comparação e escolha entre as soluções

Os resultados obtidos nas simulações computacionais de estabilidade e as análises geométricas foram confrontados diretamente com as exigências normativas vigentes para a definição da intervenção definitiva na Estaca 133+800. Por se tratar de um estudo de caráter científico e acadêmico, o aspecto técnico e a garantia da segurança global do maciço exerceram peso soberano sobre a análise financeira, eliminando a necessidade de um processo comparativo puramente orçamentista. A triagem e a escolha da solução final estruturaram-se a partir dos seguintes critérios:

- a) **Aspecto Técnico:** A capacidade da estrutura em atingir o Fator de Segurança mínimo exigido por norma para garantir a estabilidade global de longo prazo, com menor área de projeção e mantendo a pista na parte superior que hoje é utilizada como desvio;
- b) **Aspecto Econômico:** Diante do cenário onde apenas uma única alternativa mostrou-se tecnicamente viável e normativamente aceita, a comparação econômica entre soluções tornou-se dispensável como

fator de escolha. Uma análise orçamentária comparativa detalhada demandaria recursos hábeis e ensaios específicos para avaliar, por exemplo, se a redução no comprimento dos grampos compensaria financeiramente a introdução de um muro de gabião na base, mantendo a estabilidade estável.

Sendo assim, o aspecto econômico foi direcionado exclusivamente para a elaboração de um orçamento do tipo detalhado para a solução adotada (solo grampeado com retaludamento), com o intuito de mostrar apenas um custo global da obra. Para isso, o levantamento dos quantitativos geométricos seguiu critérios distintos conforme a natureza do elemento: os volumes de medição dos serviços mensurados em metros cúbicos (m^3) foram calculados diretamente com base no diagrama de áreas das seções transversais do projeto, enquanto os parâmetros quantificados em metros quadrados (m^2) foram extraídos a partir da projeção em vista frontal da geometria espacial de cada estrutura. Sobre essa matriz de quantitativos, aplicaram-se as composições e os custos unitários diretos do Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO) gerido pelo DNIT, que é o referencial padrão para obras de infraestrutura de transportes, isolando-se as despesas de serviços com o único objetivo de apresentar uma estimativa de custo de construção da intervenção geotécnica proposta para a rodovia SC-477.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo destina-se à apresentação e à análise crítica dos resultados obtidos por meio das modelagens geométricas e das simulações computacionais, servindo como embasamento técnico para a escolha da solução definitiva de estabilização do trecho da Rodovia SC-477. O processo de avaliação seguiu uma abordagem metodológica evolutiva, partindo do tratamento do projeto viário topográfico até a validação geotécnica final.

Para dar início às análises de estabilidade do maciço, a etapa preliminar consistiu na definição de um eixo em planta no software *Autodesk Civil 3D*, adotando como referência inicial o eixo da pista existente. Contudo, conforme abordado na delimitação do problema, procedeu-se a uma alteração estratégica no traçado horizontal da rodovia (identificado no projeto viário). O objetivo dessa adequação foi afastar a faixa de rolamento e a futura estrutura de contenção da zona de influência da trinca na pista provocada pela ruptura da encosta.

A partir desse eixo adaptado e dos dados do levantamento topográfico de campo, gerou-se as seções transversais do terreno, permitindo a compreensão detalhada da geometria espacial do talude e a formatação das diretrizes de intervenção. O passo seguinte consistiu na determinação da seção crítica que fundamentaria as análises no software *Slide*. A seleção foi balizada por duas premissas estruturais de risco: a maior proximidade com a trinca ativa na pista e a distância mínima em relação à rua vicinal adjacente, localizada na crista do talude superior e atualmente utilizada como desvio provisório de tráfego. O cruzamento dessas condicionantes estabeleceu a seção localizada na Estaca 133+800 como o perfil crítico a ser estudado.

Com a modelagem topográfica concluída, os perfis resultantes foram sucessivamente exportados para o software *Slide*. Neste ambiente, os diferentes cenários e propostas de contenção foram submetidos a métodos de equilíbrio limite para a obtenção de seus respectivos Fatores de Segurança (FS), verificando o atendimento ao limite mínimo global normativo de 1,50 (NBR 11682), conforme discutido nos subtópicos a seguir.

4.1 Análise 01: Retaludamento com inclinação 1:1

Tendo a seção crítica consolidada no ambiente do *Civil 3D*, desenvolveu-se a primeira diretriz de projeto geométrico: o delineamento de um retaludamento com inclinação de 1:1 (45°). O traçado da escavação tomou como ponto de partida inferior, a distância de folga de terraplenagem da rodovia, localizada a um metro do bordo de acostamento da pista. A partir dessa origem, estabeleceram-se cortes escalonados com altura máxima de 6,00 metros, intercalados por banquetas horizontais de 3,00 metros de largura, dimensão operacional dimensionada estritamente para viabilizar o trânsito e a operação segura dos equipamentos pesados durante a fase de escavação. Essa projeção geométrica desenvolveu-se de forma ascendente, repetindo o padrão até a completa interceptação com a cota do terreno natural, conforme a Figura 30.

Figura 30 – Retaludamento 1:1 (Seção crítica – Civil 3D)

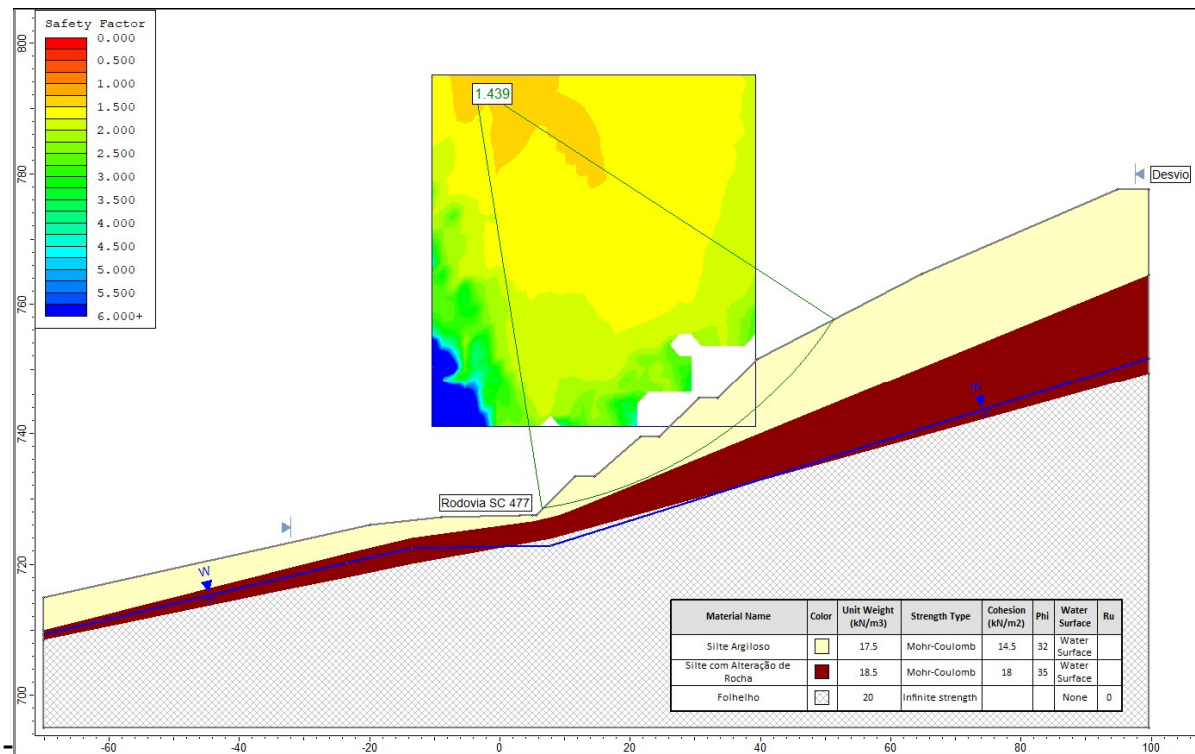


Fonte: Elaboração própria do Autor (2026).

A primeira etapa da modelagem computacional, realizada através do software *Slide*, (Figura 31) consistiu na avaliação da estabilidade do maciço considerando a geometria da primeira alternativa proposta para o trecho da SC-477:

o retaludamento simples, com um corte 1:1. O objetivo desta simulação foi verificar se a suavização geométrica do talude, de forma isolada, seria suficiente para garantir a segurança global da via.

Figura 31 - Retaludamento 1:1 com FS=1.439 (SLIDE)



Fonte: Elaboração própria do Autor (2026).

Como mostrado na Figura 31, a provável superfície de ruptura está contida na primeira camada do solo (silte argiloso). A saída gráfica do programa apresenta uma escala de cores (mapa de calor) referente aos Fatores de Segurança (FS) calculados para as diversas superfícies de deslizamento iteradas pelo método de equilíbrio limite escolhido (Spencer). Nesta escala, que varia de 0.000 a superiores a 6.000, as zonas com cores mais quentes indicam menor estabilidade, com o software identificando automaticamente a provável superfície crítica de ruptura.

Para garantir a confiabilidade da análise global, foram definidos limites (*Slope Limit*). No modelo, essas restrições são indicadas pelas setas posicionadas na superfície do terreno, abrangendo desde a base inferior, localizada antes da cota da Rodovia SC-477, até a crista do corte superior, na região denominada como "Desvio".

Essa configuração instrui o algoritmo a processar o escorregamento de todo o maciço, evitando que a análise se restrinja a instabilidades locais e superficiais que não comprometeriam a rodovia como um todo.

Ao processar o modelo combinando a geometria do retaludamento, as resistências das camadas e a inserção do nível d'água, a superfície crítica de ruptura resultou em um Fator de Segurança global de **FS = 1.439**. De acordo com as diretrizes da NBR 11682 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009), este valor não atende aos requisitos mínimos exigidos para assegurar a estabilidade de taludes definitivos em condições de risco elevado.

Portanto, conclui-se que a adoção exclusiva do retaludamento para este trecho da SC-477 não é tecnicamente viável. O maciço não mobiliza resistência ao cisalhamento suficiente frente à geometria proposta e à presença de água, evidenciando a necessidade imprescindível de se adotar soluções complementares, como a inserção de elementos estruturais de contenção ou reforço (solo grampeado ou muros de gabião).

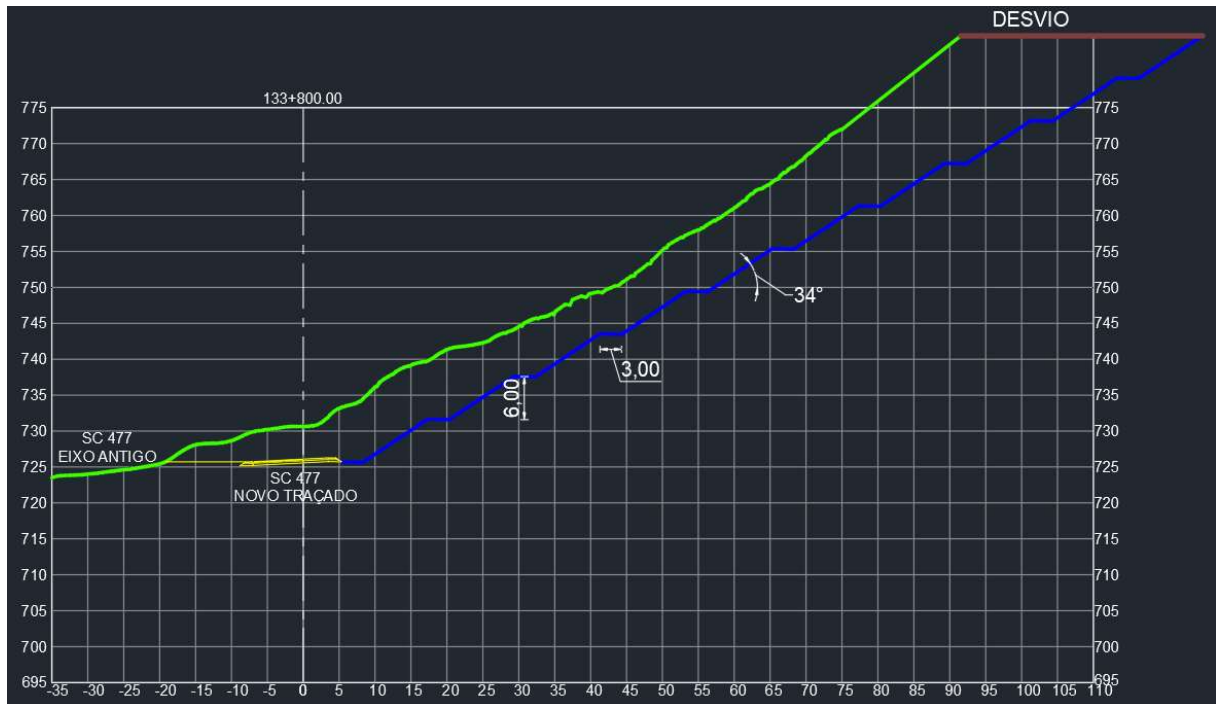
4.2 Análise 02: Retaludamento com inclinação 1:1,5

Diante da insuficiência técnica do primeiro cenário, buscou-se antes de partir-se para uma solução estrutural, suavizar ainda mais a inclinação do corte através da proposição de um retaludamento na proporção de 1:1,5 (aproximadamente 34°). Teoricamente, a redução do ângulo de inclinação incrementaria a estabilidade ao reduzir os esforços atuantes e aumentar a normal na superfície de falha. No entanto, esta alternativa foi descartada sumariamente ainda na fase de projeto geométrico dentro do software *Autodesk Civil 3D*.

Ao projetar a linha de corte com a inclinação de 1:1,5 a partir do pé do talude, o modelo digital de terreno demonstrou que a saia do corte avançaria excessivamente em direção ao topo do talude, conforme a Figura 32. Essa invasão geométrica geraria uma quantidade impraticável de banquetas de corte intermediárias e, de forma crítica, atingiria a faixa de domínio da rua vicinal superior. Como essa via atualmente opera como desvio provisório e absorve o fluxo de veículos da rodovia principal, a execução deste retaludamento destruiria a única rota trafegável do local.

Portanto, a alternativa de retaludamento 1:1,5 isolado foi classificada como geometricamente inviável e não exequível.

Figura 32 - Retaludamento 1:1,5 (Seção crítica – Civil 3D)

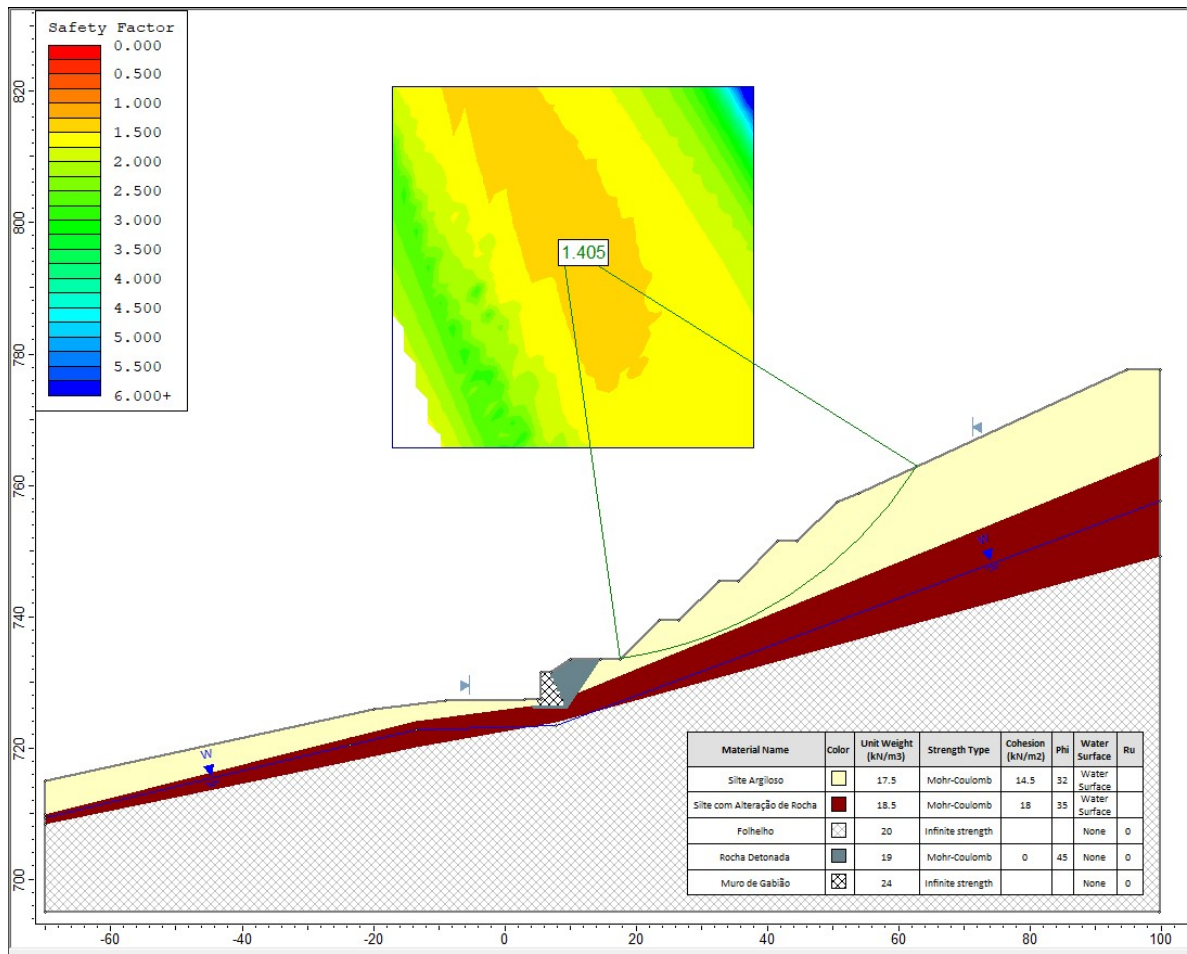


Fonte: Elaboração própria do Autor (2026).

4.3 Análise 03: Muro de Gabião + Retaludamento com inclinação 1:1,5

Buscando conciliar a viabilidade geométrica com o incremento da força resistente, a terceira abordagem avaliou a inserção de uma estrutura rígida por gravidade no pé do talude. Projetou-se um muro de gabião na base associado a um retaludamento de 1:1,5 partindo do topo da estrutura em direção à crista. A escolha da inclinação de 1:1,5 para o talude de montante justificou-se pelo fato de o retaludamento 1:1 anterior ter falhado globalmente, exigindo um ângulo de corte mais suave para o solo que ficaria acima da contenção.

Figura 33 – Gabião + Talude 1:1,5 com FS=1.405 (SLIDE)



Fonte: Elaboração própria do Autor (2026).

A análise de estabilidade foi dividida em duas etapas: o equilíbrio global do conjunto e o equilíbrio individual do talude remanescente. Os resultados no *Slide* apontaram que a introdução do muro de gabião funcionou como uma barreira de peso eficaz contra o empuxo ativo inicial, elevando o Fator de Segurança em comparação ao Cenário 1. Todavia, a massa de solo localizada acima do topo do gabião continuou a manifestar superfícies de escorregamento profundas devido à influência do nível d'água. O sistema combinado gabião-retaludamento atingiu um **FS inferior a 1,5** conforme a Figura 33, sendo reprovado pelo critério normativo técnico por não garantir a estabilidade permanente da encosta de montante.

4.4 Análise 04: Solo Grampeado + Retaludamento com inclinação 1:1,5 (Solução adotada em projeto)

A alternativa final e definitiva consistiu na associação de um sistema de contenção por solo grampeado na porção superior do maciço a um retaludamento com inclinação de 1:1,5 (aproximadamente 34°) posicionado na base da encosta. Para a conformação da estrutura de contenção no topo, projetou-se a face de corte do solo grampeado com uma altura total de 12 metros, na seção crítica escolhida, e inclinação de 60° em relação ao plano horizontal.

Sob o ponto de vista mecânico, o solo grampeado atua como um sistema de contenção e reforço de natureza passiva, ou seja, a mobilização da sua resistência à tração e ao cisalhamento ocorre à medida que a massa de solo sofre pequenas deformações. O arranjo estrutural interno foi dimensionado com a inserção de **9 linhas de grampos** inclinadas a 15° em relação ao eixo X (horizontal). Para otimizar a ancoragem além da zona crítica de falha, os comprimentos das barras foram escalonados, partindo de 10 metros nas linhas inferiores da contenção e atingindo até 16 metros nas linhas superiores, atravessando as camadas instáveis de Silte Argiloso e Silte com Alteração de Rocha.

Ainda sobre o dimensionamento da contenção em solo grampeado é importante salientar algumas premissas de projeto que permitiram dar início a montagem dos parâmetros de dimensionamento utilizados. De acordo com Franco (2010) os dados geométricos praticados no Brasil partem do seguinte princípio:

- Inclinação do talude: 50° a 90°
- Altura da obra: 3 m a 30 m
- Espaçamento: 1,0 m a 2,5 m
- Diâmetro do aço: 12,5 mm a 32 mm
- Espessura da parede: 50 mm a 150 mm
- Diâmetro do furo: 75 mm a 100 mm
- Comprimento do Grampo: 3 m a 24 m
- Inclinação do Grampo: 10° a 35°

Com base nos parâmetros citados acima definiu-se um espaçamento entre os grampos de 1,50 m, e para a determinação da Carga de trabalho (F_t), calculou-se através do produto da tensão admissível do aço e a área de contato da barra (equação 02), chegando a um valor de 121 kN conforme a equação 6:

O cálculo do diâmetro efetivo da barra considerou uma espessura de sacrifício de 0,60 mm, visando uma vida útil de projeto de 50 anos. Contudo, devido ao regime pluviométrico intenso característico do estado de Santa Catarina, além da espessura de sacrifício, recomenda-se que as barras recebam proteção anticorrosiva adicional, como dupla proteção com bainha plástica corrugada e injeção de calda de cimento, ou galvanização/pintura epóxi, para assegurar a durabilidade normativa.

Tabela 8 – Redução por corrosão superficial de armação de aço em função do meio e vida útil – Espessura de sacrifício

Dimensões em milímetros

Meio	Tipo de solo	Vida útil		
		5 anos	25 anos	50 anos
Não agressivo	Solos naturais inalterados	0	0,30	0,60
	Aterros compactados (areia, silte, argila etc.)	0,09	0,35	0,60
	Aterros não compactados (areia, silte, argila etc.)	0,18	0,70	1,20

Fonte: ABNT NBR 16920-2:2021.

$$F_t = \sigma_{adm} \cdot A \rightarrow F_t = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \cdot A \quad (2)$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (3)$$

$$D = \phi_{barra} - 2 \cdot esp. sacrif \quad (4)$$

$$D = 20 - 2 \cdot 0,60 = 18,8 \text{ mm} \quad (5)$$

$$F_t = \frac{500 \text{ MPa}}{1,15} \cdot \frac{\pi \cdot 0,0188^2}{4} = 0,12069 \text{ MN} = 121 \text{ kN} \quad (6)$$

Com a carga de trabalho definida fez-se necessário estabelecer a resistência ao cisalhamento entre o solo e grampo utilizado a ser adotado. A resistência ao cisalhamento no contato solo-grampo (q_s) rege a estabilidade interna

do sistema de solo grampeado e é comumente calibrada *in situ* através de ensaios de arrancamento. Como não houve acesso aos resultados desses ensaios de campo para o trecho em estudo, considerou-se uma perfuração rotativa e a camada de solo de silte argiloso, chegando a uma faixa de valor entre 30 e 50 kPa, conforme (Figura 34), cruzando os valores recomendados pela literatura com o tipo de solo predominante identificado nos laudos de sondagem do local.

Figura 34 – Resistencia ao cisalhamento no contato solo grampo (QS)

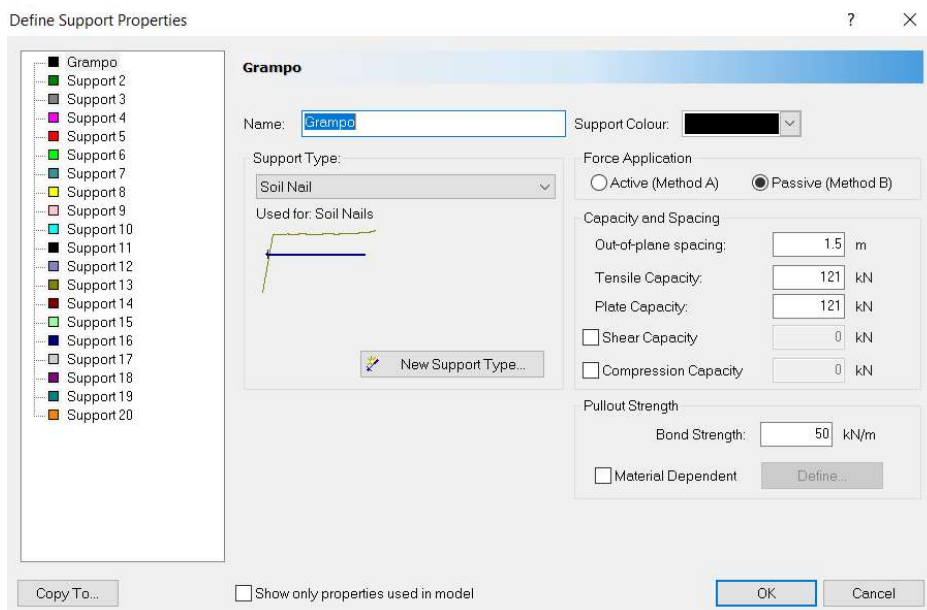
Material	Método Construtivo	Material Tipo de Solo/Rocha	qs (kPa)
solos coesivos	perfuração rotativa	areia/pedregulho	100-180
		silte arenoso	100-150
		Silte	60-75
		solo residual	40-120
		colúvio (+ finos)	75-150
	grampos cravados	areia/pedregulho (pequeno) cobrimento)	190-240
		areia/pedregulho (elevado) cobrimento)	280-430
		Colúvio	100-180
	perfuração a trado	silte arenoso (aterro)	20-40
		silte arenoso	55-90
		silte argilo-arenoso	60-140
	"jet grouting"	Areia	380
areia/pedregulhos		700	
solos granulares/ finos	perfuração rotativa	silte argiloso	35-50
	Grampos cravados	areia siltosa	90-140
		"loess"	25-75
	perfuração a trado	argila mole	20-30
		argila rija	40-60
		silte argiloso rijo	40-60
		areia argilosa (calcárea)	90-140

Franco (2010).

Fonte: FRANCO (2010).

Com os valores de carga de trabalho (121 kN) e resistência ao cisalhamento no contato solo grampo (50 kN/m), entrou-se com tais parâmetros no software (Figura 35).

Figura 35 – Dimensionamento dos Grampos (SLIDE)



Fonte: Elaboração própria do Autor (2026).

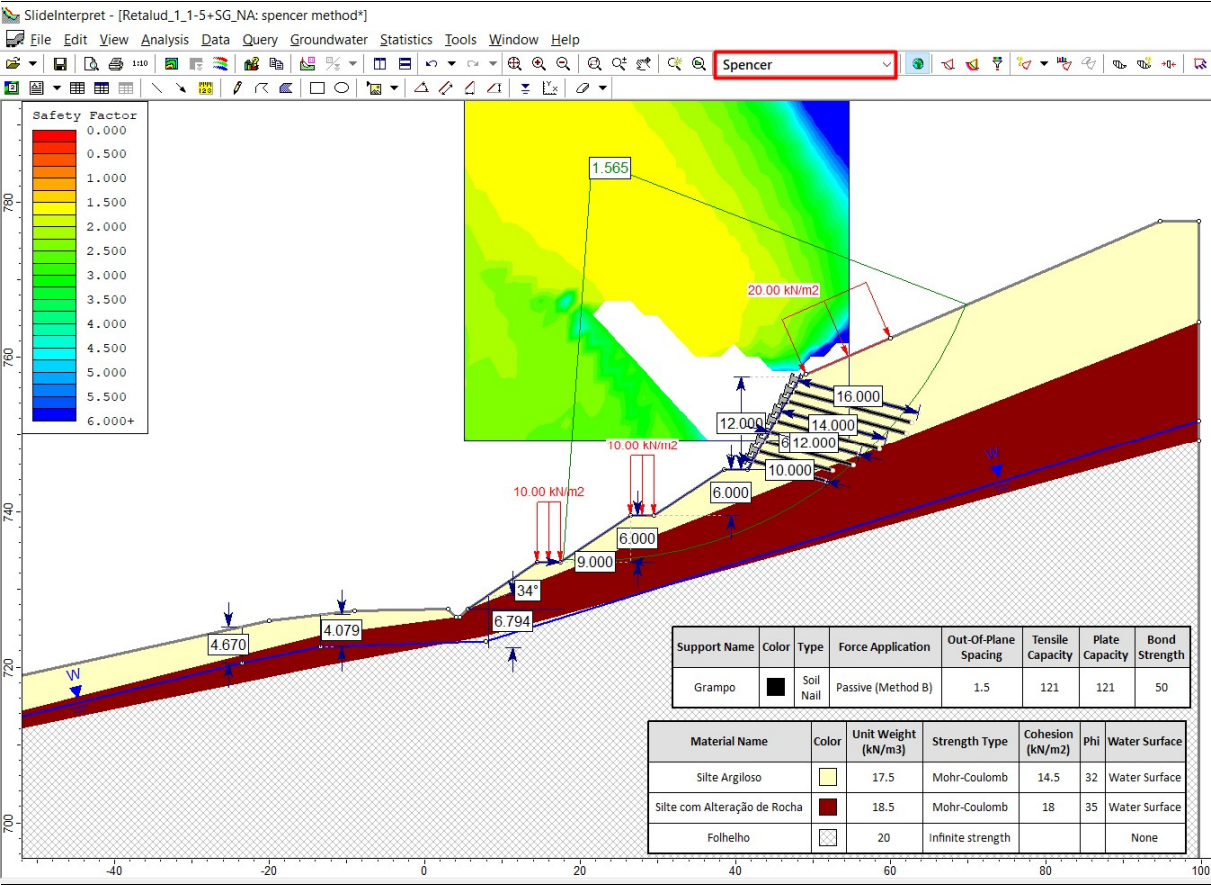
De modo a garantir a estabilidade local da face escavada e promover o confinamento adequado das tensões, a solução contempla o revestimento da face com **concreto projetado de 10 cm de espessura**. Adicionalmente, tendo em vista o histórico de precipitações recorrentes na região e o já comprovado efeito deletério da saturação no solo local, incorporou-se um sistema de drenagem superficial. O projeto prevê a implantação de sarjetas longitudinais no pé do retaludamento e de uma vala de proteção de corte na crista do solo grampeado, além de drenos sub-horizontais nos taludes e na parede do solo grampeado, garantindo a condução segura das águas pluviais e mitigando processos erosivos e de infiltração.

Para a validação computacional no software *Slide*, a modelagem seguiu uma premissa de dupla verificação. Em um primeiro momento, procedeu-se à **análise global** do maciço (avaliando o conjunto Solo Grampeado superior + Retaludamento inferior). Na sequência, realizaram-se **análises individuais** de cada maciço contido, utilizando as restrições da ferramenta (*Search Limits*) do programa. Essa estratégia metodológica permitiu avaliar isoladamente tanto a estabilidade intrínseca da contenção no topo quanto a do retaludamento na base. A premissa adotada é de que a garantia da estabilização individual de cada elemento é condição fundamental para assegurar a estabilização sistêmica do todo.

Para conferir o máximo rigor normativo, a análise global considerou a imposição simultânea de duas sobrecargas:

- c) **Sobrecarga Permanente de Topo:** Aplicação de uma carga linear de 20 kN/m² sobre a crista do talude grampeado, em cumprimento aos parâmetros estipulados pelo item 7.3.3 da norma NBR 16920-2.
- d) **Sobrecarga Transitória de Execução:** Inserção de uma carga de 10 kN/m² distribuída nas duas primeiras banquetas do retaludamento inferior, simulando o trânsito e a operação de maquinário pesado durante a fase construtiva.

Figura 36 – Análise Global
(Retaludamento + SG) com FS=1.565

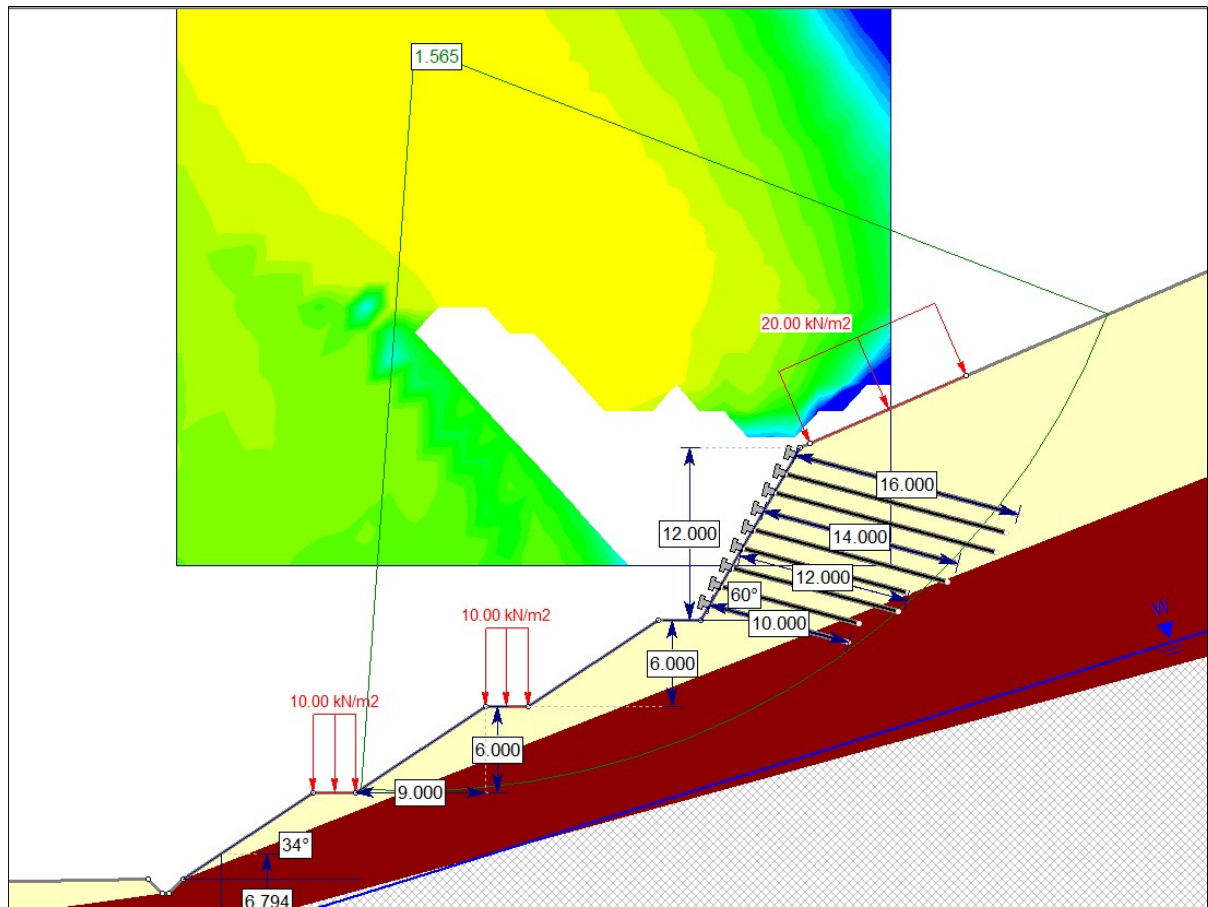


Fonte: Adaptado Software Slide (2026).

Mesmo sob a atuação destas sobrecargas e da linha de nível d'água projetada conforme a altura verificada junto aos laudos de sondagem, o modelo computacional obteve pleno sucesso. O Fator de Segurança global alcançou **FS =**

1,565 (Figura 36). Por ultrapassar o limite mínimo de 1,5 exigido pela NBR 11682 e pelas verificações individuais atestarem a segurança das estruturas isoladas, esta alternativa consagrou-se como a solução tecnicamente viável dentre as que foram testadas.

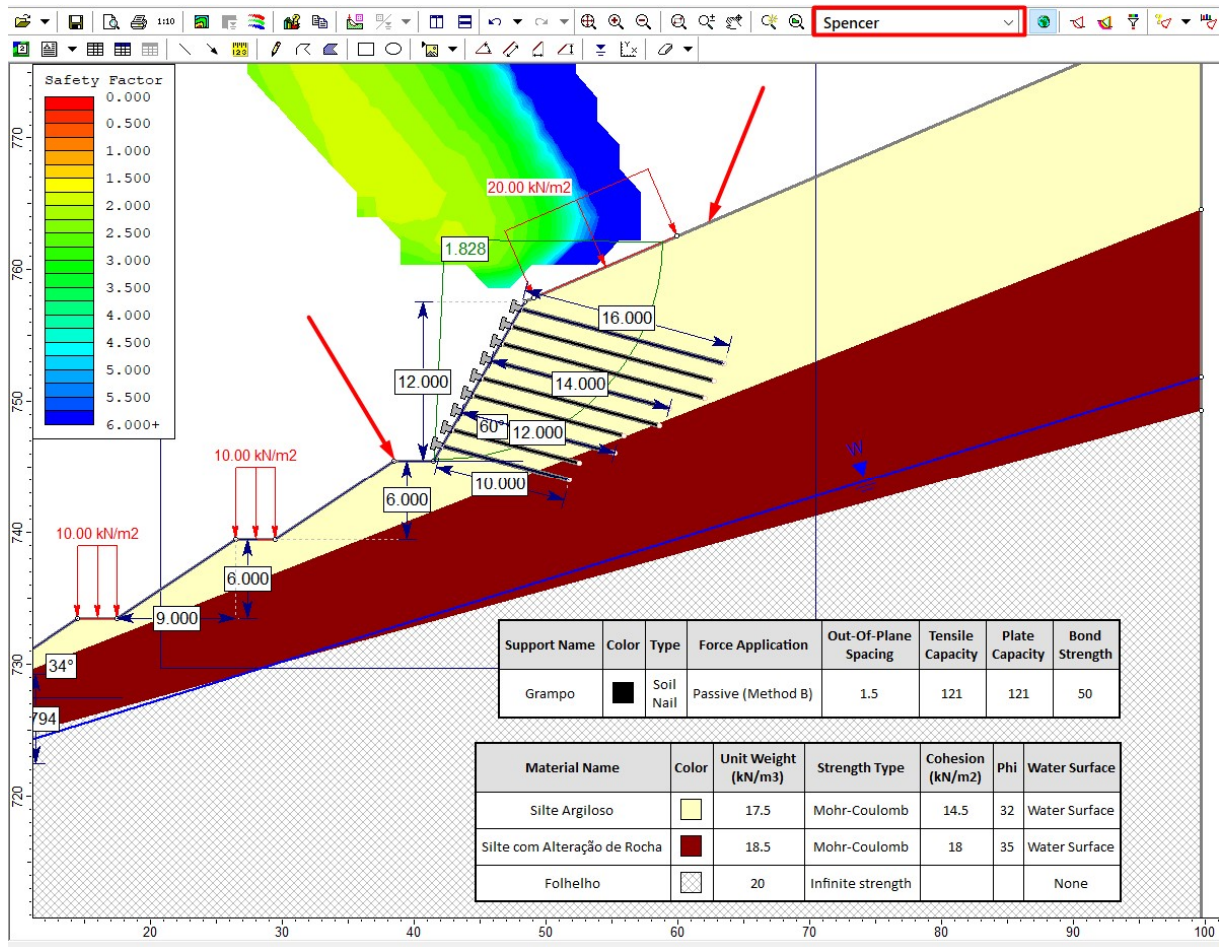
**Figura 37 – Análise Global
(Retaludamento + SG) com FS=1.565**



Fonte: Adaptado Software Slide (2026).

De modo a garantir a estabilidade isolada tanto do solo grampeado quanto do retaludamento fez-se a análise individual de cada elemento, restringindo-se as análises na área de atuação da provável superfície de ruptura, através dos limites adotados para a análise do software, conforme as Figura 38 e Figura 39.

Figura 38 – Análise individual do solo grampeado

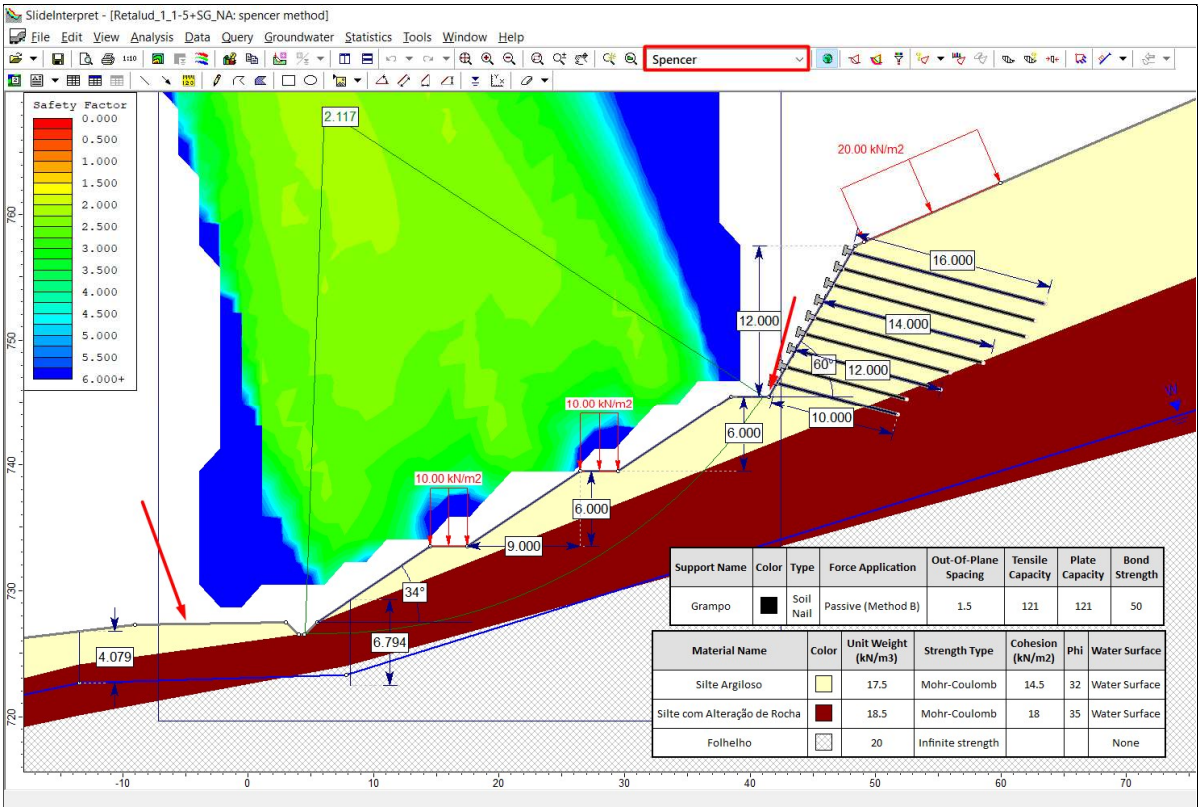


Fonte: Adaptado Software Slide (2026).

Utilizando-se dos mesmos parâmetros geotécnicos apresentados nas análises globais anteriores, alterou-se somente a região dos limites (setas vermelhas) de cálculo para restringir a análise somente na região do solo grampeado (Figura 38), com o intuito de demonstra-se que o paramento por si só é robusto. Nesta análise chegou-se a um Fator de segurança de 1,828, atendendo a norma.

De mesmo modo, realizou-se a análise do retaludamento de forma isolada, restringindo-se a partir da pista projetada na parte inferior até a base da parede do solo grampeado como mostrado através das setas vermelhas na Figura 39. garantindo assim a estabilidade da solução com um fator de segurança de 2,117, mais uma vez atendendo a norma de estabilidade de taludes.

Figura 39 - Análise individual Talude 1:1,5



Fonte: Adaptado Software Slide (2026).

Dado o êxito técnico e a garantia de estabilidade permanente do trecho, o solo grampeado no topo associado ao retaludamento na base foi definido como a solução final do projeto. Conforme fundamentado metodologicamente no item de "Comparação e Escolha entre as Soluções" (item 3.2.6), o aspecto técnico possui caráter prioritário e eliminatório neste estudo acadêmico, tornando dispensável uma comparação econômica com propostas tecnicamente ineficazes ou propositalmente redundantes.

Sendo assim, visando complementar a viabilidade executiva da intervenção proposta, será apresentada uma estimativa de custo global elaborado com base no SICRO, com o intuito exclusivo de demonstrar uma estimativa de custo de construção desta estrutura.

Por fim, com o intuito de materializar todas as geometrias, elementos de drenagem e especificações aqui testadas, disponibilizando-se no APÊNDICE A o Projeto Básico da solução escolhida.

4.5 Projeto da Obra de CONTENÇÃO: Solo Grampeado + Retaludamento com inclinação 1:1,5 e estimativa de custo

A partir das análises de estabilidade e verificação do FS no software Slide determinou-se a adoção da solução de contenção através do Projeto Básico de um Solo Grampeado na parte superior do talude e um retaludamento com inclinação 1:1,5 partindo da base. Diante da escolha da solução viável foi elaborado um Projeto Básico composto por três pranchas tamanho A1 e escalas indicadas, contendo Planta (GT-01), vista frontal (GT-02) e três seções tipo (GT-03), que são apresentados no (APENDICE A) do referente trabalho de conclusão de curso.

Juntamente a este projeto apresenta-se as quantidades que deram origem ao custo unitário de cada serviço e pôr fim a estimativa de custo total para a execução da solução adotada.

4.5.1 Estimativa de custo da solução adotada

4.5.1.1 Terraplenagem

Com base nos valores de do Relatório Analítico de Composições de Custos do sistema SICRO, analisou-se os custos da escavação para estimar o valor do retaludamento juntamente com a escavação necessária para a construção da contenção em solo grampeado. Utilizou-se o critério de medição o volume em m³ retirado a partir das seções transversais do projeto construído no presente trabalho. Chegou-se através de um cálculo em planilha, levando em consideração a área de escavação em cada seção e a distância de 10 metros entre uma estaca e outra (Tabela 9), o valor em total de escavação em metros cúbicos de 94.914 m³ (Tabela 10), considerando um empolamento de 25% e uma folga de 5%.

Tabela 9 – Cálculo volume de escavação

SOLO GRAMPEADO + RETALUDAMENTO					
ESCAVAÇÃO (m³)					
Estaca	Área (m²)	Comprimento (m)	Volume (m³)	Volume (m³)	Volume (m³) + 25% empolamento
133+710	110,00	10,00	1100,00	1290,00	90394,00
133+720	148,00	10,00	1480,00	1705,00	
133+730	193,00	10,00	1930,00	2055,00	
133+740	218,00	10,00	2180,00	2215,00	
133+750	225,00	10,00	2250,00	2450,00	
133+760	265,00	10,00	2650,00	2715,00	
133+770	278,00	10,00	2780,00	2870,00	
133+780	296,00	10,00	2960,00	3005,00	
133+790	305,00	10,00	3050,00	3165,00	
133+800	328,00	10,00	3280,00	3700,00	
133+810	412,00	10,00	4120,00	4525,00	
133+820	493,00	10,00	4930,00	5380,00	
133+830	583,00	10,00	5830,00	6165,00	
133+840	650,00	10,00	6500,00	6485,00	
133+850	647,00	10,00	6470,00	6240,00	
133+860	601,00	10,00	6010,00	5510,00	
133+870	501,00	10,00	5010,00	4550,00	
133+880	409,00	10,00	4090,00	3625,00	
133+890	316,00	10,00	3160,00	2485,00	
133+900	181,00	10,00	1810,00	1225,00	
133+910	64,00	10,00	640,00	362,35	
133+920	8,47	10,00	84,70	42,35	
TOTAL			72315,00	71765,00	

Fonte: Elaboração própria do Autor, 2026.

Tabela 10 - Cálculo volume total de escavação

RESUMO DA TERRAPLENAGEM		
Item	Volume (m³)	Volume (m³) + 5% de folga
ESCAVAÇÃO	90394,00	94914,00

Fonte: Elaboração própria do Autor, 2026.

Através do volume calculado aplicou-se o valor obtido através da tabela SICRO, o custo unitário direto total de transporte em Santa Catarina (Referência Janeiro/2026) e considerando-se uma distância de transporte em torno de 3

quilômetros o valor de R\$ 15,22 por m³ conforme a Figura 40, chegando a um custo somente para o serviço de terraplenagem e considerando equipamentos e mão de obra o valor de R\$ **1.444.591,08** para a movimentação de 94.914,00 m³ de solo.

Figura 40 – Custo unitário escavação (SICRO)



DEPARTAMENTO

NACIONAL DE

INFRAESTRUTURA

DE TRANSPORTES

SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO

Custo Unitário de Referência

5502827

Escavação, carga e transporte de material de 1ª categoria na distância de 3.000 m - caminho de serviço pavimentado - com carregadeira e caminhão basculante de 14 m³

Santa Catarina

Janeiro/2026

FIC 0,17016

Produção da equipe 243,82 m³

Valores em reais (R\$)

A - EQUIPAMENTOS	Quantidade	Utilização		Custo Horário		Custo Horário Total
		Operativa	Improdutiva	Produtivo	Improdutivo	
E9667 Caminhão basculante com capacidade de 14 m³ - 210 kW	6,00000	0,97	0,03	324,5534	99,0472	1.906,7293
E9511 Carregadeira de pneus com capacidade de 3,40 m³ - 195 kW	1,00000	1,00	0,00	523,8872	257,6660	523,8872
E9541 Trator sobre esteiras com lâmina - 259 kW	1,00000	1,00	0,00	1.034,8587	417,7321	1.034,8587
				Custo horário total de equipamentos		3.465,4752
B - MÃO DE OBRA	Quantidade	Unidade		Custo Horário		Custo Horário Total
P9824 Servente	1,00000	h		24,9275		24,9275
				Custo horário total de mão de obra		24,9275
				Custo horário total de execução		3.490,4027
				Custo unitário de execução		14,3155
				Custo do FIC		0,9035
C - MATERIAL	Quantidade	Unidade		Preço Unitário		Custo Unitário
				Custo unitário total de material		
D - ATIVIDADES AUXILIARES	Quantidade	Unidade		Custo Unitário		Custo Unitário
				Custo total de atividades auxiliares		
				Subtotal		15,2190
E - TEMPO FIXO	Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário		Custo Unitário
				Custo unitário total de tempo fixo		
F - MOMENTO DE TRANSPORTE	Quantidade	Unidade	DMT		FIT	Custo Unitário
			LN	RP	P	
				Custo unitário total de transporte		
				Custo unitário direto total		15,22

Obs:

Fonte: Adaptado SICRO (2026).

4.5.1.2 Colocação dos Grampos

Estimou-se também o valor para colocação dos grampos da contenção em solo grampeado, utilizando a mesma referência da tabela SICRO, mas com um critério de medição através do comprimento total dos grampos em metros lineares. Vale ressaltar que a tabela sicro limita a capacidade de carga de trabalho do grampo em 80 kN, sendo que calculou-se para o presente estudo de caso uma carga de 121 kN, porém como trata-se apenas de uma estimativa de custo adotou-se o valor do SICRO para 80 kN.

A quantidade de grampos foi calculada através do número de grampos da vista frontal e multiplicado por seus respectivos comprimentos, chegando a um valor de comprimento total dos grampos de 11.048 metros.

Tabela 11 – Quantidade de grampos

GRAMPOS		
Tamanho (m)	Quantidade (uni)	Comprimento Total (m)
16,00	127	2.032,00
14,00	355	4.970,00
12,00	253	3.036,00
10,00	101	1.010,00
TOTAL		11.048,00

Fonte: Elaboração própria do Autor, 2026.

Figura 41 - Custo unitário grampeamento (SICRO)

DNIT DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES					
SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO		Santa Catarina		FIC 0,17016	
Custo Unitário de Referência		Janeiro/2026		Produção da equipe 14,91 m	
5605896 - Grampo de aço CA-50 D = 20 mm para solo grampeado com capacidade de 80 kN - fornecimento, perfuração e instalação				Valores em reais (R\$)	
A - EQUIPAMENTOS	Quantidade	Utilização		Custo Horário	Custo Horário Total
		Operativa	Improdutiva	Produtivo	Improdutivo
E9026 Bomba para injeção de nata de cimento com capacidade de 2 MPa - 2,20 kW	0,58219	1,00	0,00	7,5755	4,3699
E9764 Grupo gerador - 7,2 kVA	0,58219	1,00	0,00	11,1913	0,7082
E9024 Misturador de nata cimento - 1,50 kW	0,58219	1,00	0,00	29,4450	28,1880
E9798 Perfuratriz hidráulica rotoperfussiva - 123 kW	0,49900	1,00	0,00	569,7669	275,3293
				Custo horário total de equipamentos	
					312,3822
B - MÃO DE OBRA	Quantidade	Unidade		Custo Horário	Custo Horário Total
P9801 Ajudante	1,00000	h		27,6297	27,6297
P9805 Armador	1,00000	h		35,4407	35,4407
P9824 Servente	2,00000	h		24,9275	49,8550
				Custo horário total de mão de obra	
					112,9254
				Custo horário total de execução	
					425,3076
				Custo unitário de execução	
					28,5250
				Custo do FIC	
					3,0777
C - MATERIAL	Quantidade	Unidade		Preço Unitário	Custo Unitário
M0004 Aço CA 50	2,55233	kg		6,4947	16,5766
M0424 Cimento Portland CP II - 32 - saco	18,78899	kg		0,6376	11,9799
M2028 Coroa de botões cônicos - TCI tricone - D = 75 mm (2 15/16")	0,00050	un		1,196,9885	0,5985
M2487 Espalhador plástico tipo centralizador carambola para grampo de barra de aço - D ≤ 25,4 mm	0,50000	un		0,5295	0,2648
M1875 Haste de perfuração com rosca API 2 3/8" - D = 73 mm (2 7/8")	0,00020	m		665,6890	0,1331
M1880 Tubo PEAD PE 80 PN 16 - D = 20 mm	1,00000	m		4,3370	4,3370
M3095 Válvula manete - D = 20 mm	1,50000	un		2,2600	3,3900
				Custo unitário total de material	
					37,2799
D - ATIVIDADES AUXILIARES	Quantidade	Unidade		Custo Unitário	Custo Unitário
				Custo total de atividades auxiliares	
					68,8826
E - TEMPO FIXO	Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário	Custo Unitário
M0004 Aço CA 50 - Caminhão carroceria 15 t	5914655	0,00255	t	36,0700	0,0920
M0424 Cimento Portland CP II - 32 - saco - Caminhão carroceria 15 t	5914655	0,01879	t	36,0700	0,6778
M1880 Tubo PEAD PE 80 PN 16 - D = 20 mm - Caminhão carroceria 15 t	5914655	0,00013	t	36,0700	0,0047
				Custo unitário total de tempo fixo	
					0,7745
F - MOMENTO DE TRANSPORTE	Quantidade	Unidade	DMT		
			LN	RP	P
					FIT
M0004 Aço CA 50 - Caminhão carroceria 15 t	0,00255	tkm	5914449	5914464	5914479
M0424 Cimento Portland CP II - 32 - saco - Caminhão carroceria 15 t	0,01879	tkm	5914449	5914464	5914479
M1880 Tubo PEAD PE 80 PN 16 - D = 20 mm - Caminhão carroceria 15 t	0,00013	tkm	5914449	5914464	5914479
			Custo unitário total de transporte		
					69,66
			Custo unitário direto total		
					69,66

Fonte: Adaptado SICRO (2026)

Conforme a Figura 41, adotou-se o valor de R\$ 69,66 por metro de grampo, chegando a um total de **R\$ 769.603,68** para a execução do grampeamento da contenção em solo grampeado.

4.5.1.3 Dreno sub-horizontal

Para garantir a drenagem tanto da parede da contenção em solo grampeado quanto do retaludamento, previu-se a instalação de drenos sub-horizontais (DSH), de comprimento de 10 metros lineares, chegando a uma estimativa de custo de R\$ 104.676,00 conforme a Tabela 12.

Tabela 12 - Quantidades DSH

DSH			
Tamanho (m)	Quantidade (uni)	Comprimento Total (m)	Custo unitário
10,00	65	650,00	161,04
TOTAL R\$			R\$ 104.676,00

Fonte: Elaboração própria do Autor, 2026.

Os valores de custo unitários foram retirados assim como as demais medições através da tabela SICRO, considerando material, mão de obra e transporte conforme a Figura 42.

Figura 42 - Custo unitário DSH (SICRO)

DNIT DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES					
SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO		Santa Catarina		FIC 0,05296	
Custo Unitário de Referência		Janeiro/2026		Produção da equipe	
2003614 Dreno sub-horizontal - DSH 01 - material de 1ª categoria				1,00000 m	
				Valores em reais (R\$)	
A - EQUIPAMENTOS		Quantidade	Utilização	Custo Horário	
			Operativa	Produtivo	Improdutivo
			Custo horário total de equipamentos		
B - MÃO DE OBRA		Quantidade	Unidade	Custo Horário	
P9824 Servente		3,00000	h	24,9275	
				74,7825	
				Custo horário total de mão de obra	
				74,7825	
				Custo horário total de execução	
				74,7825	
				Custo unitário de execução	
				3,9605	
C - MATERIAL		Quantidade	Unidade	Preço Unitário	
M0025 Adesivo plástico para tubos de PVC		0,00067	kg	54,0324	
M2079 Fio de poliamida Nº 40 - E = 0,40 mm		5,23599	m	0,0862	
M2051 Geotêxtil não-tecido agulhado em poliéster - resistência à tração longitudinal de 14 kN/m		0,20000	m²	6,8315	
M2137 Tubo de PVC soldável para água fria - D = 50 mm (2")		1,00000	m	12,5600	
				Custo unitário total de material	
				14,4138	
D - ATIVIDADES AUXILIARES		Quantidade	Unidade	Custo Unitário	
2005759 Perfuração para dreno sub-horizontal em material de 1ª categoria com D = 75 mm (linha NW)		1,00000	m	67,8600	
				Custo total de atividades auxiliares	
				67,8600	
				Subtotal	
				161,0168	
E - TEMPO FIXO		Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário
M2051 Geotêxtil não-tecido agulhado em poliéster - resistência à tração longitudinal de 14 kN/m - Caminhão carroceria 15 t		5914655	0,00005	t	36,0700
M2137 Tubo de PVC soldável para água fria - D = 50 mm (2") - Caminhão carroceria 15 t		5914655	0,00067	t	36,0700
				Custo unitário total de tempo fixo	
				0,0260	
F - MOMENTO DE TRANSPORTE		Quantidade	Unidade	DMT	
				LN	RP
M2051 Geotêxtil não-tecido agulhado em poliéster - resistência à tração longitudinal de 14 kN/m - Caminhão carroceria 15 t		0,00005	tkm	5914449	5914479
M2137 Tubo de PVC soldável para água fria - D = 50 mm (2") - Caminhão carroceria 15 t		0,00403	tkm	5914449	5914479
				Custo unitário total de transporte	
				161,04	
				Custo unitário direto total	

Fonte: Adaptado SICRO (2026)

Por fim somando o serviço de terraplanagem, execução dos grampos e dreno sub-horizontal, tem-se uma estimativa de custo da solução adotada na ordem de **R\$ 2.318.870,76**.

Tabela 13 – Estimativa de custo da solução adotada

Estimativa de custo Solo Grampeado + Retaludamento					
Código SICRO	Serviço	Quantidade	Unidade	Preço unitário (R\$)	Preço serviço (R\$)
5502827	Escavação, carga e transporte de material de 1ª categoria na distância de 3.000 m - caminho de serviço pavimentado - com carregadeira e caminhão basculante de 14 m³	94914,00	m³	15,22	1.444.591,08
5605896	Grampo de aço CA-50 D = 20 mm para solo grampeado com capacidade de 80 kN - fornecimento, perfuração e instalação	11048,00	m	69,66	769.603,68
2003614	Dreno sub-horizontal - DSH 01 - material de 1ª categoria	650,00	m	161,04	104.676,00
TOTAL					2.318.870,76

Fonte: Elaboração própria do Autor, 2026.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente Trabalho de Conclusão de Curso teve como objetivo central analisar a estabilidade de um trecho crítico da rodovia SC-477 e propor soluções de contenção embasadas em rigor técnico e normativo. Através da modelagem geométrica e das simulações computacionais de equilíbrio limite, foi possível compreender a complexa interação mecânica do maciço e avaliar a viabilidade de diferentes intervenções de engenharia geotécnica.

A trajetória metodológica de testes evidenciou que soluções puramente geométricas ou de gravidade simples não eram suficientes para estabilizar a encosta sob as condições locais. O retaludamento com inclinação de 1:1, bem como a sua associação a um muro de gabião na base, mostraram-se tecnicamente ineficazes por não atingirem o Fator de Segurança global mínimo estipulado nas diretrizes do projeto ($FS \geq 1,50$). Por sua vez, a tentativa de um retaludamento mais suave (1:1,5) revelou-se geometricamente inexecutável, uma vez que a escavação invadiria a faixa de domínio do desvio provisório na crista do talude. A estabilização normativa só foi alcançada de forma plena no quarto cenário, que associou o solo grampeado na porção superior do maciço ao retaludamento na base, atingindo um FS de 1,565 e garantindo a integridade da via e a segurança do sistema.

É de suma importância salientar que as soluções e o dimensionamento apresentados ao longo deste estudo de caso possuem caráter estritamente acadêmico. O projeto aqui estruturado não representa a realidade do projeto que foi ou será implementado na região da SC-477. As investigações geotécnicas e os parâmetros de resistência ao cisalhamento, gentilmente cedidos pela empresa parceira, foram utilizados exclusivamente como uma base de dados secundários confiável, com o intuito de conferir embasamento físico real às simulações e permitir a exploração didática das ferramentas de análise.

No que tange às limitações da pesquisa, destaca-se que o escopo priorizou o aspecto técnico e a segurança global do maciço, o que restringiu o aprofundamento das análises comparativas de viabilidade econômica. Como apenas uma alternativa atendeu aos rigores da norma, a orçamentação elaborada com base no SICRO cumpriu a função isolada de estimar o custo global de construção da solução adotada,

impossibilitando um balanço de custo-benefício direto entre diferentes tipologias de contenção aprovadas.

Diante dessas delimitações e das descobertas obtidas, abrem-se diversas perspectivas para a continuidade desta linha de pesquisa para trabalhos futuros. Tratando-se de uma contenção rodoviária em um trecho que já sofreu colapso prévio, sugere-se a implantação de um plano de monitoramento pós-obra. Recomenda-se, como instrumentação mínima, a instalação de pinos de recalque superficiais no paramento projetado para controle topográfico periódico de deslocamentos horizontais e verticais, além da instalação de inclinômetros a montante da estrutura para monitorar eventuais movimentações profundas remanescentes no maciço, validando o desempenho da obra a longo prazo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro: Abnt, 2025. 18 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458**: Solos — Determinação da massa específica dos sólidos, da massa específica aparente e da absorção de água da fração retida na peneira com abertura de 2,0 mm. Rio de Janeiro: Abnt, 2025. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. 2 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2025. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo - Determinação do limite de plasticidade. 2 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2025. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682**: ESTABILIDADE DE ENCOSTAS. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 30 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16920-2**: MUROS E TALUDES EM SOLOS REFORÇADOS - PARTE 2: SOLOS GRAMPEADOS. Rio de Janeiro: Abnt, 2021. 35 p.

BARROS, P. L. A. **Obras de Contenção: Manual Técnico**. Jundiaí/SP: MACCAFERRI DO BRASIL Ltda., 2014. 219 p. Disponível em: <http://192.100.247.84/bitstream/prefix/174/1/TCC%2002%20%20final%20p%c3%b3s%20banca.pdf>. Acesso em 13 abr. de 2023.

BONO, Andréa de. **Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2013: From shared risk to shared value: The business case for disaster risk reduction**. Genebra: Université de Genève, 2013. 15 p. Disponível em: <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:32532>. Acesso em: 22 out. 2025.

CAPUTO, Homero P.; CAPUTO, Armando N. **Mecânica dos Solos: Teoria e Aplicações**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022. E-book. p.247. ISBN 9788521638032. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521638032/>. Acesso em: 03 nov. 2025.

CNN BRASIL. **Chuva abre cratera em rodovia de Santa Catarina; veja imagens.** 2025. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/sul/sc/chuva-abre-cratera-em-rodovia-de-santa-catarina-veja-imagens/>. Acesso em: 27 out. 2025.

DAS, Braja M.; SOBHAN, Khaled. **Fundamentos de engenharia geotécnica.** 4. ed. Porto Alegre: +A Educação - Cengage Learning Brasil, 2019. E-book. p.35. ISBN 9788522128280. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788522128280/>. Acesso em: 17 nov. 2025.

DAS, Braja M. **Princípios de engenharia de fundações:** Tradução e adaptação da 8ª edição norte-americana. Porto Alegre: +A Educação - Cengage Learning Brasil, 2016. E-book. p.7. ISBN 9788522124169. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788522124169/>. Acesso em: 17 nov. 2025.

DOMINGOS, Gislaine de Aguiar; DOMINGOS, Tiago José. **MOVIMENTO DE MASSA NA RODOVIA SC-401 EM FLORIANÓPOLIS NO ANO DE 2008.** *Ignis: revista técnico científica do Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina*, Florianópolis, v. 7, n. 1, jan/jun, 2022. Disponível em: <https://ignis.emnuvens.com.br/revistaignis/article/download/150/145/557>. Acesso em: 22 out. 2025.

DUARTE, Rodrigo Brum. **Movimentos de massa no município de Blumenau - Santa Catarina:** estudo de caso no bairro Progresso, localidade de Nova Rússia. 2015. Dissertação (Mestrado Profissional em Desastres Naturais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/205672>. Acesso em: 20 nov. 2025.

GERSCOVICH, Denise; SARAMAGO, Robson; DANZIGER, Bernadete R. **Contenções: Teoria e Aplicações em Obras.** 2. ed. Porto Alegre: Oficina de Texto, 2025. E-book. p.7. ISBN 9788579753381. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788579753381/>. Acesso em: 19 nov. 2025.

GERSCOVICH, Denise M S. **Estabilidade de Taludes.** 2. ed. Porto Alegre: Oficina de Texto, 2025. E-book. p.12. ISBN 9788579752476. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788579752476/>. Acesso em: 21 nov. 2025.

G1 SANTA CATARINA. **Com mortes e desabrigados, sobe para 131 o número de cidades afetadas pelas chuvas em SC.** 2023. Disponível em: <https://g1.globo.com/sc/santa-catarina/noticia/2023/10/08/com-mortes-e-rodovias-interditadas-sobre-para-120-o-numero-de-cidades-afetadas-pelas-chuvas-em-sc.ghhtml>. Acesso em: 03 nov. 2025.

G1 SANTA CATARINA. **Rodovia 'quebrada' obriga motoristas a desviarem por estrada de chão batido há quase 2 anos em SC.** 2023. Disponível em: <https://g1.globo.com/sc/santa-catarina/noticia/2024/09/07/rodovia-quebrada-ha-quase-2-anos-sc.ghml>. Acesso em: 03 nov. 2025.

GODOY, N. S. DE. **Fundações: Notas de aula**, Curso de graduação. São Carlos. Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 1972.

HERRMANN, Maria Lúcia de Paula. **ATLAS DE DESASTRES NATURAIS DO ESTADO DE SANTA CATARINA: PERÍODO DE 1980 A 2010.** 2. ed. Florianópolis: Da Universidade Federal de Santa Catarina, 2014. 238 p. Disponível em: <http://www.labclima.ufsc.br/files/2010/04/Atlas-2010.pdf>. Acesso em: 25 out. 2025.

JOPPERT JR, IVAN. **Fundações e Contensões de Edifícios** – São Paulo: Pini ISBN 978-85-7266-177-5, 2007. 221p.

KNAPPETT, J A.; CRAIG, R F. Craig | **Mecânica dos Solos**, 8ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2014. E-book. p.3. ISBN 978-85-216-2703-6. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/978-85-216-2703-6/>. Acesso em: 01 nov. 2025.

LAGETEC (Ceará). **Determinação do Limite de Liquidez.** 2016. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfefindmkaj/http://www.lagetec.ufc.br/wpcontent/uploads/2016/03/Ensaio-de-limites-de-liquidez-e-plasticidade-de-materialgranular.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2025.

MURRIETA, Pedro. **Mecânica dos Solos.** Rio de Janeiro: GEN LTC, 2018. E-book. p.5. ISBN 9788595156074. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788595156074/>. Acesso em: 16 nov. 2025.

OLIVEIRA, C. K. M. de et al. **Avaliação da Estabilidade de Um Talude Rodoviário Através de Dados Provenientes de Instrumentação Geotécnica.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 17., 2014, Goiânia. **Anais...** São Paulo: ABMS, 2014. Disponível em: (https://www.researchgate.net/publication/281243243_Avaliacao_da_Estabilidade_de_Um_Talude_Rodoviario_Atraves_de_Dados_Provenientes_de_Instrumentacao_Geotecnica). Acesso em: 20 nov. 2025.

PEREIRA, Tonismar dos Santos. **Avaliação do desempenho de diferentes métodos de análise de estabilidade de taludes em barragens de terra.** 77 p. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Santa Maria, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7565/PEREIRA%2c%20TONISMAR%20DOS%20SANTOS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 20 nov. 2025.

PINTO, Carlos de S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas.** 3. ed. Porto Alegre: Oficina de Texto, 2025. E-book. p.1. ISBN 9788579751165. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788579751165/>. Acesso em: 06 nov. 2025.

RAV ENGENHARIA E GEOTECNIA. **Relatório Técnico**, Florianópolis, 2023. Relatório interno.

RIFFEL, Eduardo Samuel; GUASSELLI, Laurindo Antônio; BRESSANI, Luiz Antonio. **Desastres associados a movimentos de massa: uma revisão de literatura. Boletim Goiano de Geografia.** Goiânia, v. 36, n. 2, p. 285-306. jul. 2016. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/bgg/article/view/42796>. Acesso em: 20 out. 2025.

SECOM. **Tráfego é totalmente interditado no trecho da SC-477 entre Doutor Pedrinho e Rio Negrinho.** 2023. Disponível em: <https://estado.sc.gov.br/noticias/trafego-e-totalmente-interditado-no-trecho-da-sc-477-entre-doutor-pedrinho-e-rio-negrinho/>. Acesso em: 05 nov. 2025.

STEIN, Ronei T.; FILHO, André L. D P.; SILVEROL, Aline C.; et al. **Estabilidade de Taludes e Contensões.** Porto Alegre: SAGAH, 2021. E-book. p.11. ISBN 9786556901664. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9786556901664/>. Acesso em: 02 nov. 2025.

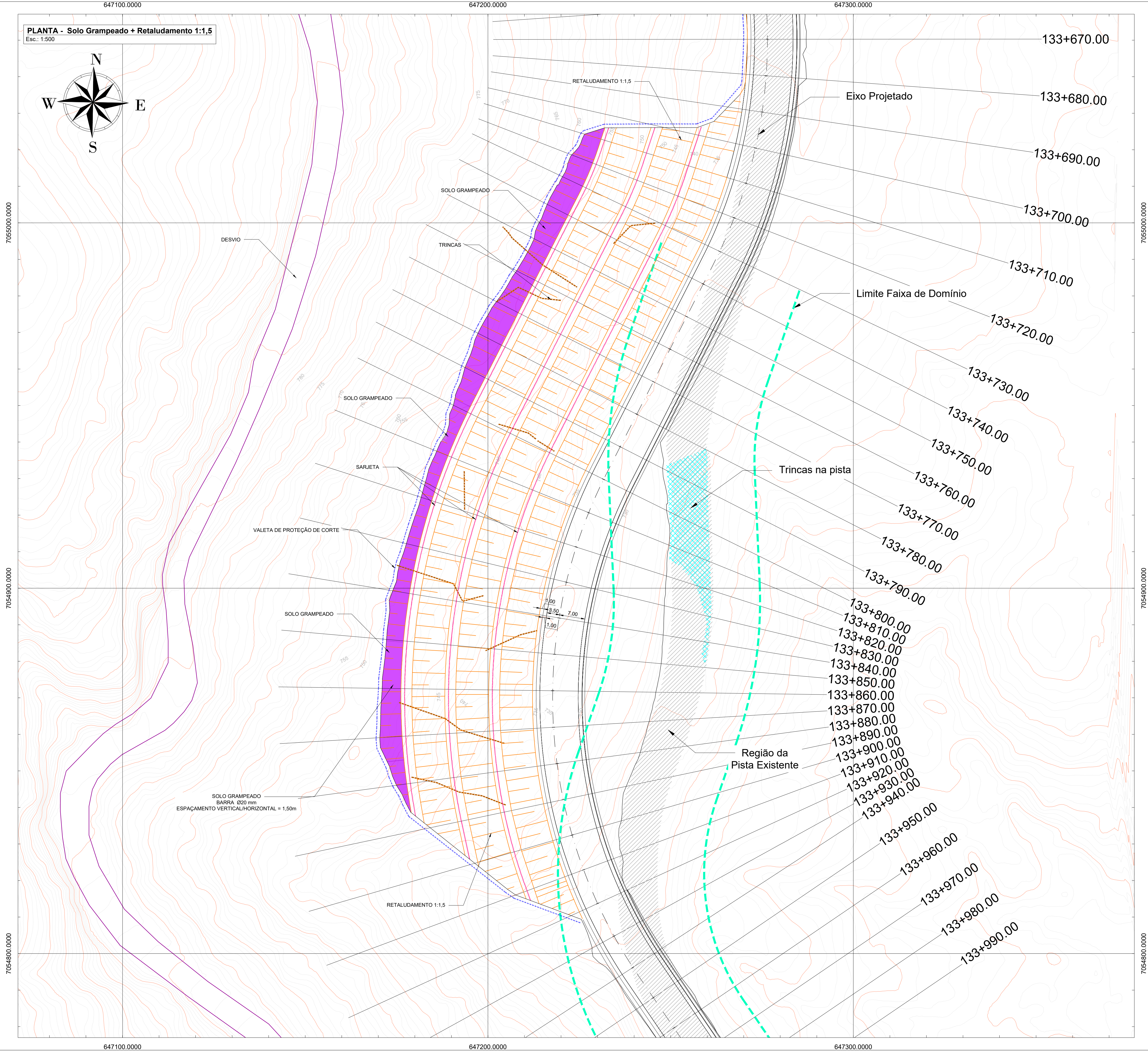
TEIXEIRA, A. T.; GODOY, N. S. **Análise, Projeto e Execução de Fundações Rasas.** Fundação: Teoria e Prática. São Paulo, SP, PINI, 1996.

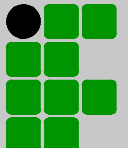
USGS (U.S.A.). **O Manual de Deslizamento Um Guia para a Compreensão de Deslizamentos.** Virginia: [s. n.], 2008. 176 p. Disponível em: https://www.gfdrr.org/sites/default/files/publication/Deslizamentos_M5DS.pdf. Acesso em: 20 nov. 2025.

VELLOSO, Dirceu de A.; LOPES, Francisco de R. **Fundações: Critérios de Projeto, Investigação do Subsolo, Fundações Superficiais, Fundações Profundas.** Porto

Alegre: Oficina de Texto, 2025. E-book. p.26. ISBN 9788579752094. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788579752094/>. Acesso em: 16 nov. 2025.

APÊNDICE A – PROJETO GOETÉCNICO (RETALUDAMENTO 1:1,5 + SOLO GRAMPEADO)



 **Instituto Federal de Santa Catarina**
Câmpus Florianópolis

Discente: **Eduardo José Martins**

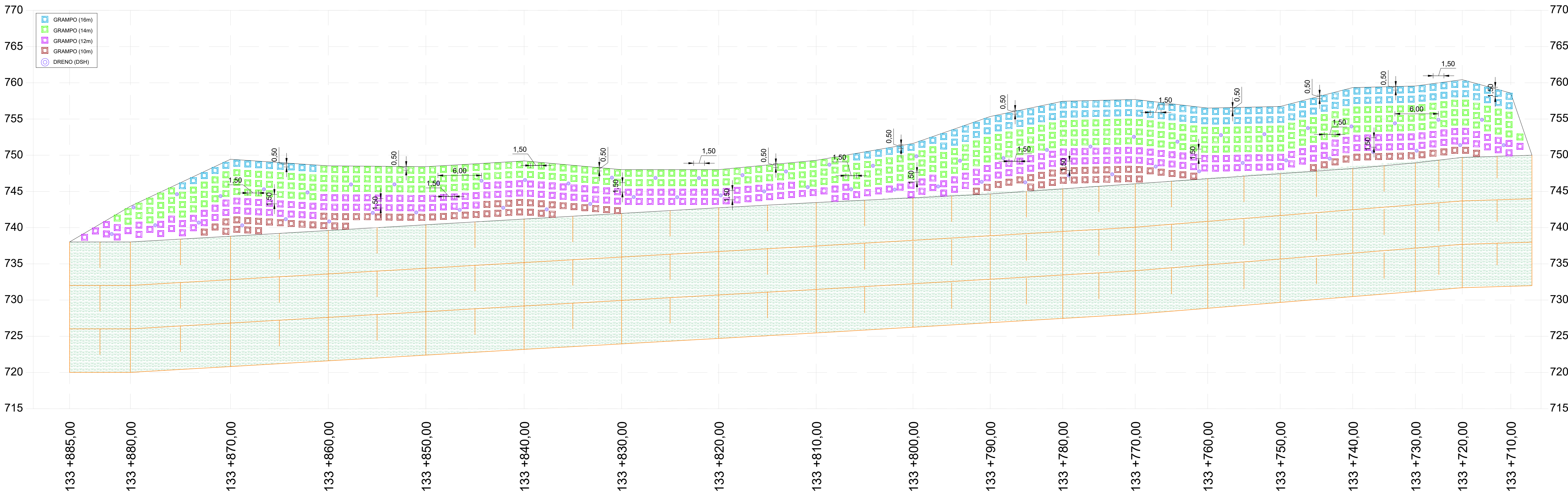
Orientadora: **Profa. Fernanda Simoni Schuch, Dra**

Projeto: **PROJETO GEOTÉCNICO - ESTABILIZAÇÃO DE TALUDE**
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Item do Projeto: **Planta, Vista Frontal e Seções Tipo** Escala: Prancha:

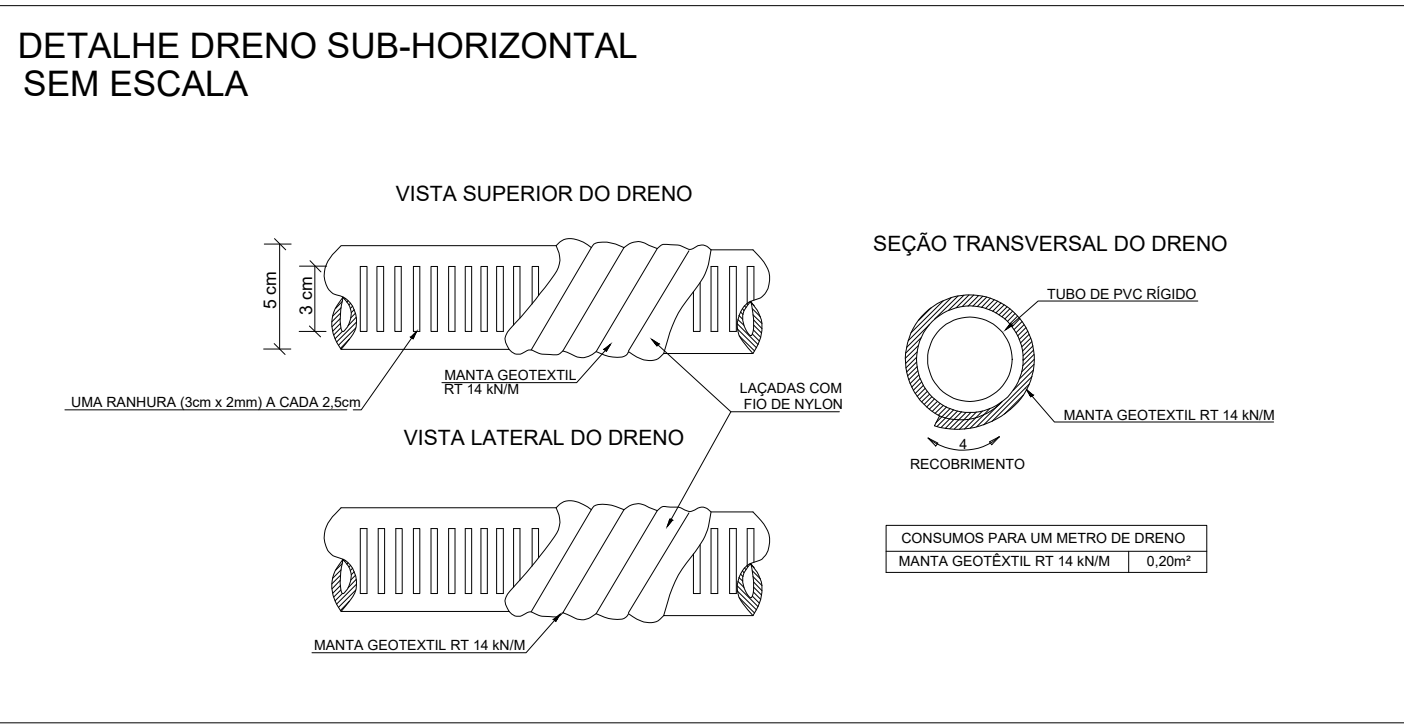
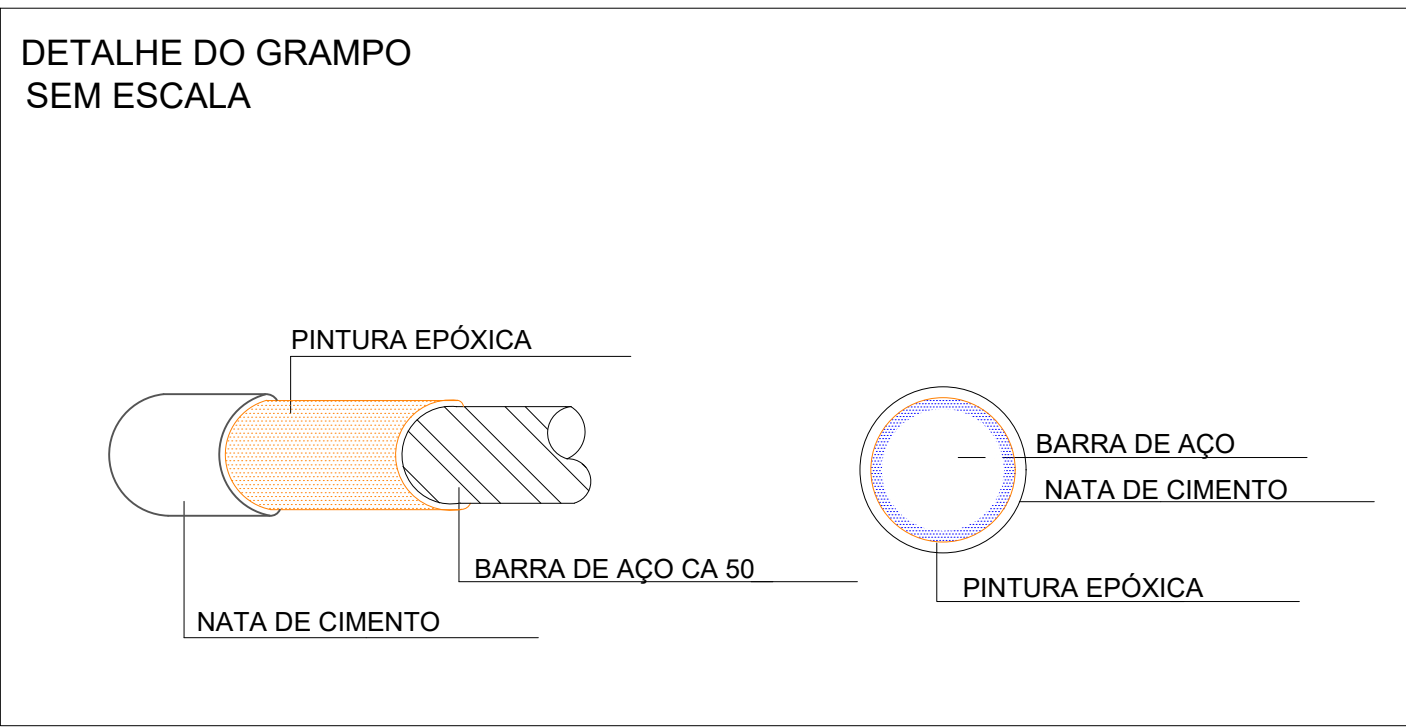
Referência do Projeto: **PRANCHA_TCC-2.dwg** Data: **09/07/2026**

TCC **GT**
01



QUANTIDADES E ESPECIFICAÇÕES DOS GRAMPOS							
TIPO DE GRAMPO	COMPRIMENTO UNITÁRIO (m)	NÚMEROS DE GRAMPOS	COMPRIMENTO TOTAL (m)	DIÂMETRO DA BARRA (mm)	AÇO	ESPACAMENTO VERTICAL (M)	ESPACAMENTO HORIZONTAL (M)
	16,00	127	2.032	20	CA-50 - RTmin = 121 kN	1,50	1,50
	14,00	355	4.970	20	CA-50 - RTmin = 121 kN	1,50	1,50
	12,00	253	3.036	20	CA-50 - RTmin = 121 kN	1,50	1,50
	10,00	101	1.010	20	CA-50 - RTmin = 121 kN	1,50	1,50
	TOTAL	836	11.048				

QUANTIDADES DRENO SUB-HORIZONTAL - DSH - SOLO GRAMPEADO				
DRENO (DSH)	L DRENO (m)	DIÂMETRO (mm)	NUMERO DE DRENOS	COMPRIMENTO TOTAL (m)
	10,00	50	65	650



SEQUÊNCIA EXECUTIVA

VISTA DE PERFIL

VISTA DE FRENTE

DESCRIÇÃO DOS SERVIÇOS

E1 - Execução da escavação em módulos de no máximo 5,00m de comprimento e 2,00m de altura para realização da primeira camada de inserção dos grampos.

E2 - Execução da primeira linha de grampos, com colocação da malha e concretagem da parede de solo grampeado.

E3 - Execução da segunda linha de escavação em nichos alternados, instalação dos grampos, colocação da malha e concretagem dos nichos (bancada de escavação com no máximo 5,00m de comprimento e 2,00m de altura).

E4 - Término da execução das escavações em nichos alternados, instalação dos grampos restantes, colocação da malha e concretagem final da segunda bancada.

NOTAS:

- E5, E6... En devem seguir a mesma sequência apresentada em E1 a E4, a fim de alcançar a altura de corte necessária para execução da parede em solo grampeado com a malha e concreto projetado.

CONVENÇÕES DE PROJETO

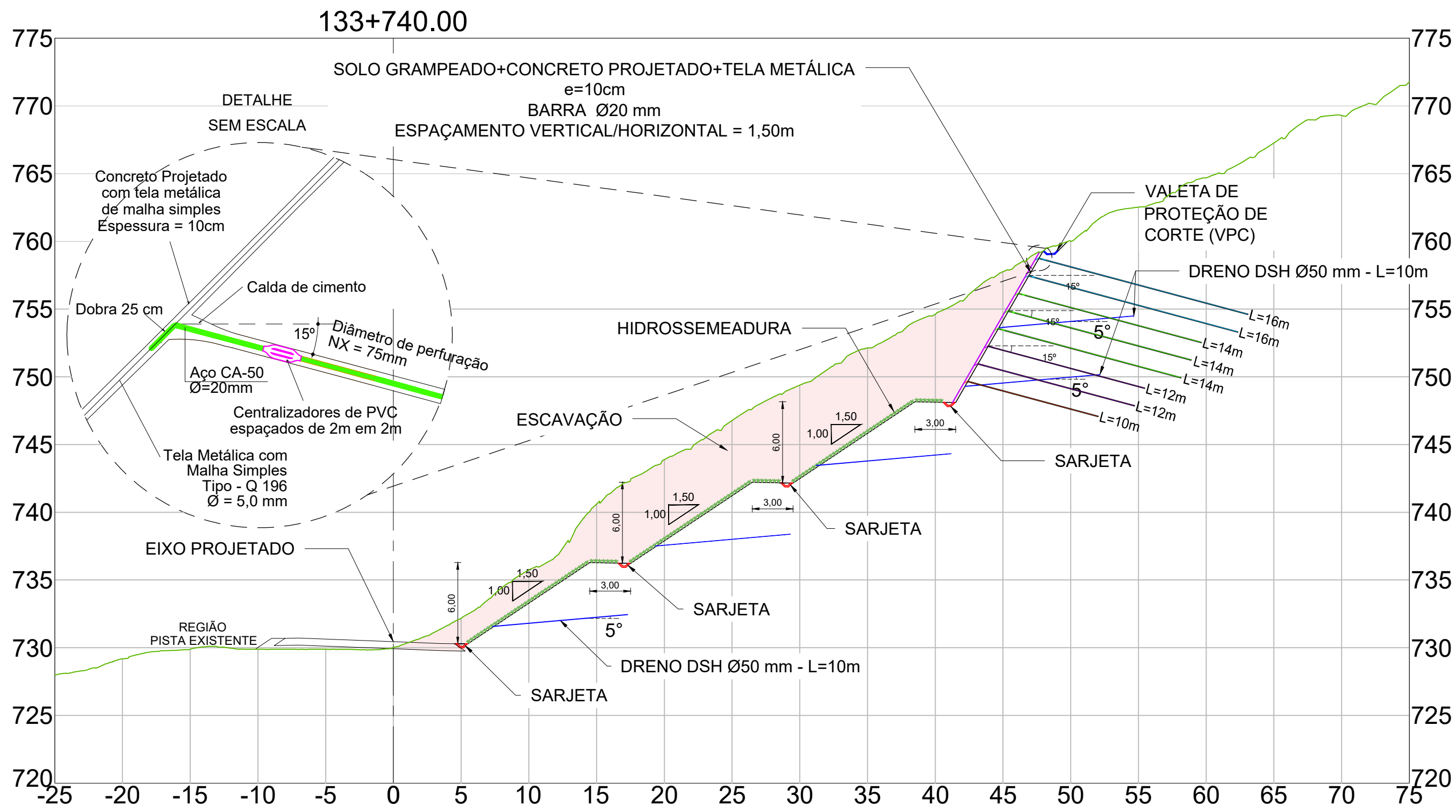
- OFFSET
- SOLO GRAMPEADO
- RUPTURA NA PISTA EXISTENTE
- TRINCAS
- ÁREA DE ESCAVAÇÃO
- TERRENO NATURAL
- EIXO DE PROJETO
- VALA DE PROTEÇÃO DE CORTE (VPC)
- SARJETA
- LIMITE FAIXA DE DOMÍNIO (20m DO EIXO ANTIGO)
- HIDROSSEMEADURA

SEÇÕES TIPO - Solo Grampeado + Retaludamento 1:1,5

Esc.: Indicada

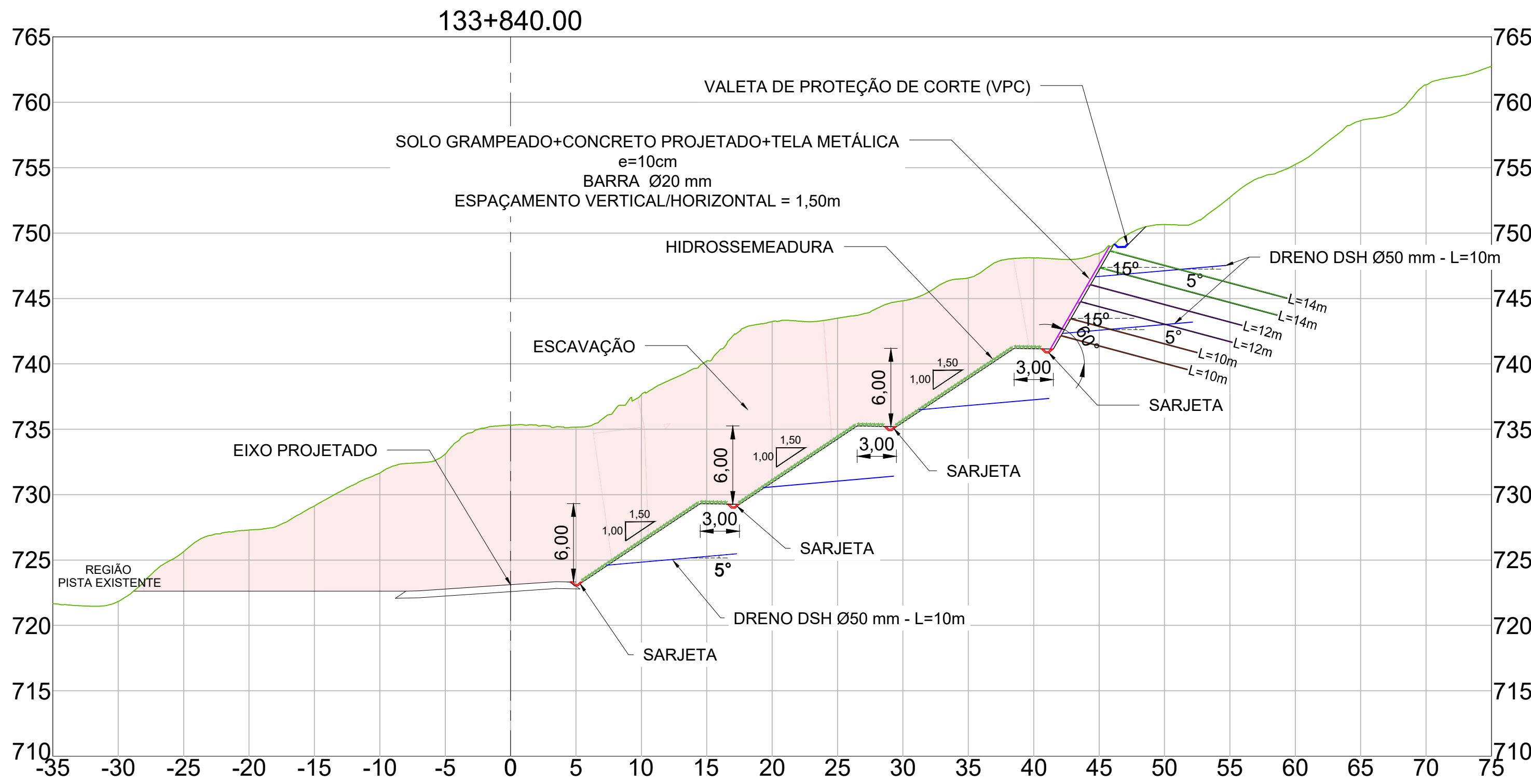
SEÇÃO TIPO - Altura média solo grampeado 10,00m

Esc.: 1:300



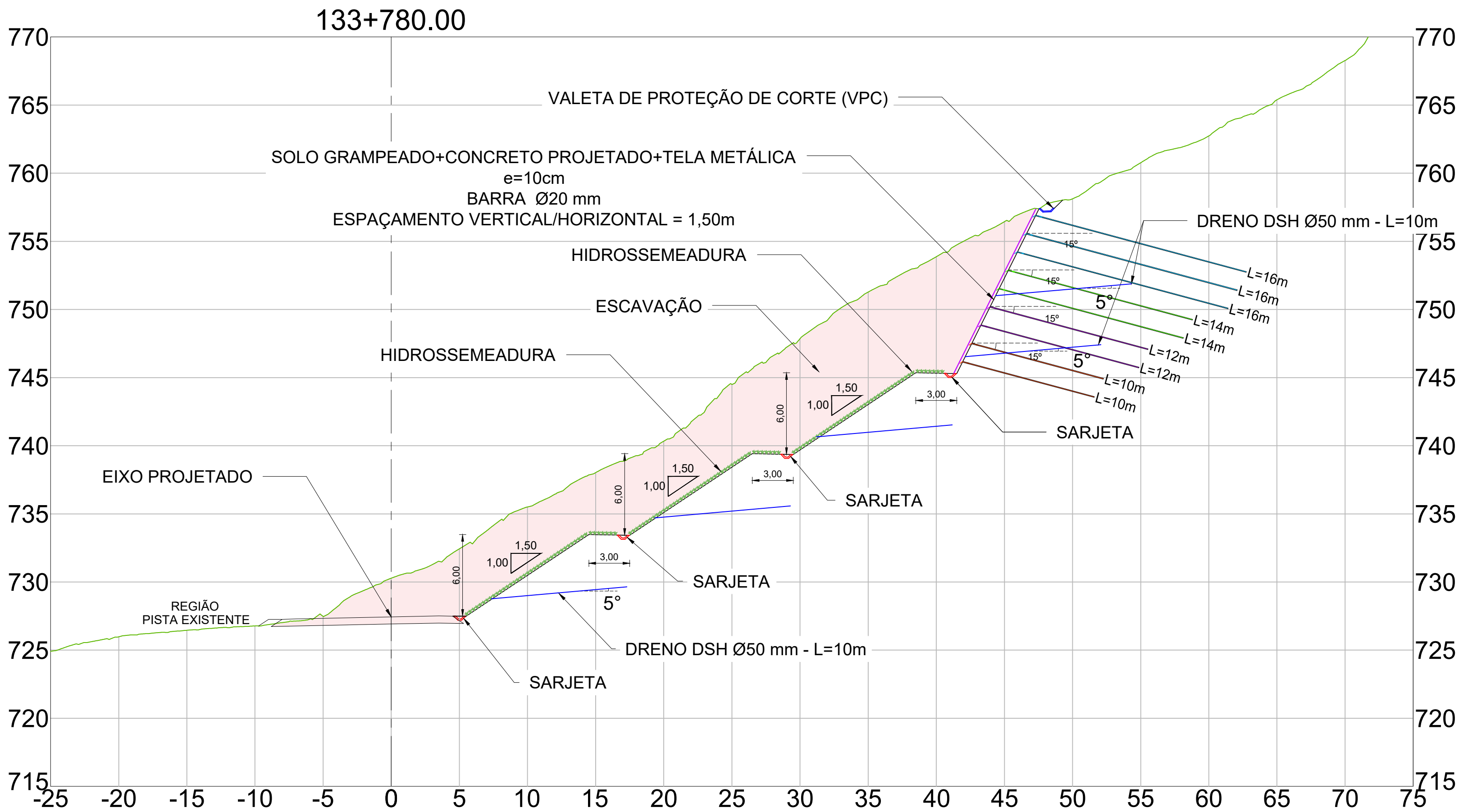
SEÇÃO TIPO - Altura média solo grampeado 8,00m

Esc.: 1:300



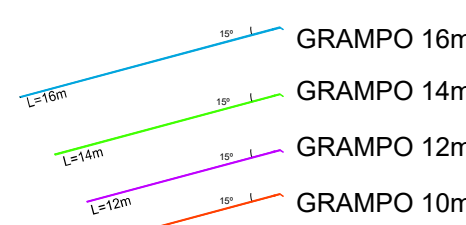
SEÇÃO TIPO - Altura média solo grampeado 12,00m

Esc.: 1:250



CONVENÇÕES DE PROJETO

- OFFSET
- SOLO GRAMPEADO
- RUPTURA NA PISTA EXISTENTE
- TRINCAS
- ÁREA DE ESCAVAÇÃO
- TERRENO NATURAL
- EIXO DE PROJETO
- VALA DE PROTEÇÃO DE CORTE (VPC)
- SARJETA
- LIMITE FAIXA DE DOMÍNIO (20m DO EIXO ANTIGO)
- HIDROSSEMEADURA



Instituto Federal de Santa Catarina
Câmpus Florianópolis

Discente: Eduardo José Martins

Orientadora: Profa. Fernanda Simoni Schuch, Dra

Projeto: PROJETO GEOTÉCNICO - ESTABILIZAÇÃO DE TALUDE
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Item do Projeto: Planta, Vista Frontal e Seções Tipo

Escala: Prancha:

Referência do Projeto: PRANCHA_TCC-2.dwg

Data: 09/07/2026

TCC GT 03

ANEXO A – SONDAGENS MISTAS

[illegible]

ANEXO B – ENSAIO CISALHAMENTO DIRETO

3.7 ENVOLTÓRIA 7

O material coletado no ponto 7 apresentou densidade natural aparente de $16,84\text{kN/m}^3$, com teor de umidade natural de $29,74\%$. Os ensaios realizados permitiram estabelecer envoltória de ruptura com intercepto coesivo em $9,7\text{kN/m}^2$ e ângulo de atrito interno entre as partículas de $28,7^\circ$. A Figura 7 ilustra o resultado.

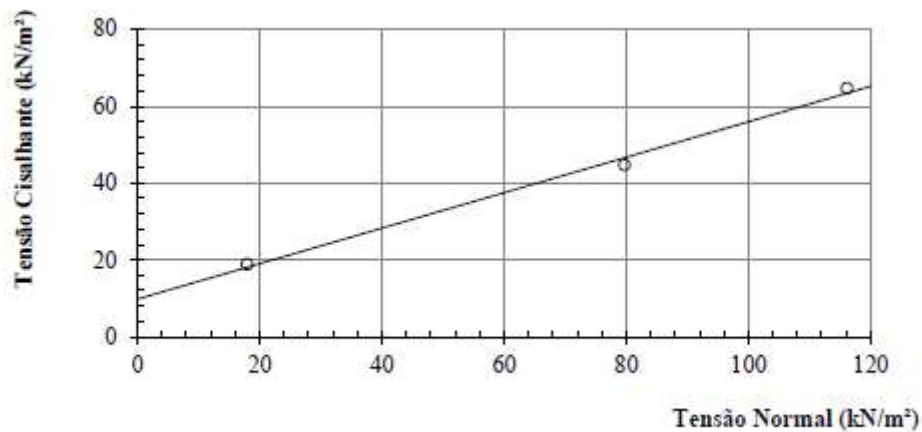


Figura 7 - Envoltória de ruptura do ponto 7

3.8 ENVOLTÓRIA 8

O material coletado no ponto 8 apresentou densidade natural aparente de $18,60\text{kN/m}^3$, com teor de umidade natural de $29,82\%$. Os ensaios realizados permitiram estabelecer envoltória de ruptura com intercepto coesivo em $18,9\text{kN/m}^2$ e ângulo de atrito interno entre as partículas de $35,2^\circ$. A Figura 8 ilustra o resultado.

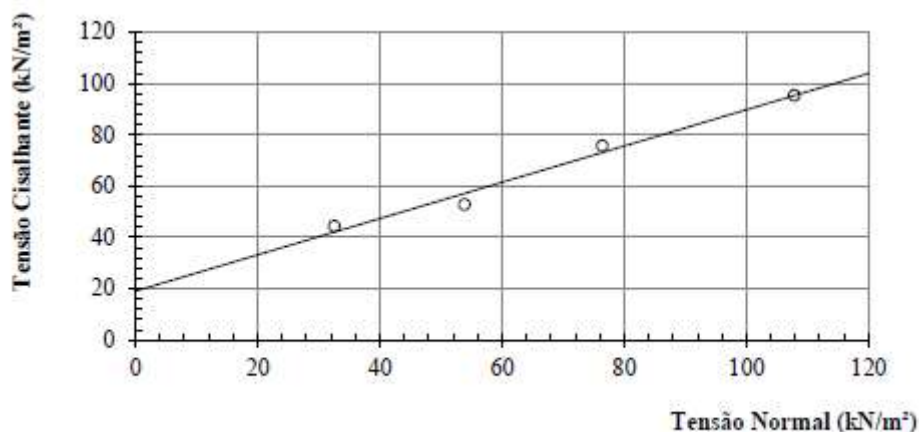


Figura 8 - Envoltória de ruptura do ponto 8