

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ALEXANDRE MOKDICI DOS REIS
WAGNER TEIXEIRA

**RETROANÁLISE DA ESTABILIDADE DE UM TALUDE RODOVIÁRIO
DA REGIÃO DE CURITIBA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2016

ALEXANDRE MOKDICI DOS REIS
WAGNER TEIXEIRA

**RETROANÁLISE DA ESTABILIDADE DE UM TALUDE RODOVIÁRIO
DA REGIÃO DE CURITIBA**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à disciplina de Trabalho de Diplomatação do curso superior de Engenharia Civil do Departamento de Construção Civil – DACOC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – como requisito para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. D. Sc. Ronaldo Luis dos Santos Izzo

Coorientadora: Dra. Juliana Lundgren Rose

CURITIBA
2016

FOLHA DE APROVAÇÃO

RETROANÁLISE DA ESTABILIDADE DE UM TALUDE RODOVIÁRIO DA REGIÃO DE CURITIBA

Por

Wagner Teixeira e Alexandre Mokdici dos Reis

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, defendido e aprovado em 20 de junho de 2016, pela seguinte banca de avaliação:

Ronaldo Luis Dos Santos Izzo, Dr.
Orientador
UTFPR

Juliana Lundgren Rose, Dra.
Co-Orientadora

Rogério Francisco Küster Puppi, Dr.
UTFPR

Amanda Dalla Rosa Johann, Dra.
UTFPR

RESUMO

REIS, A. M.; TEIXEIRA, W. **Retroanálise da estabilidade de um talude rodoviário da região de Curitiba**. 2016. 54 pp. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

Apresenta-se neste trabalho a retroanálise de um escorregamento em um talude rodoviário na encosta da rodovia Curitiba – Ponta Grossa (BR 376), km 4040, situado no município de Curitiba, Paraná. Por ser um corredor de escoamento de alguns dos principais polos de produção agrícola e industrial do Estado, mitigar seu risco de bloqueio ou acidentes é de suma importância. O talude localiza-se na região de Formação Guabirotuba e o solo é classificado como silte-arenoso, conforme norma D-2487 (ASTM, 2011). Através do ensaio de cisalhamento direto obteve-se um intercepto de coesão de 13,45 kPa e um ângulo de atrito interno de $25,85^\circ$ para este solo. Há no local um escorregamento do tipo rotacional, por isso, determina-se a mais provável causa do deslizamento, assumindo hipóteses em que este pode ter ocorrido. Um modelo da geometria inicial do talude foi inserido na ferramenta computacional SLOPE-W (GeoStudio, 2007), e juntamente com seus parâmetros característicos, determina-se o fator de segurança, através do método de Spencer, resultando em um fator de 2,18 para o talude em estado seco e 1,42 para o talude em estado parcialmente saturado. Através da análise, conclui-se que talude encontra-se estável no ponto de ruptura existente. Para o talude em estado parcialmente saturado, indica-se a aplicação de drenos profundos de 2,5 metros de comprimento, para assim obter o fator de segurança acima de 1,5, recomendado pela norma NBR 11682 (ABNT, 2002). A primeira hipótese é devido a uma infiltração localizada no patamar acima, ocasionando um fluxo de água corrente, abaixando a coesão para 8,62 kPa, chegando no fator de segurança unitário. Outra hipótese é a de uma lente no local da ruptura, com parâmetros inferiores aos obtidos em laboratório. Por fim, a última hipótese é a de um recalque na região do rompimento do talude, ocasionando um trincamento do solo após período de estiagem e resultando no existente rompimento.

Palavra Chave: Cisalhamento. Estabilidade de Talude. Fator de Segurança. Retroanálise. Talude Rodoviário.

ABSTRACT

REIS, A. M.; TEIXEIRA, W. **Back Analysis of a Road Slope Stability in Curitiba.** 2016. 54 pp. Final Course Assignment (Bachelor of Civil Engineering) – Federal University of Technology - Paraná, 2016.

This paper presents a back analysis of a slip on a road slope in the Curitiba - Ponta Grossa roadway (BR 376), km 4040, located in Curitiba, Paraná. This roadway is one of the main transport corridors of agricultural and industrial products of the state, mitigate the risks is very important. The soil is in Guabirota forming region and is classified as sandy-silt, according standard D-2487 (ASTM, 2011). Through direct shear test it was obtained an intercept of 13,45 kPa cohesion and angle of internal friction of $25,85^\circ$ for this soil. The slope have a rotation failure type, so it is determined the most likely cause of the slip, making assumptions cases about why this may have occurred. A model of the initial slope geometry was inserted into the computational tool SLOPE/W (GeoStudio, 2007), and with parameters of the soil, it was determined the safety factor, by Spencer method, resulting in a factor equals 2,18 to the slope in dry state and 1,42 for the slope in partially saturated state. Through analysis, it is concluded that the slope is stable at the point of rupture. For the slope in partially saturated state, it indicates the application of deep drains with 2,5 meters, in order to obtain the safety factor above 1,5, recommended by NBR 11682 (ABNT, 2002). The first hypothesis is due a infiltration located on the landing above, causing a flow of water, lowering cohesion to 8.62 kPa, reaching the unit safety factor. Another hypothesis is a layer with another soil in place of the rupture, with unequal parameters to those obtained in the laboratory. Finally, the last hypothesis is a repression in the disruption of the slope region, resulting in a soil dry period after cracking, resulting in the existing failure.

Key words: Back Analysis. Safety Factor. Shearing. Slope Road .Slope Stability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da bacia sedimentar de Curitiba.....	13
Figura 2 – Mapa esquemático da Formação Guabirotuba.....	14
Figura 3 – Granulometria da Formação Guabirotuba.....	16
Figura 4 – Deslizamento rotacional que evoluiu para um fluxo de terras.....	19
Figura 5 – Análise de um talude com o Método Comum das Fatias.....	22
Figura 6 – Forças atuando na n-ésima fatia.....	23
Figura 7 – Perfis representando a superfície antes e depois do deslizamento ocorrido em novembro de 2008.....	26
Figura 8 – Resultados do fator de segurança (FS) para as coesões fixas de 3 kN/m ² ; 8 kN/m ² ; 13 kN/m ² e 18 kN/m ²	27
Figura 9 – Seção de corte do talude antes do escorregamento (escala em metros).....	28
Figura 10 – Relação entre a variação do nível de água e o fator de segurança.....	29
Figura 11 – Preparação do terreno para reconstrução do talude.....	30
Figura 12 – Reconstrução do talude com sobre largura e posterior remoção.....	31
Figura 13 – Muros do tipo “gravidade” de pedra seca e pedra argamassada.....	32
Figura 14 – Estabilização por cortina cravada.....	33
Figura 15 – Partes construtivas de um chumbador.....	34
Figura 16 – Vista superior do talude.....	36
Figura 17 – Amostra indeformada de solo do talude.....	37
Figura 18 – Equipamento de ensaio para cisalhamento direto.....	38
Figura 19 – Curva granulométrica.....	40
Figura 20 – Estratigrafia e geometria do talude (em metros).....	43
Figura 21 – Talude seco analisado pela ferramenta computacional (distância e elevação em metros).....	44
Figura 22 – Talude parcialmente saturado analisado pela ferramenta computacional (distância e elevação em metros).....	45
Figura 23 – Talude parcialmente saturado com coesão reduzida analisado pela ferramenta computacional (distância e elevação em metros).....	47
Figura 24 – Talude parcialmente saturado com dreno analisado pela ferramenta computacional (distância e elevação em metros).....	48

LISTA DE GRÁFICOS, QUADROS E TABELAS

Gráfico 1 – Interpolação dos pontos de ruptura para obtenção da envoltória de Mohr-Coulomb.....	42
Gráfico 2 – Fator de segurança (FS) x Intercepto de coesão (kPa).....	44
Quadro 1 – Perfil típico da área marrom da Formação Guabirotuba.....	14
Quadro 2 – Nível de segurança contra a perda de vidas humanas.....	20
Quadro 3 – Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais.....	21
Tabela 1 – Resultados dos ensaios geotécnicos da região IV da Formação Guabirotuba – 2011.....	15
Tabela 2 – Nível de segurança desejado contra perdas de vidas humanas – 2009.....	21
Tabela 3 – Variação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento adotados – 2012.....	27
Tabela 4 – Quantidades de cada fração de solo – 2015.....	40
Tabela 5 – Tensão normal, teor de umidade e peso específico natural dos corpos de prova - 2016.....	41
Tabela 6 – Tensões cisalhantes máximas e tensões normais – 1ª tomada de dados – 2016.....	41
Tabela 7 – Tensões cisalhantes máximas e tensões normais – 2ª tomada de dados – 2016.....	42
Tabela 8 – Intercepto de coesão e ângulo de atrito interno – 2016.....	43

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA	10
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS	11
1.3 OBJETIVO GERAL	11
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
1.5 JUSTIFICATIVA	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1 PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO SOLO DE CURITIBA.....	13
2.2 CISALHAMENTO NO TALUDE.....	16
2.3 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO.....	17
2.4 ESTABILIDADE DE TALUDES	18
2.5 FATOR DE SEGURANÇA DE UM TALUDE	20
2.6 MÉTODO COMUM DAS FATIAS	22
2.7 MÉTODO DE SPENCER DE ANÁLISE COMPUTACIONAL.....	24
2.8 RETROANÁLISE.....	24
2.9 MÉTODOS DE ESTABILIZAÇÃO DE DESLIZAMENTO DE TALUDES	29
2.9.1 Reconstrução.....	29
2.9.2 Muro de arrimo tipo “gravidade”	31
2.9.3 Muro de concreto armado	32
2.9.4 Cortinas cravadas	32
2.9.5 Solo grampeado.....	33
3 MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1 COLETA DE AMOSTRA DEFORMADA DE SOLO	35
3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	35
3.3 COLETA DE AMOSTRA INDEFORMADA DE SOLO.....	35
3.4 COLETA DAS DIMENSÕES DO TALUDE	37
3.5 ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO	37
3.5.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	38
3.5.2 ADENSAMENTO (1ª ETAPA).....	39
3.5.3 CISALHAMENTO (2ª ETAPA).....	39
3.6 RETROANÁLISE DO ESCORREGAMENTO	39
4 RESULTADOS.....	40
4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO	40

4.2 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO.....	41
4.2 RETROANÁLISE DA ESTABILIDADE DO TALUDE	43
6 CONCLUSÕES	49
REFERÊNCIAS.....	51

1 INTRODUÇÃO

Além de ser um país de dimensões continentais, o Brasil também possui a quarta maior rede de estradas no mundo, com 1,6 milhões de quilômetros, pavimentadas ou não, segundo a *Road Traffic Technology*, em 2014. Dessas rodovias, o governo federal resolveu privatizar grande parte dos principais eixos, onde estão sendo recuperadas, parcialmente duplicadas, e mantidas pela iniciativa privada.

O país passa por um grande esforço em manutenção de rodovias, e o aprofundamento em estudos rodoviários vem ao encontro do processo que o país está passando, já que sua matriz de transporte é, e continuará sendo por muitos anos, a mesma: rodoviária.

Para uma rede rodoviária manter-se viável, deve ser a mais acessível possível. Sua acessibilidade acarreta em vencer topografias cada vez mais irregulares, exigindo então, um trabalho preciso nos entornos da estrada.

Existem no Brasil, conforme boletim da Confederação Nacional de Transportes, 98.475 km de rodovias, até 2014 (CNT, 2015). Dentre as rodovias nacionais existem eixos que cortam o país diagonalmente, transversalmente, longitudinalmente e radialmente, partindo de Brasília. Essas rodovias nacionais são construídas com dinheiro público, e são foco de grande polêmica, pois possuem sérios problemas de qualidade.

Desde Juscelino Kubitschek, a malha rodoviária do país vem sendo tratada como principal meio de transporte de mercadorias e pessoas. Mesmo com a preferência, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes preconiza que, em 1979 considerava-se 18% da malha rodoviária nacional em estado ruim. Em 2014, considerou-se 16%, no entanto, esta melhoria, praticamente, só aconteceu da malha rodoviária de estado intermediário (DNIT, 2015).

Continuando nos problemas rodoviários, no mesmo boletim da Confederação Nacional, estão catalogados 289 pontos críticos, sendo 28 de queda de barreira. Entrando nos problemas de queda de barreiras nas rodovias, vem à tona o papel da engenharia geotécnica como responsável pela análise correta dos taludes.

Sendo assim, o correto estudo topográfico do terreno é essencial para a eficácia de um projeto de uma rodovia e, mesmo na melhor condição plana do local, as encostas das rodovias irão ser sempre trabalhadas para a conformidade da estrada.

Um acontecimento importante, em estabilidade de maciços, é o caso das fortes chuvas em novembro de 2008 na região sul do Brasil, no qual milhares de pessoas foram afetadas e vários pontos de diferentes rodovias ficaram bloqueados devido a desmoronamentos.

Os deslizamentos de terra estão entre os problemas mais estudados dentro da engenharia geotécnica. Na verificação de um talude sujeito ao deslizamento empregam-se métodos de análise que se apoiam na teoria do equilíbrio limite. Essa análise passa pela comparação, ao longo de uma superfície de ruptura arbitrada, entre a resistência disponível e a resistência necessária para manter certo grau de estabilidade, expressos em um fator de segurança.

Esse método, onde se calcula um fator de segurança através do equilíbrio de uma massa de solo, na iminência de cisalhar, é a análise mais consagrada dentro da geotecnia. Para cada método de análise existente, baseado na teoria do equilíbrio limite, faz-se alguma suposição para realizarem-se os cálculos. Cada autor que trabalhou em seu método sugere uma simplificação ou um aprofundamento a fim de se chegar à maior precisão possível no fator de segurança do talude.

Dentro de uma retroanálise, onde se aplica para taludes já rompidos, fazem-se todos os cálculos de estabilidade do talude, porém, admite-se que o fator de segurança é igual à unidade, e assim, estuda-se que grandeza variou para o fator de segurança, ou em outras palavras, a estabilidade do talude, tenha sido comprometida.

Defronte da situação das rodovias do país e precipitações intensas nos últimos anos, uma análise meticulosa das encostas deve ser realizada, principalmente, na verificação do erro existente nos desmoronamentos de talude, a fim de se evitar o problema novamente.

1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

No presente trabalho foi feita uma análise de um talude próximo ao campus *Ecoville* da UTFPR, mais precisamente no entorno da rodovia denominada Curitiba - Ponta Grossa (BR 376), km 4040.

O talude já possui uma ruptura, no qual foi feita uma retroanálise. Com a mesma seção do talude e com o *software* SLOPE/W foi determinado o fator de segurança do talude.

Junto com os resultados foi analisada a necessidade de aumentar ou não o fator de segurança. Caso exista o risco, o aumento do fator de segurança será através da aplicação dos materiais corretos, que também foram sugeridos no presente trabalho, dispondo custos e benefícios.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Os problemas que motivaram o trabalho foram:

- Existe uma escassez de análises de taludes em encostas de rodovias, pois se adota uma solução geral de inclinação igual a 1:1,5 para aterros e 1:1 para cortes, satisfatório para a maioria dos casos (BIANCHINI, 2000);
- O talude a ser estudado já está visualmente danificado. Por ser uma rodovia de alto fluxo de veículos, a segurança dos usuários pode estar em risco;
- As regiões sul e sudeste brasileiras vêm sofrendo anualmente com fortes desmoronamentos de terras em encostas de rodovias, devido a fortes chuvas em curtos períodos de tempo. Existe a necessidade de rever a atual segurança de todos os taludes em encostas de rodovias, a fim de se evitar futuros desmoronamentos.

A análise do talude em questão, apesar de ser pontual, possui características genéricas, e parte-se do princípio que será feita uma análise a qual poderá ser aplicada em outros taludes em encostas de rodovias.

1.3 OBJETIVO GERAL

Retroanálise da estabilidade de um talude rodoviário na região de Curitiba.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar a granulometria, limite de plasticidade, limite de liquidez, intercepto de coesão e fator de atrito interno do solo do talude estudado;
- Fazer uma retroanálise acerca do rompimento do talude estudado;
- Determinar o fator de segurança do talude;

- Analisar uma solução de contenção para aumentar o fator de segurança do talude, caso necessário.

1.5 JUSTIFICATIVA

A manutenção de rodovias representa um dos principais desafios para o desenvolvimento econômico do país. O escoamento de cargas depende 60% do transporte rodoviário que tem seu desempenho afetado pela falta de infraestrutura. Outro fator considerável diz respeito à segurança dos usuários que é afetada pela falta de sinalização e conservação em vários trechos das estradas (RODRIGUES, 2009).

A importância deve-se, principalmente, ao fator de segurança do talude em estudo, o qual afeta a rodovia que escoar produtos do interior do estado para o porto de Paranaguá.

De acordo com observações de outros taludes em situação de rompimento, é de conhecimento que essa desestabilidade pode vir a causar acidentes e óbitos. Existe também a argumentação econômica. Depois de rompido o talude, ou o aumento do atual rompimento, exige-se um custo maior para realizar uma nova obra geotécnica com relação à analisar a situação e aplicar soluções de contenção. Sua eficácia será a mesma e ainda por cima evita-se futuros erros análogos.

A retroanálise se aplica neste caso, pois é a forma de se chegar mais próximo das causas do rompimento, através de fundamentação teórica, análises de laboratório e análises computacionais. A retroanálise é fundamental para analisar erros existentes, entender as suas causas e evitar futuros problemas semelhantes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO SOLO DE CURITIBA

Serão expostas, primeiramente, características gerais da formação da unidade geológica da região de Curitiba.

A região metropolitana de Curitiba situa-se sobre uma bacia sedimentar, que é, em sua maior parte, preenchida pela unidade geológica denominada Formação Guabirota. Os sedimentos da Formação Guabirota repousam sobre rochas do Complexo Cristalino, e se constituem principalmente em argilas siltosas ou siltes argilosos (KORMANN, 2002).

Os sedimentos da Formação Guabirota estão distribuídos desde o município de Campo Largo até o município de Quatro Barras, abrangendo Curitiba como um todo e parte de seis municípios limítrofes (MINEROPAR, 2011).

Na Figura 1, a localização da cidade de Curitiba é apresentada.

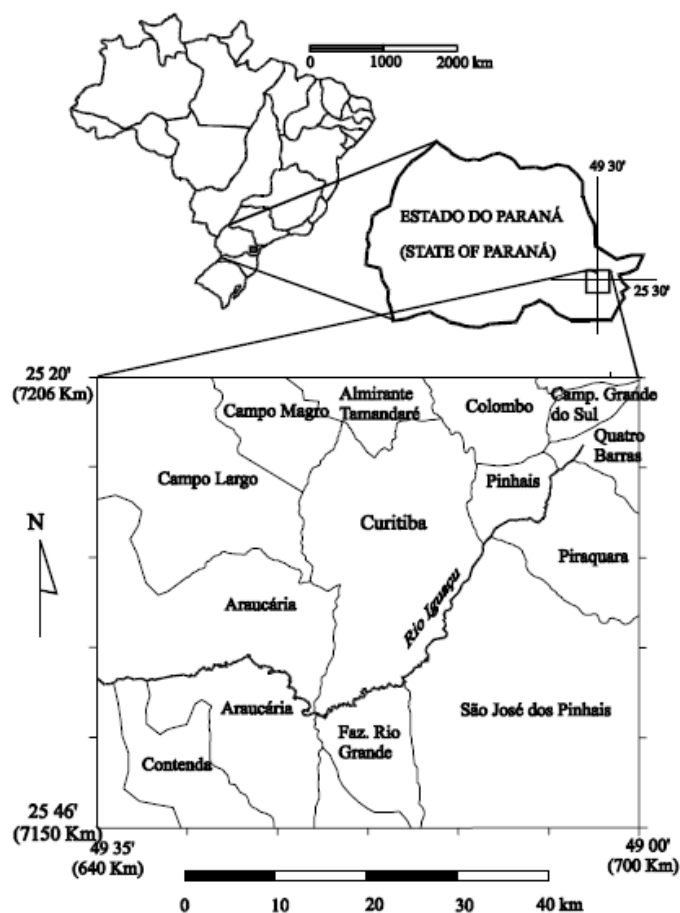


Figura 1 – Localização da bacia sedimentar de Curitiba
 Fonte: Salamuni (1999 *apud* Kormann, 2002, P. 29).

A MINEROPAR (órgão de serviço geológico do Paraná) realizou um levantamento detalhado das características da região metropolitana de Curitiba, (Figura 2).

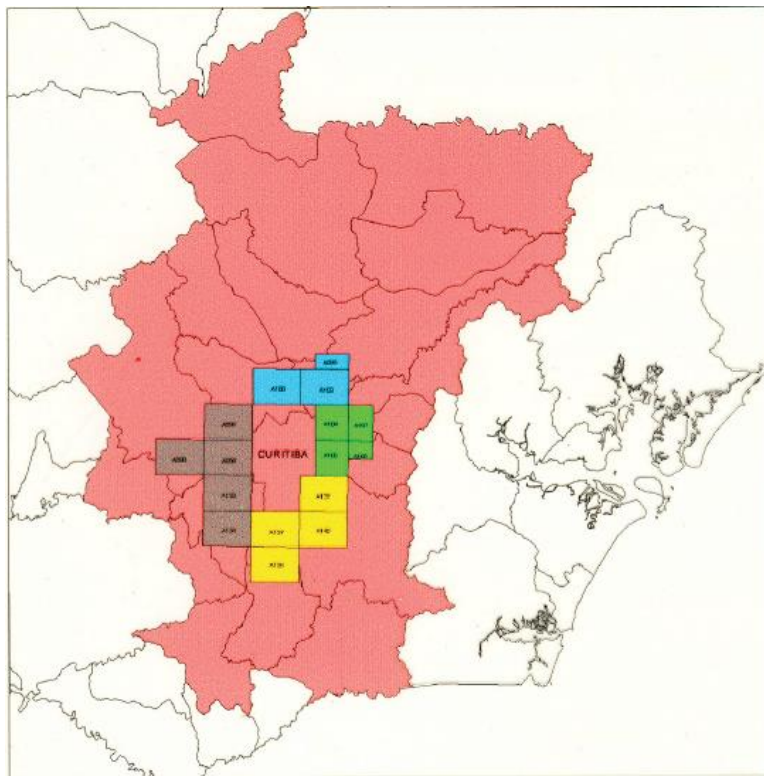


Figura 2 – Mapa esquemático da Formação Guabirotuba
Fonte: MINEROPAR (2011).

A região do talude está inserida na área IV (área marrom), na qual a MINEROPAR apresenta o perfil típico de alteração desta área. A descrição do perfil está no Quadro 1.

Camada	Descrição	Espessura (m)	Litotipo
1	Solo transportado, cor castanho negro	0,5 a 2,0	Laterítico
2	Solo residual maduro, cor vermelha, homogêneo, argilo mineral principal: caulinita	0,5 a 5,0	Laterítico
3	Solo residual jovem, cor vermelha com manchas de argila, argilo mineral principal: caulinita	0,5 a 5,0	Saprolítico
4	Argilas alteradas, cores variadas, argilo mineral principal: esmectita	1 a 5,0	Saprolítico
5	Argilas cinza esverdeadas, argilo mineral principal: esmectita	1 a 50,0	Saprolítico
6	Saprólito gnaisse-migmatito, argilo mineral principal: caulinita	-	Saprolítico

Quadro 1 – Perfil típico da área marrom da Formação Guabirotuba
Fonte: MINEROPAR (2011).

Outros parâmetros geotécnicos importantes da região IV da Formação Guabirotuba, realizados também pela MINEROPAR, estão na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultados dos ensaios geotécnicos da região IV da Formação Guabirotuba - 2011

Material incolidado	Média de resultados de LL	Média de resultados de LP	Média de resultados de permeabilidade	Média de resultados de erodibilidade
			m/s (K)	S / P% / E
Solo residual	63	38	5×10^{-6}	0,6 / 4 / 42,9
Argila	68,4	39,8	$4,5 \times 10^{-7}$	0,3 / 21,1 / 0,8
Arcósio	41,8	29,7	$5,5 \times 10^{-6}$	0,4 / 20,6 / 2

Fonte: MINEROPAR (2011).

Em geral, os solos argilosos da Formação Guabirotuba possuem como característica marcante uma consistência elevada (rija e dura). Apesar da compressibilidade reduzida, as argilas rijas e duras de Curitiba possuem características que tornam frequente a ocorrência de acidentes em obras (KORMANN, 2002). O solo desta formação pode ter comportamento inesperado em obras que envolvem fundações, escavações e taludes (Massad et al., 1981 *apud* KORMANN, 2002).

Outra característica típica das argilas da Formação Guabirotuba é sua umidade natural, que normalmente mostra-se elevada. Como consequência da elevada umidade, o grau de saturação dos sedimentos também é frequentemente alto, e as argilas encontram-se saturadas (KORMANN, 2002).

A seguir, na Figura 3, a granulometria do solo da Formação Guabirotuba realizada por Kormann (2002).

Outras características que Kormann (2002) traz são os valores médios do limite de plasticidade e de liquidez, que são 30% e 73%, respectivamente.

Com relação à expansibilidade, a composição mineralógica das argilas da Formação Guabirotuba é caracterizada pela ocorrência de esmectita, o qual é um material tipicamente expansivo (KORMANN, 2002).

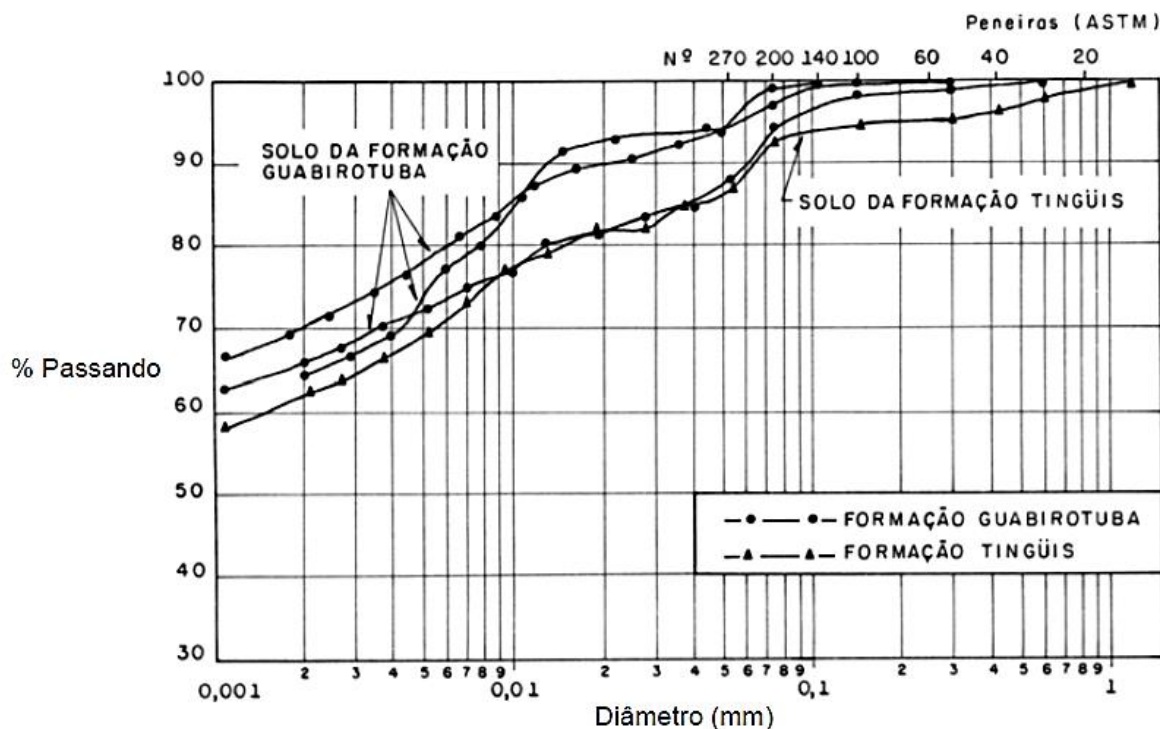


Figura 3 – Granulometria da Formação Guabirota
Fonte: Kormann (2002).

Além disso, as argilas alteradas e cinza-esverdeadas da Formação Guabirota são expansivas, retrativas e higroscópicas, atributos que lhes conferem uma alta erodibilidade (MINEROPAR, 2011).

Kormann (2002) realizou, de forma aprofundada, análises de cisalhamento direto e triaxiais do solo da Formação Guabirota, realizados com níveis de tensão inferiores às tensões de pré-adensamento dos solos. Os resultados de ângulo de atrito de pico efetivo para sedimentos não intemperizados foram entre 22° e 28°, e a coesão efetiva variou entre 5 e 47 kPa.

2.2 CISALHAMENTO NO TALUDE

Muitos casos geotécnicos, como empuxo de terra em estruturas de contenção, capacidade de carga e estabilidade de taludes, estão intimamente relacionados à resistência ao cisalhamento do solo, que se refere diretamente ao estado de tensões efetivas ao qual o solo está submetido (DAS, 2012).

Mohr (1900) apresentou a teoria para ruptura de materiais. A teoria afirma que um material se rompe por causa da combinação entre forças normal e de cisalhamento, e não devido à máxima força normal ou de cisalhamento isoladamente

(DAS, 2012). Portanto, a tensão normal está em função da tensão de cisalhamento em um plano de ruptura.

Para a maioria dos problemas de mecânica dos solos, é suficiente aproximar a tensão de cisalhamento no plano de ruptura para uma função linear da tensão normal (COULOMB, 1776 *apud* DAS, 2012). Esta função linear, chamada de critério de ruptura de Mohr-Coulomb, e pode ser escrita conforme equação (1).

$$\tau_f = c + \sigma \operatorname{tg} \phi \quad (1)$$

Onde c é a coesão, ϕ ângulo de atrito interno, σ é a tensão normal do plano de ruptura e τ_f a resistência ao cisalhamento.

Em um solo saturado, a tensão normal total em um ponto é a soma da tensão efetiva (σ) e da poropressão (u).

O critério de ruptura de Mohr-Coulomb, expresso em termos de tensão efetiva, está descrito na equação (2).

$$\tau_f = c' + \sigma' \operatorname{tg} \phi' \quad (2)$$

Existem vários métodos de laboratório disponíveis para determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, são eles:

- Ensaio de cisalhamento direto;
- Ensaio triaxial;
- Ensaio de cisalhamento simples;
- Ensaio triaxial de deformação plana;
- Ensaio de cisalhamento anular ou *ring shear*.

O ensaio de cisalhamento direto e o ensaio triaxial são as duas técnicas normalmente utilizadas para a determinação dos parâmetros da resistência ao cisalhamento (DAS, 2012).

2.3 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

Este tipo de ensaio é utilizado para obtenção de coordenadas de pontos da envoltória de resistência de Mohr-Coulomb para obtenção dos parâmetros de

intercepto de coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ). Informações quanto à deformação volumétrica do solo durante o cisalhamento também pode ser obtida.

O ensaio de cisalhamento direto consiste no uso de um aparato que promove o deslizamento de uma metade do corpo de prova de solo em relação à outra, determinando assim, para cada tensão normal (σ) à superfície do deslizamento, o valor da tensão cisalhante (τ) necessária para provocar a deformação do corpo de prova até a ruptura. O ensaio é executado mantendo-se constante a tensão vertical e medindo-se a tensão cisalhante correspondente a cada deformação horizontal imposta ao corpo de prova, gerando dessa maneira a curva tensão-deformação. As deformações verticais são também monitoradas durante o processo de cisalhamento, possibilitando avaliações da variação volumétrica (DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL..., 2015).

2.4 ESTABILIDADE DE TALUDES

Ao se analisar a estabilidade de taludes, verifica-se a importância de se aprofundar a investigação geotécnica da área. Contudo, Bianchini (2000) afirma que soluções empíricas são comumente utilizadas em taludes rodoviários, adotando-se inclinações típicas de 1:1,5 (em aterros) a 1:1 (em cortes). Solução a qual funciona para a maioria das situações e possui viabilidade econômica, pois realizar estudos detalhados do solo possui um maior custo.

Craig (2004) cita que se os deslocamentos fossem tais que a deformação em um elemento do solo superasse o valor que corresponde à máxima resistência (resistência de pico), então a resistência cai para o valor último. Dessa forma, é apropriado usar a resistência do estado crítico para analisar a estabilidade. Craig (2004) também preconiza que para casos de talude com presença de superfície de deslizamento preexistente, o uso da resistência residual é apropriado.

Nos métodos de análise de estabilidade, Guidicini e Nieble (1976 *apud* CRAIG, 2004) citam que o seu refinamento depende do nível das informações disponíveis bem como da avaliação das consequências da ruptura do talude.

Craig (2004) afirma que os tipos mais importantes de ruptura de taludes são: deslizamento rotacional (circular ou não), deslizamento translacional e deslizamento composto. Na maioria dos casos, a estabilidade do talude pode ser considerada um

problema bidimensional, e se podem admitir condições do estado plano de deformações.

Cruden e Varnes (1996 *apud* DAS, 2012) classificaram as rupturas em taludes nas cinco principais categorias:

- Queda: É o desprendimento de solo e/ou fragmentos de rocha que caem de um talude.
- Tombamento: É o movimento de rotação à frente do solo e/ou de massas rochosas, aproximadamente, no eixo abaixo do centro de gravidade da rocha que está sendo deslocada.
- Escorregamento (ou deslizamento): É o movimento descendente de uma massa de solo. Ocorre na superfície de ruptura.
- Expansão lateral (ou espalhamento): É uma forma de deslizamento que ocorre por translação. Ocorre através do “movimento súbito de uma fração de areia ou silte recoberta por argila retentora de água ou sobrecarregada por aterro” (CRUDEN; VARNES, 1996 *apud* DAS, 2012).
- Escoamento: É o movimento, ladeira abaixo, de massa de solo, de forma similar à de fluidos viscosos.

Na Figura 4, uma imagem esquemática de Varnes (1978 *apud* DAS, 2012) de um deslizamento do tipo Rotacional que evoluiu para um fluxo de terras.

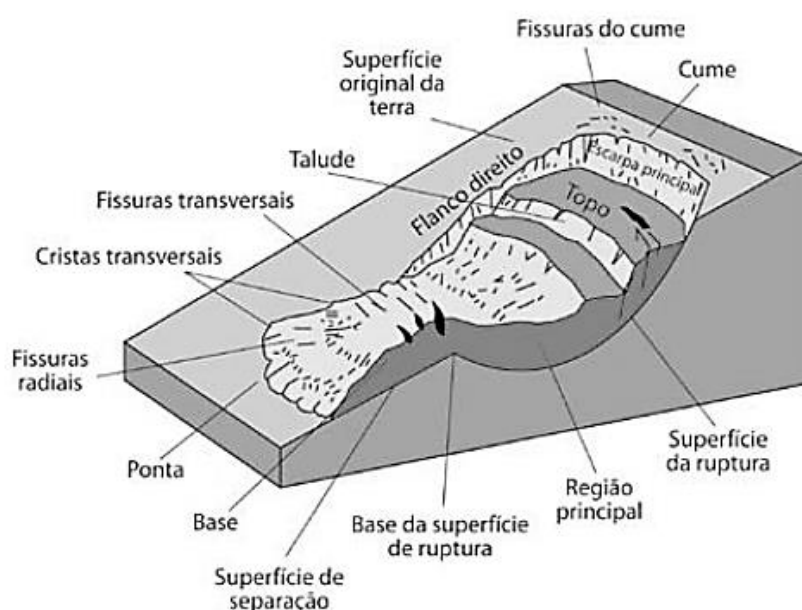


Figura 4 – Deslizamento rotacional que evoluiu para um fluxo de terras
Fonte: Varnes (1978 *apud* DAS, 2012).

2.5 FATOR DE SEGURANÇA DE UM TALUDE

A segurança em estabilidade de taludes é normatizada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) através da Norma Brasileira (NBR) 11682 de 2009. Esta norma tem como objetivo fixar as condições exigíveis no estudo e controle de taludes em solo, rochas ou mistos, componentes de encostas naturais ou resultantes de cortes. A mesma norma abrange também condições para projeto, execução, controle e conservação de obras de estabilização.

Define-se fator de segurança como

relação entre os esforços estabilizantes (resistentes) e os esforços instabilizantes (atuantes) para determinado método de cálculo adotado, porém, essa determinação, derivada do cálculo, não é o fator de segurança realmente existente, devido à imprecisão das hipóteses e incerteza dos parâmetros de solos adotados (NBR 11682 - ABNT, 2009).

Conforme a NBR 11682 (ABNT, 2009), os fatores de segurança considerados nesta norma têm a finalidade de cobrir as incertezas naturais das diversas etapas de projeto e construção. Dependendo dos riscos envolvidos, deve-se inicialmente enquadrar o projeto em umas das seguintes classificações de nível de segurança, definidas a partir da possibilidade de perdas de vidas humanas, conforme Quadro 2, e de danos materiais e ambientais, conforme Quadro 3.

Nível de Segurança	Crerios
Alto	Áreas com intensa movimentação e permanência de pessoas, como edificações públicas, residenciais ou industriais, estádios, praças e demais locais, urbanos ou não, com a possibilidade de elevada concentração de pessoas.
Mélio	Áreas e edificações com movimentação e permanência restrita de pessoas. Ferrovias e rodovias de tráfego moderado.
Baixo	Áreas e edificações com movimentação e permanência eventual de pessoas. Ferrovias e rodovias de tráfego reduzido.

Quadro 2 - Nível de segurança desejado contra a perda de vidas humanas
 Fonte: NBR 11682 (ABNT, 2009).

Nível de segurança	Critérios
Alto	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de alto valor histórico, social ou patrimonial, obras de grande porte e áreas que afetam serviços essenciais. Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais graves, tais como nas proximidades de oleodutos, barragens de rejeito e fábricas de produtos tóxicos.
Médio	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de valor moderado. Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais moderados.
Baixo	Danos materiais: Locais próximos a propriedade de valor reduzido. Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais reduzidos.

Quadro 3 - Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais
Fonte: NBR 11682 (ABNT, 2009).

O fator de segurança mínimo a ser adotado, considerando-se os níveis de segurança citados nos Quadros 2 e 3, deve ser definido conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Nível de segurança desejado contra a perda de vidas humanas – 2009

Nível de segurança contra danos a vidas humanas	Nível de Segurança contra danos materiais e ambientais		
	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 constante no Anexo D da NBR 11682 (ABNT, 2009).

NOTA 2: No caso de instabilidades de lascas/blocos rochosos, podem ser utilizados fatores segurança parciais, incluindo os parâmetros de peso específico, ângulo de atrito e coesão 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 julgado pelo engenheiro civil geotécnico.

Fonte: NBR 11682 (ABNT, 2009).

2.6 MÉTODO COMUM DAS FATIAS

Para analisar o cisalhamento ocorrido em um talude, usam-se métodos derivados do Método Comum das Fatias, sendo importante a compreensão deste método antes de partir para os métodos derivados.

A análise de estabilidade usando o método das fatias é representada na Figura 5 (DAS, 2012).

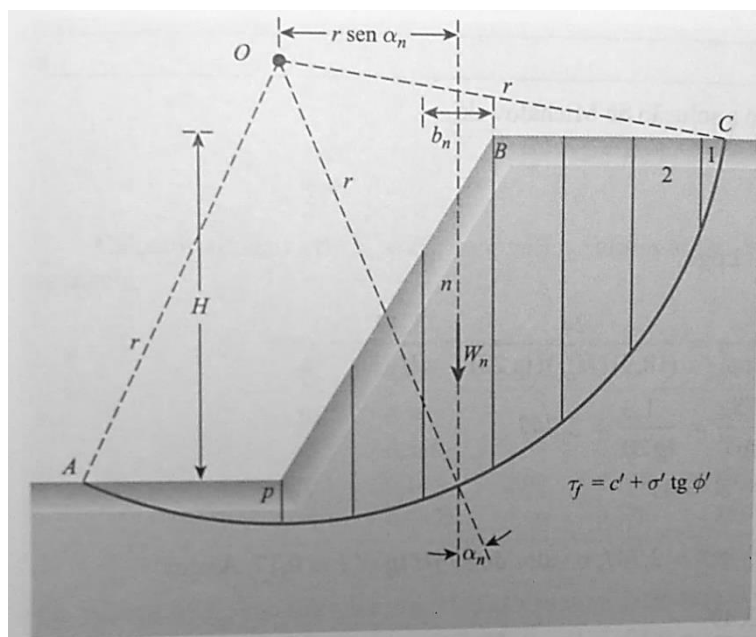


Figura 5 – Análise de um talude com o Método Comum das Fatias
 Fonte: Das (2012).

Onde AC é um arco de círculo representando a superfície de ensaio de ruptura. O solo acima da superfície de ruptura é dividido em várias fatias verticais, das quais não precisam ter larguras iguais, mas semelhantes. Das (2012) explica que, considerando um comprimento unitário perpendicular à seção transversal mostrada, as forças que atuam em uma fatia típica (n -ésima fatia) são mostradas na Figura 6. Para simplificar, assume-se que o valor da poropressão é zero.

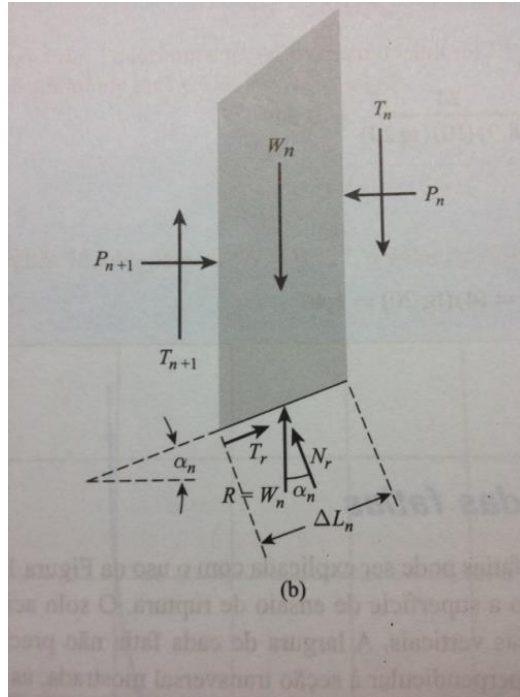


Figura 6 – Forças atuando na n -ésima fatia
Fonte: Das (2012).

Considera-se o equilíbrio com a equação (3).

$$N_r = W_n \cos \alpha_n \quad (3)$$

A força de cisalhamento de resistência mobilizada é expressa por:

$$T_r = \tau_d(\Delta L_n) = \frac{\tau_f(\Delta L_n)}{F_s} = \frac{1}{F_s} [c' + \sigma \operatorname{tg} \phi'](\Delta L_n) \quad (4)$$

A tensão normal σ' é igual a:

$$\frac{N_r}{\Delta L_n} = \frac{W_n \cos \alpha_n}{\Delta L_n} \quad (5)$$

Para o equilíbrio da cunha da Figura 6, o momento da força motriz é igual ao momento da força de resistência mobilizada, equacionando tem-se:

$$F_s = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (c' \Delta L_n + W_n \cos \alpha_n \operatorname{tg} \phi')}{\sum_{n=1}^{n=p} (W_n \operatorname{sen} \alpha)} \quad (6)$$

2.7 MÉTODO DE SPENCER DE ANÁLISE COMPUTACIONAL

O método Spencer foi desenvolvido para análise de superfícies de ruptura circular e irregular. É considerado um método rigoroso, pois cumpre todas as condições de equilíbrio e de fronteira (FERREIRA, 2012).

A ferramenta computacional *SLOPE-W* (Geoslope 2007) permite analisar estabilidade de taludes usando vários métodos. O método de Spencer é considerado um método de alto rigor de análise, pois satisfaz o equilíbrio de forças e momento, e é restrito a uma função constante de forças entre as fatias (GEO-SLOPE..., 2015).

Do ponto de vista matemático, o melhor fator de segurança é obtido por métodos que satisfazem equilíbrio de força e momento (por exemplo, método Spencer, Morgenstern-Price e Equilíbrio Limite Generalizado). Entretanto, mesmo assim é necessário fazer algumas suposições sobre as forças cisalhantes entre as fatias. No caso do método Spencer, assume-se que as forças resultantes entre as fatias são de inclinação constante em toda a massa de deslizamento (GEO-SLOPE..., 2015).

2.8 RETROANÁLISE

Gomes (2003) define retroanálise como fixar condições de contorno do problema. Ao se fixar a geometria inicial do talude, geometria da superfície de ruptura no seu eixo mais crítico e as condições de poropressão, estima-se o ângulo de atrito e o intercepto de coesão do solo, objetivando-se gerar um fator de segurança unitário. Se o fator de segurança calculado for diferente de 1,00, geralmente, o valor do ângulo de atrito é fixado e o valor da coesão é alterado, por tentativas, até que o fator de segurança seja igual a 1,00.

Para a análise ser confiável, um modelo geológico deve determinar a mais provável causa do deslizamento assumindo condições em que ocorreu. A retroanálise é uma ferramenta extremamente importante para estabelecer parâmetros razoáveis para estabilizar o talude, e deve ser realizada com poucas exceções (MACHAN, 2006).

Tang et al. (1999) afirmam que determinar forças de cisalhamento do solo por meio de retroanálise evita muitos dos problemas associados aos testes de laboratório,

sendo amplamente utilizada em reparos de deslizamentos. Retroanálise é um método eficaz para incorporar fatores importantes que não estão bem representados em amostras de laboratório, tais como o tecido estrutural do solo, não homogeneidade, a influência das fissuras na resistência ao cisalhamento do solo, e os efeitos dos planos de corte pré-existentes no solo.

O procedimento de retroanálise permite ainda o uso de margens mais baixas (menos conservadoras) de critérios para o fator de segurança, pois se trabalha muito próximo da iminência de cisalhamento (MACHAN, 2006).

Para os casos onde o solo está saturado, como, por exemplo, durante e ao final da estação chuvosa, a ocorrência de chuvas intensas representa a elevação dos valores de poropressões acima de valores críticos podendo provocar escorregamentos. Durante os períodos de seca, entretanto, os danos causados pelas precipitações relacionam-se aos impactos das gotas sobre o solo que, durante um período chuvoso, poderiam ser absorvido pela vegetação (TONUS, 2009).

É possível ainda aplicar retroanálise para avaliação de deslizamentos em solo e rochas com o propósito de avaliar as forças cisalhantes e os níveis piezométricos, além da análise de medidas de estabilidade. Contudo, para os casos de taludes quase verticais, pode ser necessária a inclusão de tensões de tração, pois a existência desses taludes só se explica pela resistência à tração dos depósitos naturais (USACE, 2003).

Tang et al. (1999) explicam, por fim, que a ruptura do talude fornece apenas um pedaço da informação: o fator de segurança é igual à unidade. Por conseguinte, a resistência ao cisalhamento do solo pode ser variada para se conseguir um fator de segurança igual à unidade. A resistência ao cisalhamento é, geralmente, representada por uma combinação de c' e Φ' , seguindo a equação de Coulomb. Determinar a magnitude apropriada de c' e Φ' é complicado, pois significa também demonstrar a localização da superfície de ruptura. Por exemplo, em encostas de solos homogêneos, existe um Φ' maior do que zero, e a superfície de ruptura, geralmente, passa pelo pé do declive (DUNCAN, 1996 *apud* TANG et al., 1999). No entanto, o aumento do valor de c' com um valor constante de Φ' irá fazer com que a superfície de ruptura crítica passe a se estender mais profundamente no talude, embora ainda saia pelo pé do talude.

Sestrem et al. (2012) realizaram uma retroanálise de estabilidade de um talude rodoviário em uma encosta litorânea de Santa Catarina, no Morro do Boi, situado entre

os municípios de Balneário Camboriú e Itapema. Neste caso, o processo de instabilização teve origem após intensas precipitações ocorridas em novembro de 2008. A partir da sobreposição dos perfis do solo, foi obtida a provável superfície de ruptura (Figura 7).

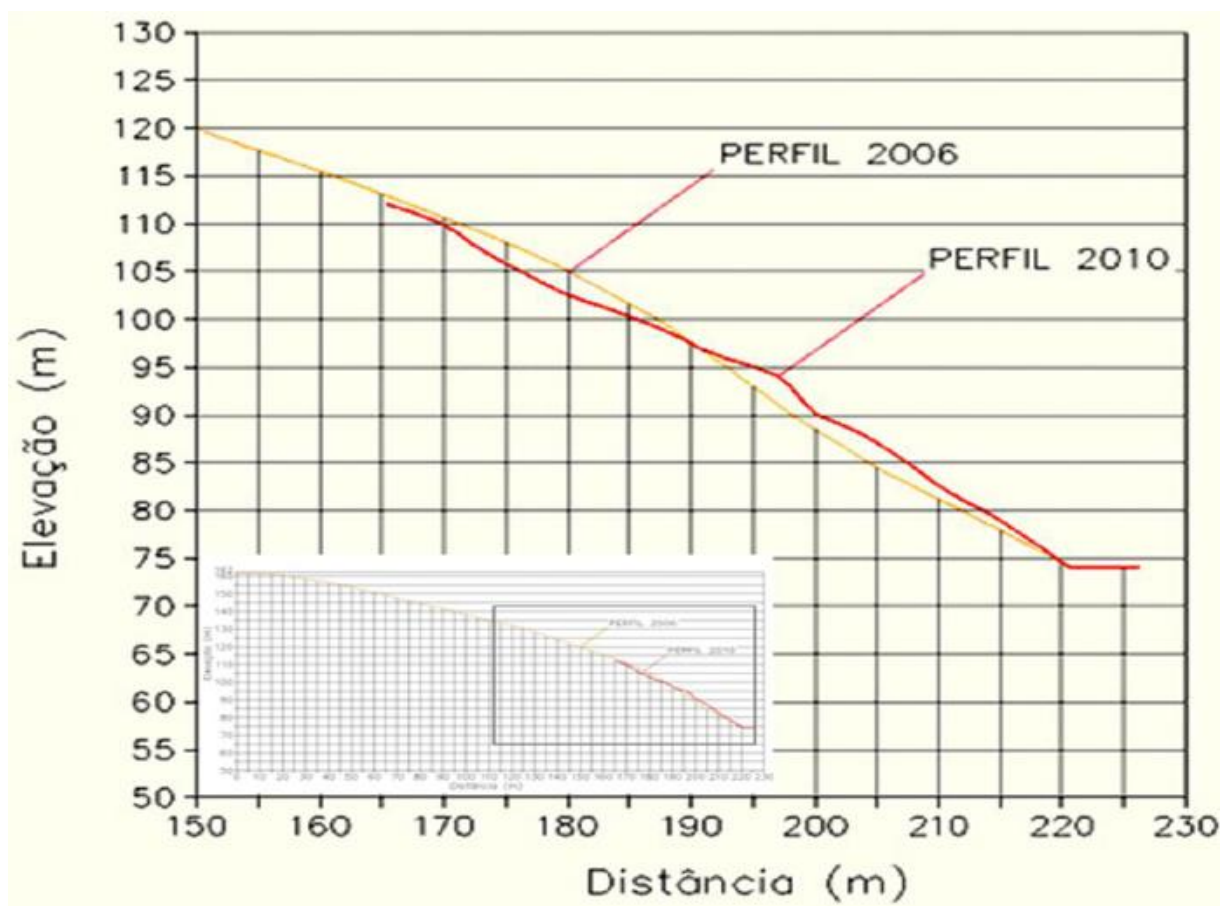


Figura 7 – Perfis representando a superfície antes e depois do deslizamento ocorrido em novembro de 2008

Fonte: Sestrem et al. (2012).

A variação dos parâmetros de intercepto de coesão, fator de atrito e do nível de água foram adotados com base na literatura sobre solos coluvionares e residuais. Na Tabela 3, há a variação dos parâmetros de resistência adotados por Sestrem et al. (2012).

Tabela 3 – Variação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento adotados - 2012

Parâmetro	Mínimo	Máximo	Passo
Intercepto de coesão	3	48	5
Ângulo de atrito	25	42	3
Profundidade do NA	0,5	2	0,5

Fonte: Sestrem et al. (2012).

Na Figura 8, são apresentados os resultados do fator de segurança (FS) para as coesões fixas de 3 kN/m², 8 kN/m², 13 kN/m² e 18 kN/m² (Sestrem et al., 2012).

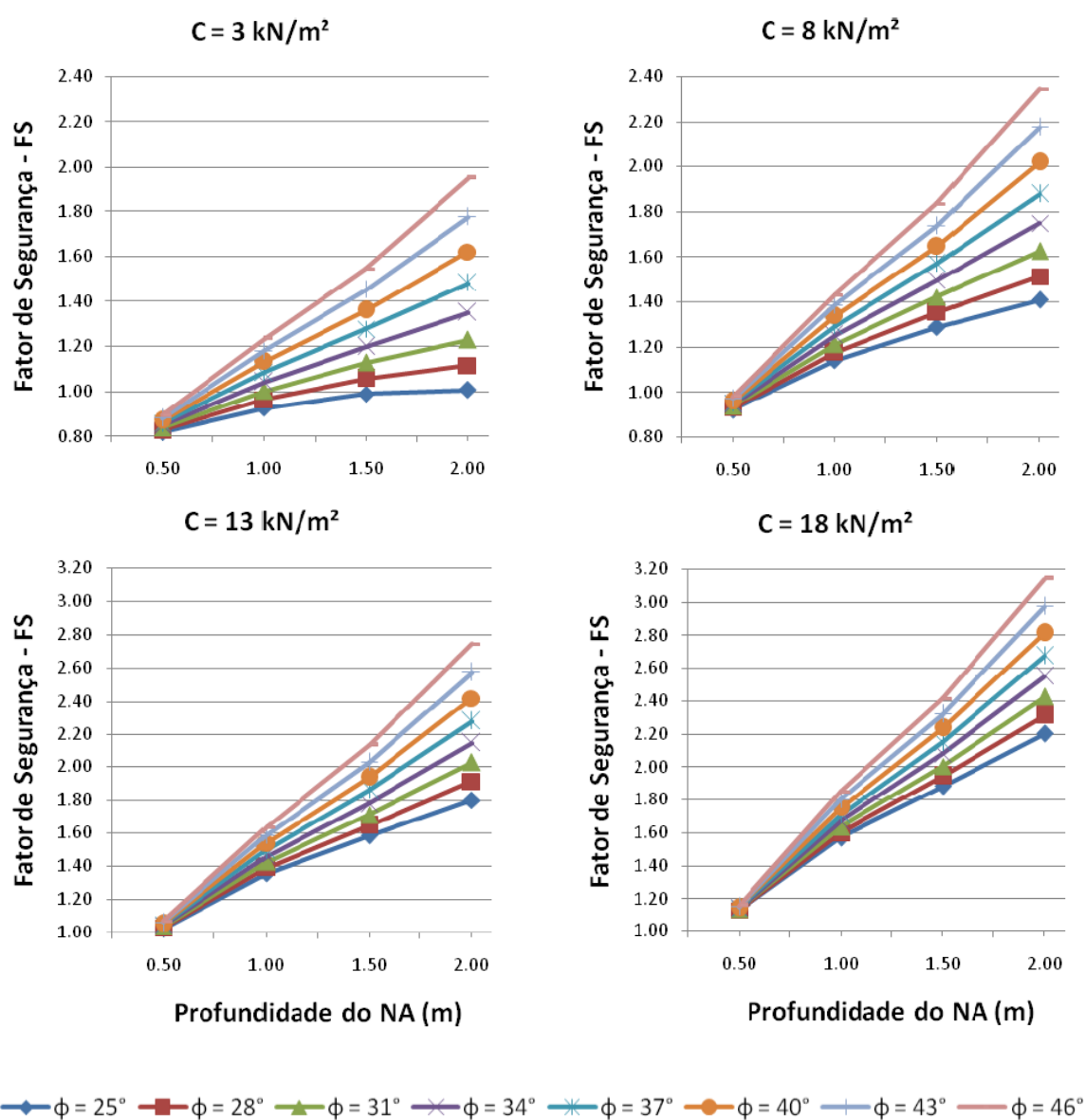


Figura 8 – Resultados do fator de segurança (FS) para as coesões fixas de 3 kN/m²; 8 kN/m²; 13 kN/m² e 18 kN/m²

Fonte: Sestrem et al. (2012).

A partir da retroanálise, Sestrem et al. (2012), constataram que a coesão deve ser inferior a 13 kN/m^2 , pois, para coesões maiores, os valores do fator de segurança são superiores a 1. Notou-se também que, quando a coesão é maior que 8 kN/m^2 e a profundidade do nível de água é menor que 0,70 metros, o fator de segurança não é afetado pelo ângulo de atrito (Φ).

Roesner (2015) realizou uma retroanálise de um escorregamento de solo que ocorreu na rodovia SC-435, na altura do município de Águas Mornas, km 13,8. Trata-se de um talude de corte que teve seu rompimento também no ano de 2008. O solo envolvido é um saprólito de granito que apresentou parâmetros de cisalhamento iguais a $12,8 \text{ kPa}$ como intercepto de coesão, e $33,9^\circ$, como ângulo de atrito, através do ensaio de cisalhamento direto. O perfil do talude, antes do escorregamento, mostrava-se íngreme, especialmente na diretriz do eixo de ruptura, região mais inclinada (Figura 9).

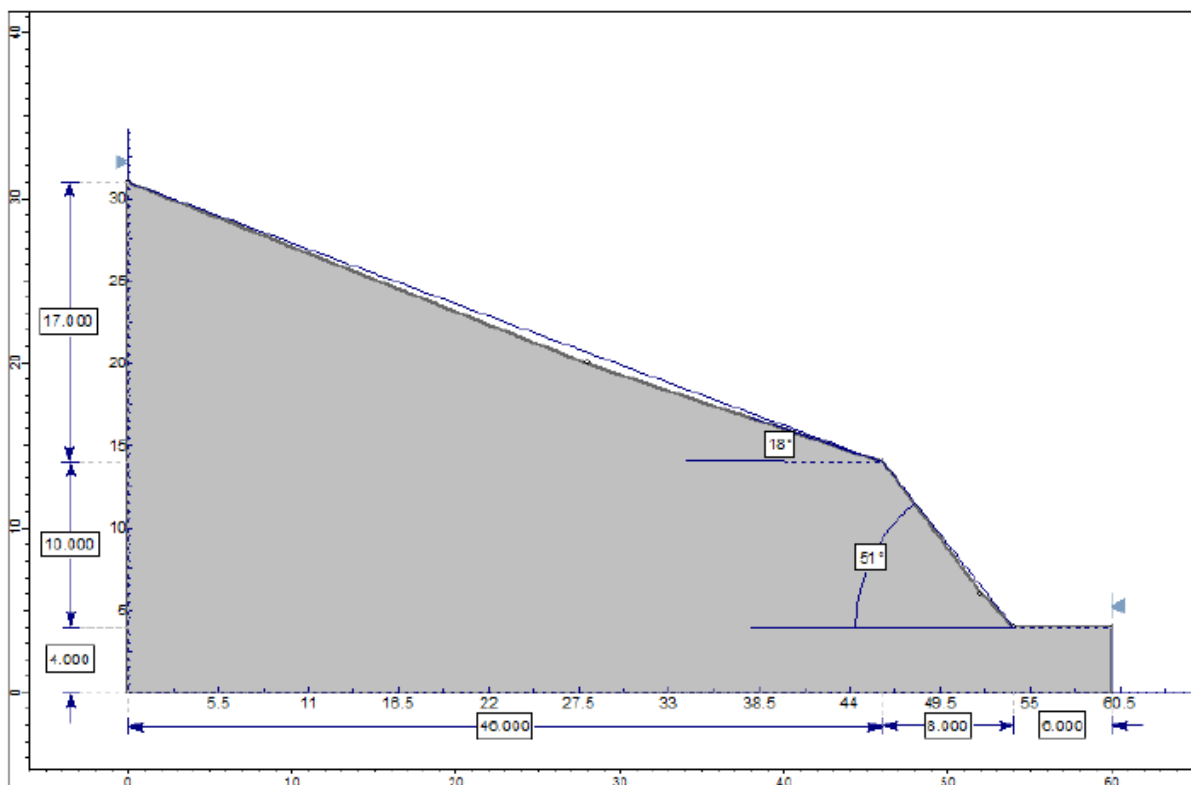


Figura 9 – Seção de corte do talude antes do escorregamento (escala em metros)
 Fonte: Roesner (2015).

A fim de determinar em qual altura se encontrava o nível de água no momento do escorregamento, Roesner (2015) efetuou múltiplas análises nas quais se variou o

nível de água com o objetivo de encontrar a superfície crítica, a qual corresponde ao fator de segurança igual à unidade. Na Figura 10, nota-se que a medida que aumenta o nível de água o fator de segurança diminui. Para que um fator de segurança igual à unidade fosse atingido, verificou-se que a altura do nível de água deveria ser da ordem de 6,75 metros.

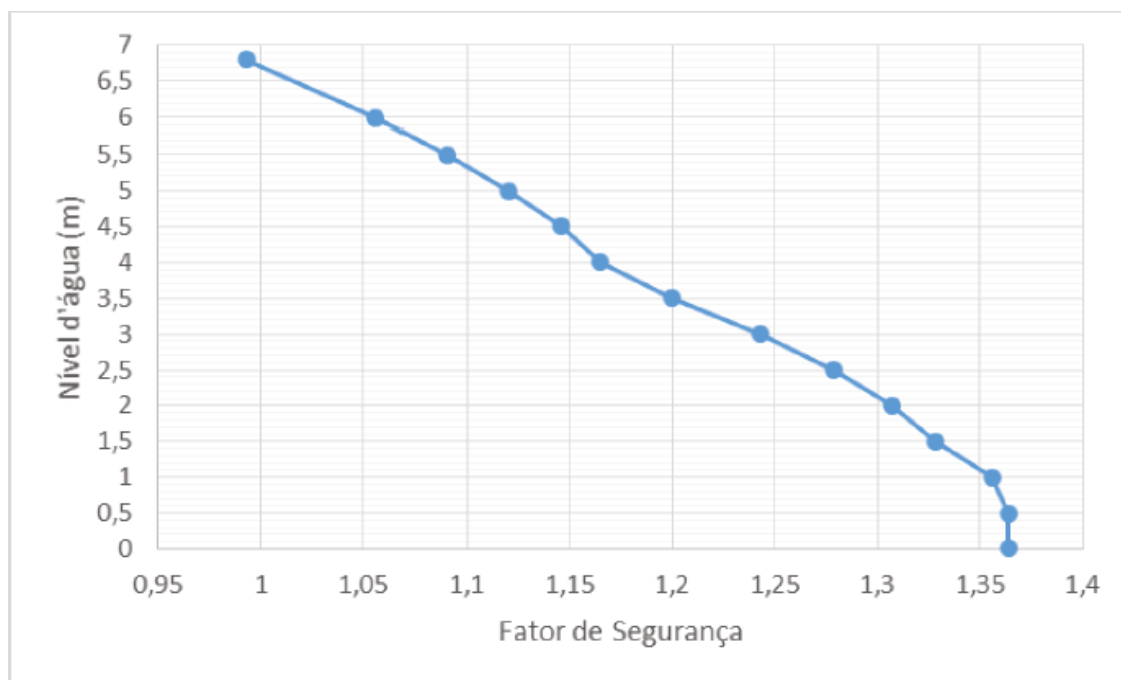


Figura 10 – Relação entre a variação do nível de água e o fator de segurança
 Fonte: Roesner (2015).

2.9 MÉTODOS DE ESTABILIZAÇÃO DE DESLIZAMENTO DE TALUDES

A análise de métodos de mitigação (contenção) deve incluir todos os casos de potenciais falhas e também as existentes falhas geométricas, cada seção do modelo deve ser checada para confirmar que os parâmetros assumidos são consistentes com o real escorregamento do talude (MACHAN, 2006).

O método de obra de estabilização de talude deve ser escolhido levando em conta características do meio físico e os processos de instabilidade envolvidos.

2.9.1 Reconstrução

Uma opção de estabilização de deslizamento de taludes é a reconstrução de aterros. Consiste na escolha da jazida de solo já com umidade na faixa especificada, destorroados e homogeneizados, limpeza do terreno com remoção de vegetação e

entulhos (Figura 11), estocagem de solos superficial e solo com matéria orgânica para utilização na fase final, preparação da superfície de contato entre o terreno natural e o novo aterro em forma de degraus para priorizar uma boa aderência, é importante também a implantação de uma drenagem de base (DEPARTAMENTO DE ESTRADAS..., 1991). Na Figura 12 é mostrado o talude reparado.

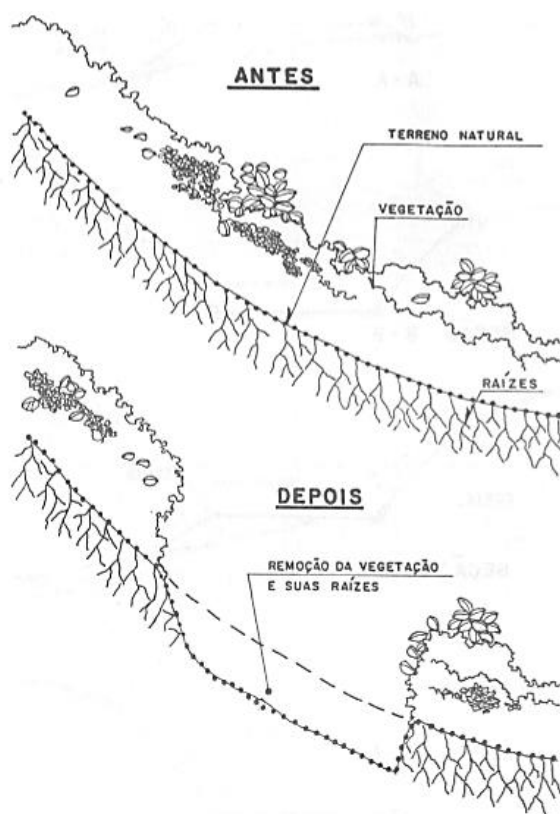


Figura 11 – Preparação do terreno para reconstrução do talude
Fonte: DEPARTAMENTO DE ESTRADAS..., 1991, p. 172.

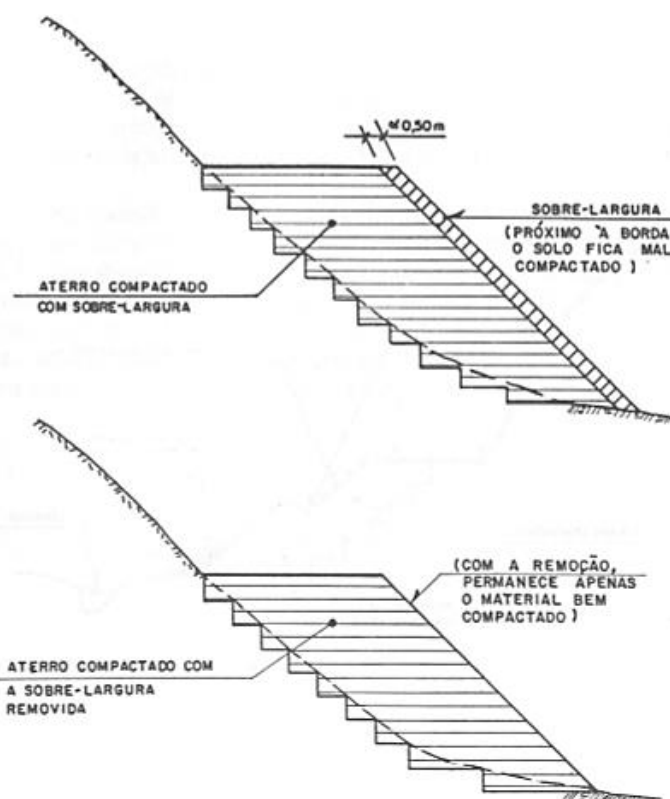


Figura 12 – Reconstrução do talude com sobre largura e posterior remoção
Fonte: DEPARTAMENTO DE ESTRADAS..., 1991, p. 179.

2.9.2 Muro de arrimo tipo “gravidade”

Obras de contenção são soluções comuns na estabilidade de taludes, um exemplo é o muro de arrimo, no qual a reação ao empuxo do solo é proporcionada pelo peso do muro e pelo atrito em sua fundação, função direta deste peso. Esses são chamados de muros do tipo “gravidade” (DEPARTAMENTO DE ESTRADAS..., 1991).

A seguir, uma imagem do muro de arrimo usando pedra (Figura 13 - A) e pedra argamassada (Figura 13 - B) como materiais de contenção:

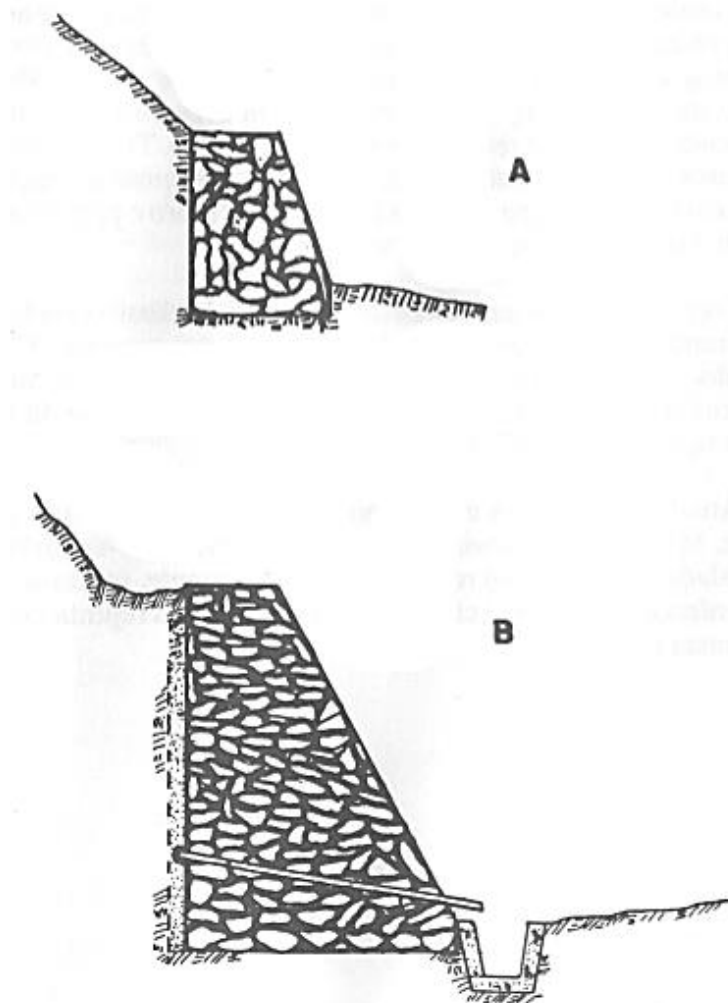


Figura 13 – Muros do tipo “gravidade” de pedra seca e pedra argamassada
 Fonte: DEPARTAMENTO DE ESTRADAS..., 1991, p. 198.

2.9.3 Muro de concreto armado

Associados a execução de aterros, esses muros de arrimo precisam contar com o peso de uma porção de solo adjacente, que funciona como parte integrante da estrutura de arrimo (DEPARTAMENTO..., 1991).

Para grandes alturas, torna-se antieconômica a execução de uma estrutura formada apenas por duas lajes, utilizam-se então nervuras de tração no caso de fundo interna ou compressão no caso de laje externa (DEPARTAMENTO..., 1991).

2.9.4 Cortinas cravadas

Constituída por estacas ou perfis cravados no terreno, trabalhando à flexão e resistindo pelo apoio da parte enterrada do perfil (Figura 14). Muito utilizada em obras

de contenção provisórias, pois o uso de perfis metálicos cravados, nas obras definitivas, não utiliza madeira e os perfis metálicos devem ser protegidos contra corrosão (DEPARTAMENTO DE ESTRADAS..., 1991).

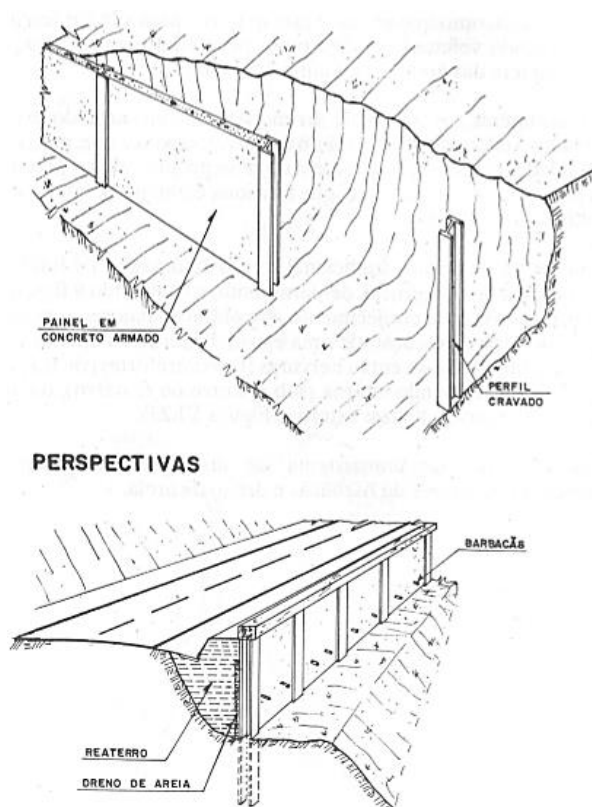


Figura 14 – Estabilização por cortina cravada
 Fonte: DEPARTAMENTO DE ESTRADAS..., 1991, p. 210.

2.9.5 Solo grampeado

O solo grampeado é uma técnica de melhoria de solos, que permite a contenção de taludes por meio da execução de chumbadores, concreto projetado e drenagem. Os chumbadores promovem a estabilização geral do maciço, o concreto projetado fornece estabilidade local e a drenagem age em ambos os casos. Não existe norma específica brasileira para a execução de solo grampeado (SOLOTRAT..., 2001).

Já é uma prática comprovadamente eficiente para a estabilização de taludes de escavações, desde 1970 vem sendo empregada no Brasil, porém, sua experiência bem sucedida só foi divulgada recentemente (ORTIGÃO, 2007).

O método construtivo inicia-se com a primeira linha de chumbadores no talude e aplicado o revestimento de concreto projetado. Como não é necessário cortar o talude, pode-se trabalhar de forma ascendente ou descendente. Simultaneamente ao avanço dos trabalhos, são executados os drenos profundos de paramento e as canaletas ou descidas de água.

Na Figura 15, demonstram-se as partes construtivas de um chumbador.

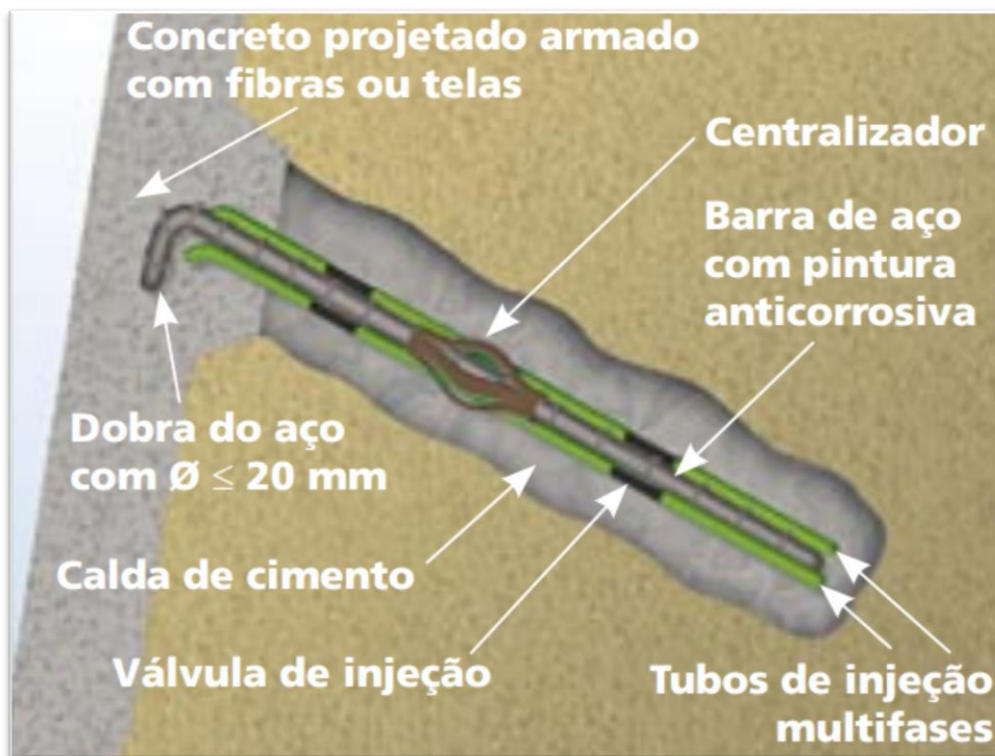


Figura 15 – Partes construtivas de um chumbador
Fonte: SOLOTRAT (2001).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 COLETA DE AMOSTRA DEFORMADA DE SOLO

A coleta de solo deformado foi realizada conforme norma NBR 9604 (ABNT, 1986). Foi extraída uma amostra representativa de aproximadamente 5 kg, próxima ao local do rompimento do talude. Primeiramente foi realizada uma raspagem na vegetação rasteira, posteriormente, através de pequenas pás, foi realizada a escavação. O solo escavado foi colocado em sacos plásticos resistentes e vedado, para assim serem realizados os ensaios de caracterização física do solo, no laboratório de mecânica dos solos do câmpus Curitiba da UTFPR.

3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

A caracterização do solo foi feita por ensaios de granulometria por sedimentação (NBR 7181 - ABNT, 1984), ensaios de limite de liquidez (NBR 6459 - ABNT, 1984), limite de plasticidade (NBR 7180 - ABNT, 1984), e ensaio de determinação da densidade real dos grãos (DNER - 093/1994).

3.3 COLETA DE AMOSTRA INDEFORMADA DE SOLO

A coleta de solo indeformado foi realizada conforme o procedimento definido pela norma NBR 9604 (ABNT, 1986). Segue, na Figura 16, o local onde foram coletadas as amostras.

Primeiramente, foram pesados os 6 moldes usados para a coleta de amostras indeformadas em campo.

A retirada do solo ocorreu após remover a parte superficial do talude, onde se encontra vegetação rasteira.

O solo indeformado coletado é para uso no ensaio de cisalhamento direto. Foram coletados 6 moldes com as dimensões 10x10x2 cm, dimensões as quais são necessárias para utilizar o equipamento de ensaio.

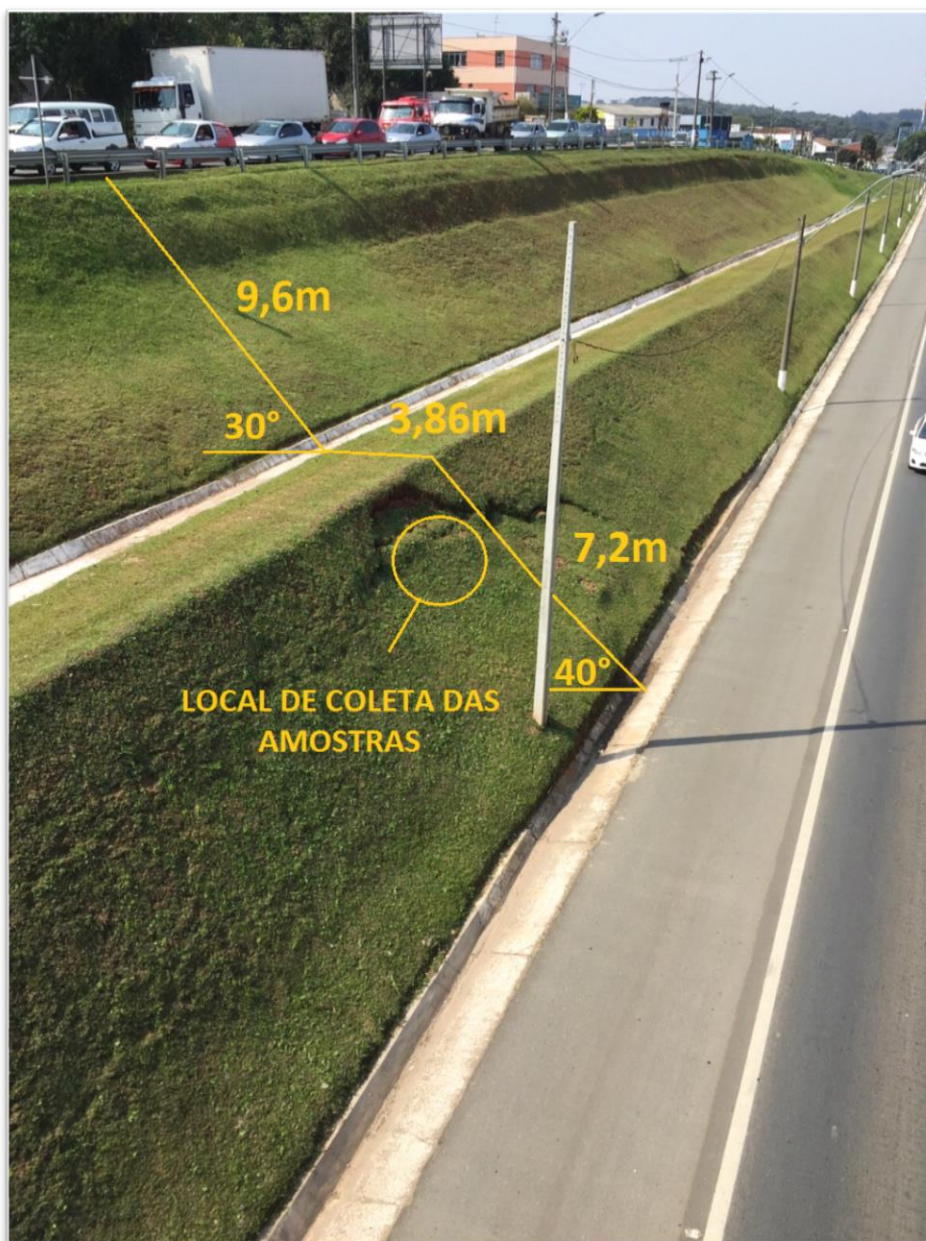


Figura 16 – Vista superior do talude
Fonte: Autoria própria.

Cada molde, após a coleta, foi envolvido com material impermeabilizante, a fim de manter a umidade natural do solo até o laboratório (Figura 17). Todo o material foi transportado até o laboratório de mecânica dos solos do *câmpus* Curitiba da UTFPR, para realização dos ensaios.



Figura 17 – Amostra indeformada de solo do talude
Fonte: Autoria própria.

3.4 COLETA DAS DIMENSÕES DO TALUDE

Com o auxílio de uma trena a *laser* (modelo GLM 50) foram coletadas as dimensões do corpo do talude, as quais foram inseridas numa ferramenta computacional de desenho. Com isso, determinou-se também o ângulo de inclinação do talude.

3.5 ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO

Para a realização do ensaio de cisalhamento direto utilizou-se a norma internacional D3080 (ASTM, 1998) como referência para a execução dos procedimentos.

Para o ensaio foi utilizado o equipamento exibido na Figura 18. Este equipamento é composto por uma caixa de cisalhamento, instrumentos de aplicação

das tensões, elementos que formam uma camada porosa no corpo de prova, elemento de medição da força de cisalhamento e medidores de deslocamento. Este equipamento realiza o ensaio com uma taxa constante de velocidade.



Figura 18 – Equipamento de ensaio para cisalhamento direto
Fonte: Autoria própria.

3.5.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Primeiramente, os corpos de prova foram rasados na altura do molde (em ambos os lados) e pesados em uma balança de precisão.

Nesta etapa, também foram determinados o teor de umidade e o peso específico natural de cada amostra.

3.5.2 ADENSAMENTO (1ª ETAPA)

Na primeira etapa do ensaio, os corpos de prova já na caixa de cisalhamento foram submersos em água e submetidos ao carregamento normal. Os corpos de prova foram mantidos nessa condição até que se atingisse o final do adensamento.

3.5.3 CISALHAMENTO (2ª ETAPA)

Nesta etapa foi aplicada uma força cisalhante ao corpo de prova a uma velocidade constante (velocidade conforme caracterização do solo), registrando computacionalmente o esforço necessário. Foram executados seis ensaios com três diferentes tensões normais (50 kPa, 100 kPa e 200 kPa), a fim de obter uma envoltória de ruptura. Durante o ensaio são registradas as tensões cisalhantes bem como as deformações verticais e horizontais sofridas pelo corpo de prova.

3.6 RETROANÁLISE DO ESCORREGAMENTO

Para realização da retroanálise adotou-se o método Spencer (GEO-SLOPE..., 2015) e a ferramenta computacional SLOPE/W da Geostudio, versão 2007.

Primeiramente, insere-se o modelo do talude estudado. Em seguida, inserem-se os dados do solo do talude conforme propriedades obtidas em laboratório. Deve-se, então, indicar no talude onde será o início e o final do cisalhamento, arbitrando-se a cunha de cisalhamento mais provável. Insere-se um valor de iterações necessárias para os cálculos e realizam-se os cálculos.

4 RESULTADOS

4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO

O ensaio de granulometria por sedimentação (NBR 7181 - ABNT, 1984) apresentou uma curva granulométrica conforme Figura 19.

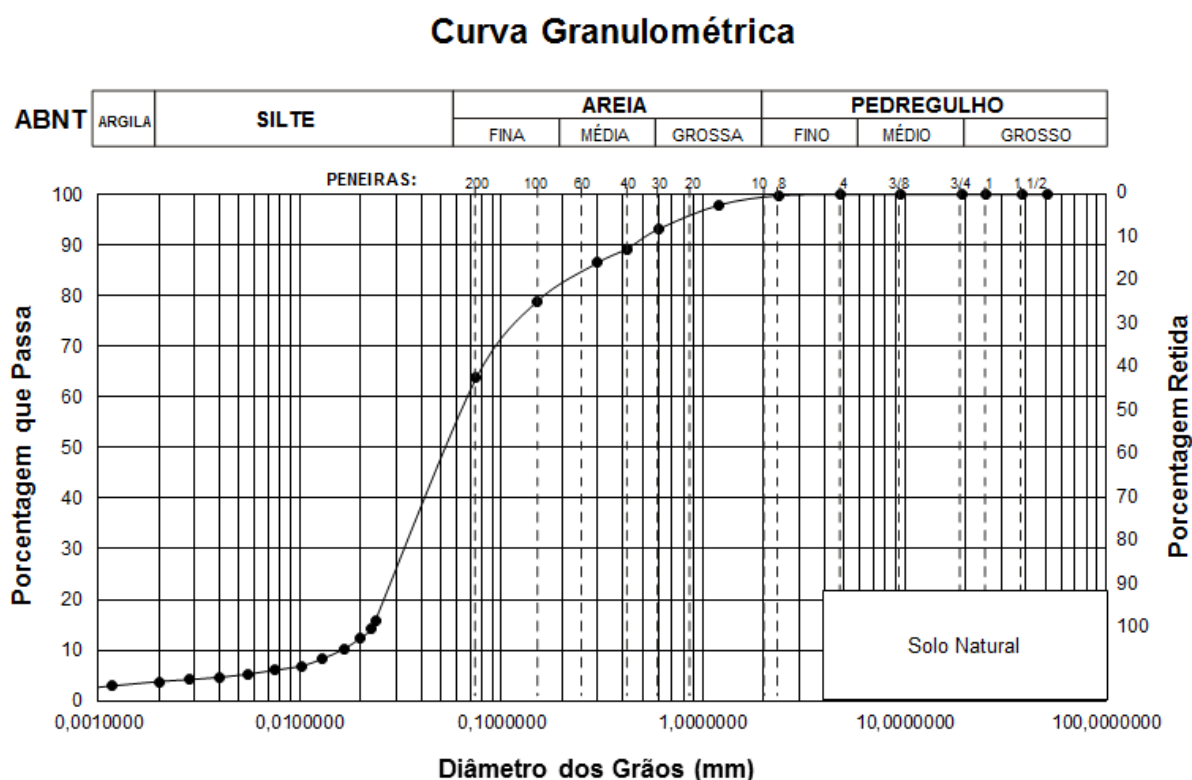


Figura 19 – Curva granulométrica
Fonte: Autoria própria.

A porcentagem de cada fração de solo é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 – Quantidades de cada fração de solo - 2015

Composição Granulométrica (%)					(Escala ABNT)
Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
4%	53%	26%	11%	7%	0%

Fonte: Autoria própria.

O solo analisado apresentou predominância de silte, sendo considerado um solo silto-arenoso, conforme classificação D-2487 (ASTM, 2011).

Para se determinar a densidade real das partículas de solo, foi realizado o ensaio de determinação da massa específica (NBR 6508 - ABNT, 1984), através do picnômetro. Obteve-se como resultado de densidade real dos grãos um valor de 2,95 g/cm³. O relatório de ensaio consta no Apêndice A.

4.2 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

Antes de se realizar o ensaio de cisalhamento direto com os 6 corpos de prova, determinou-se o teor de umidade (após o ensaio) de cada amostra e seu peso específico natural, os dados encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 – Tensão normal, teor de umidade e peso específico natural dos corpos de prova - 2016

	Corpos de Prova					
	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6
Peso específico natural (g/cm ³)	17,07	15,73	16,68	15,78	17,8	16,21
Teor de umidade (%)	48,79	43,23	39,07	45,21	41,68	42,71

Fonte: Autoria Própria.

Após a realização das duas etapas do ensaio, adensamento e cisalhamento, obteve-se, através das medições, o gráfico de tensão cisalhante por deformação cisalhante, representados nos Apêndice B e Apêndice C.

Com os gráficos de tensão cisalhante por deformação cisalhante e suas respectivas tensões no plano de ruptura, foi possível obter a tensão cisalhante máxima aplicada em cada corpo de prova, demonstrada na Tabela 6 e 7.

Tabela 6 – Tensões cisalhantes máximas e tensões normais – 1ª tomada de dados - 2016

Corpo de Prova	Tensão Cisalhante (kPa)	Tensão Normal (kPa)
CP 1	35,03	50
CP 2	55,87	100
CP 3	104,01	200

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 7 – Tensões cisalhantes máximas e tensões normais – 2ª tomada de dados - 2016

Corpo de Prova	Tensão Cisalhante (kPa)	Tensão Normal (kPa)
CP 4	10,03	50
CP 5	57,32	100
CP 6	103,27	200

Fonte: Autoria Própria.

Através da tensão cisalhante e da tensão normal de cada corpo de prova, plotados em um gráfico, traçou-se uma linha de tendência linear, obtendo-se a envoltória de ruptura de resistência ao cisalhamento do solo, demonstrado no Gráfico 1. O resultado do CP 4 foi considerado espúrio após uma análise de desvio padrão, portanto, desconsiderou-se o resultado do CP 4 na envoltória de ruptura de resistência ao cisalhamento.

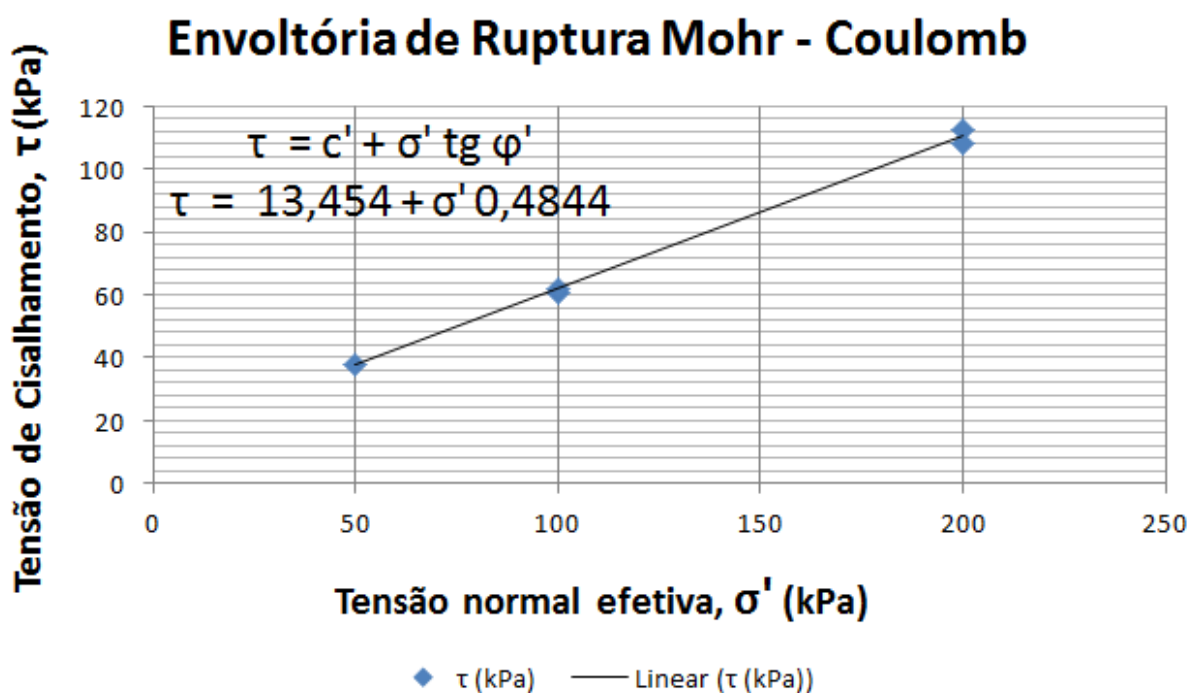


Gráfico 1 – Interpolação dos pontos de ruptura para obtenção da envoltória de Mohr-Coulomb
 Fonte: Autoria Própria.

Através da equação desta reta, obtiveram-se, os valores de intercepto de coesão e ângulo de atrito interno, demonstrados na Tabela 8. Na mesma tabela está a média do teor de umidade e do peso específico natural das amostras.

Tabela 8 – Intercepto de coesão e ângulo de atrito interno - 2016

Intercepto de coesão (c') (kN/m ²)	13,45
Ângulo de atrito interno (ϕ') (em graus)	25,85
Teor de umidade do solo (w) (%)	43,45
Peso específico natural (ϕ') (g/cm ³)	16,54

Fonte: Autoria Própria.

4.2 RETROANÁLISE DA ESTABILIDADE DO TALUDE

A geometria do talude está exposta na Figura 20, assim como os parâmetros do solo.

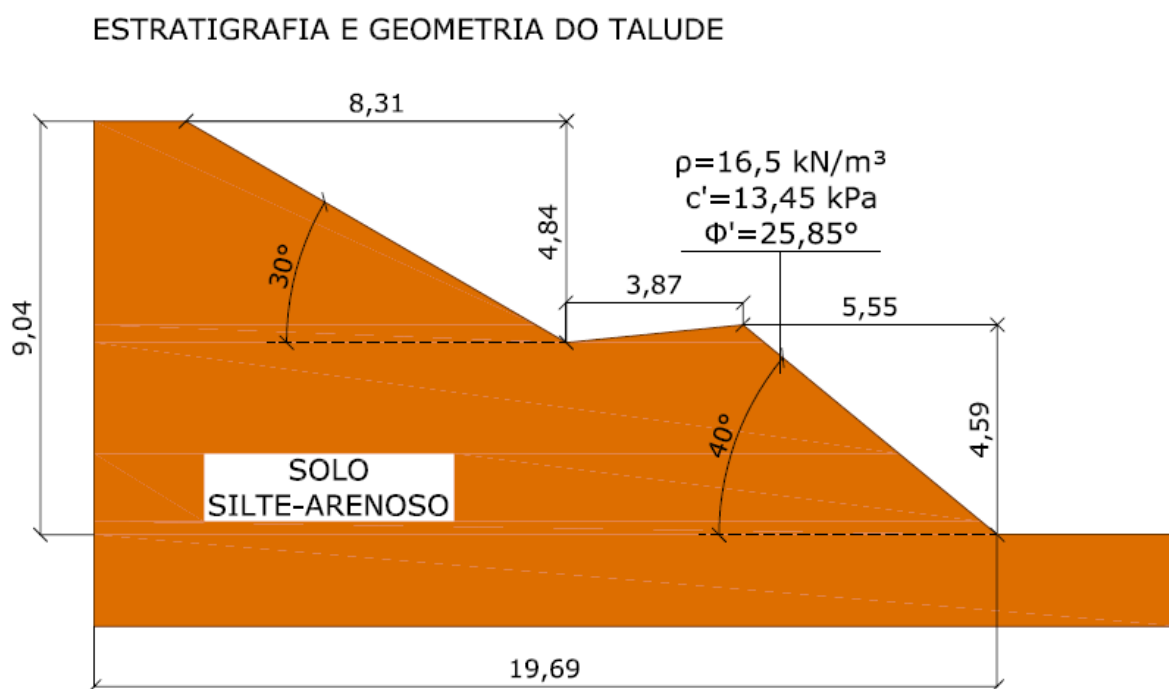


Figura 20 – Estratigrafia e geometria do talude (em metros)

Fonte: Autoria própria.

A análise de estabilidade foi realizada através do critério de ruptura Mohr-Coulomb, o qual é satisfeito ao longo de toda superfície de ruptura.

Na Figura 21, é apresentada a análise de estabilidade do talude em estado seco, obtendo um fator de segurança (FS) igual a 2,18, através do método de Spencer, em iterações geradas pela ferramenta computacional *SLOPE-W* (Geoslope 2007).

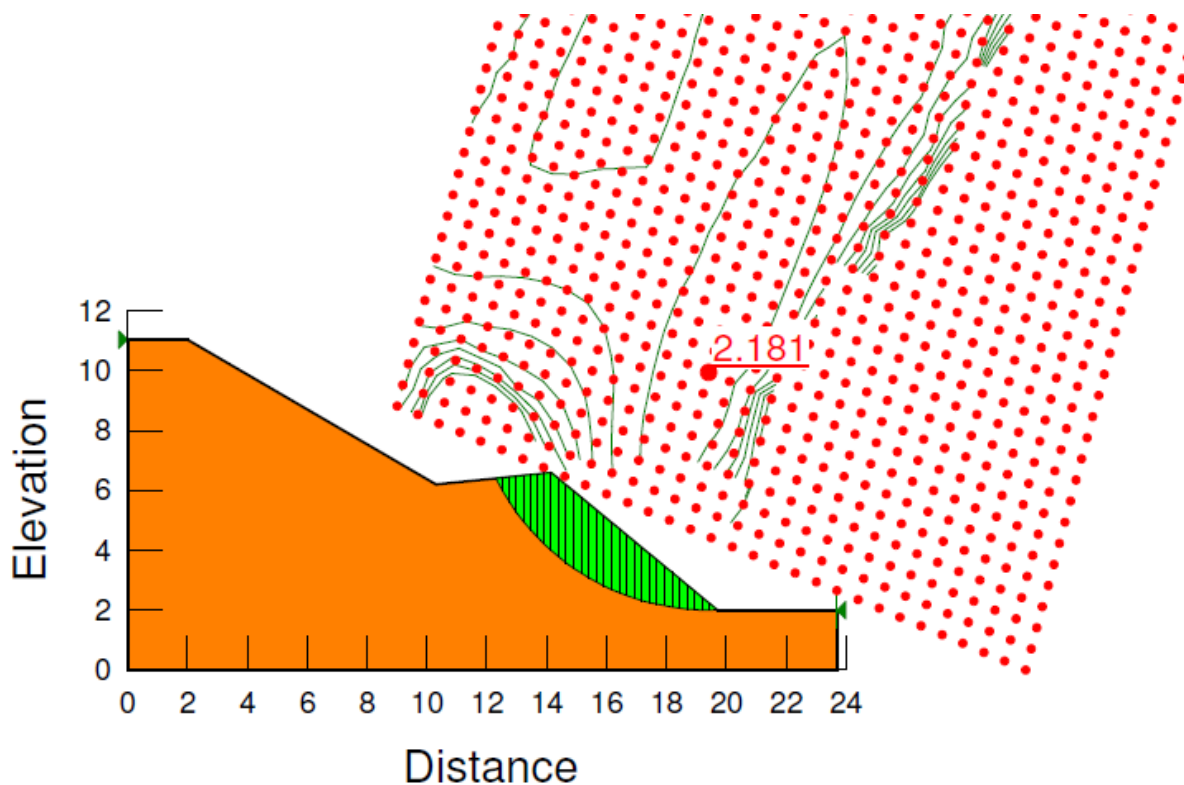


Figura 21 – Talude seco analisado pela ferramenta computacional (distância e elevação em metros)

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 22, é apresentada a análise de estabilidade do talude em estado parcialmente saturado, obtendo um fator de segurança (FS) igual a 1,42, através do método de Spencer, em iterações geradas pela ferramenta computacional *SLOPE-W* (Geoslope 2007).

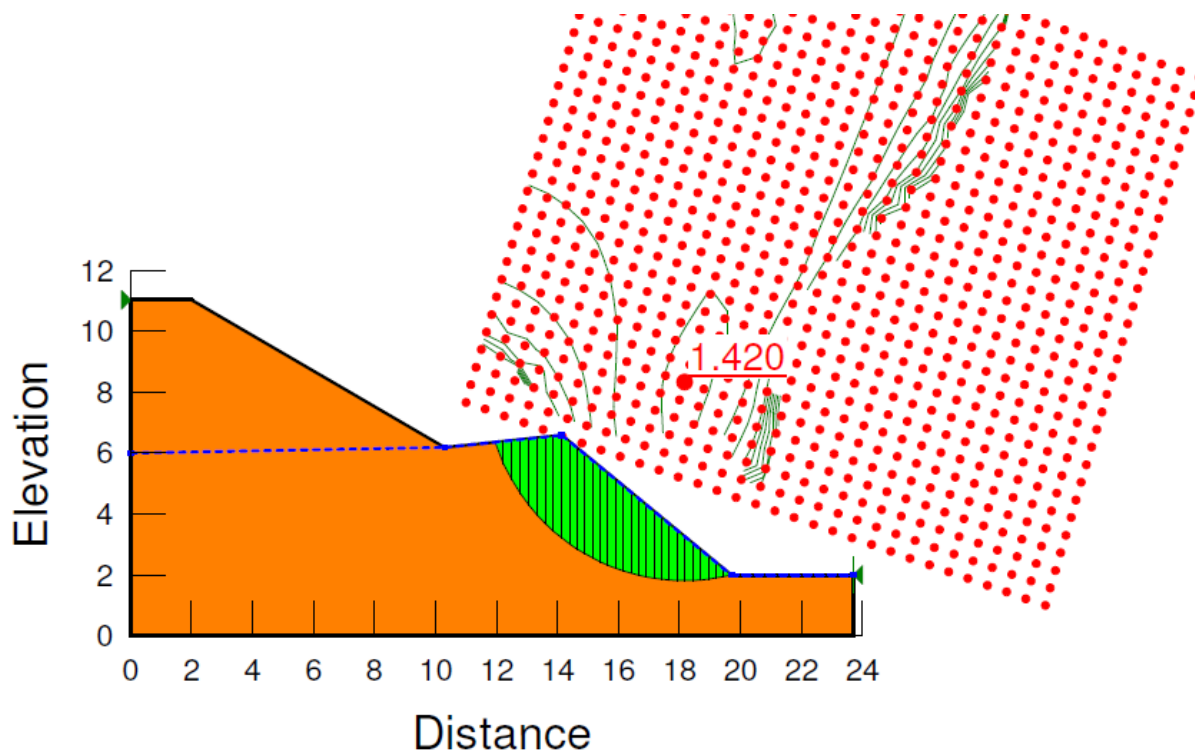


Figura 22 – Talude parcialmente saturado analisado pela ferramenta computacional (distância e elevação em metros)
Fonte: Autoria própria.

As hipóteses assumidas em uma retroanálise por Equilíbrio Limite para um talude rompido são: a existência de uma superfície de ruptura bem definida; a massa de solo encontra-se em situação de ruptura iminente; o fator de segurança ao longo de toda a superfície é igual à unidade.

Como o talude apresentou estabilidade, fizeram-se simulações do talude parcialmente saturado, reduzindo o intercepto de coesão obtido em laboratório de 13,45 kPa até um valor onde o fator de segurança resulta-se na unidade.

O Gráfico 2, apresenta a relação do intercepto de coesão do talude parcialmente saturado com o fator de segurança. Para que um fator de segurança igual a unidade fosse atingido, verificou-se que o intercepto de coesão do talude parcialmente saturado deveria ser igual a 8,62 kPa.

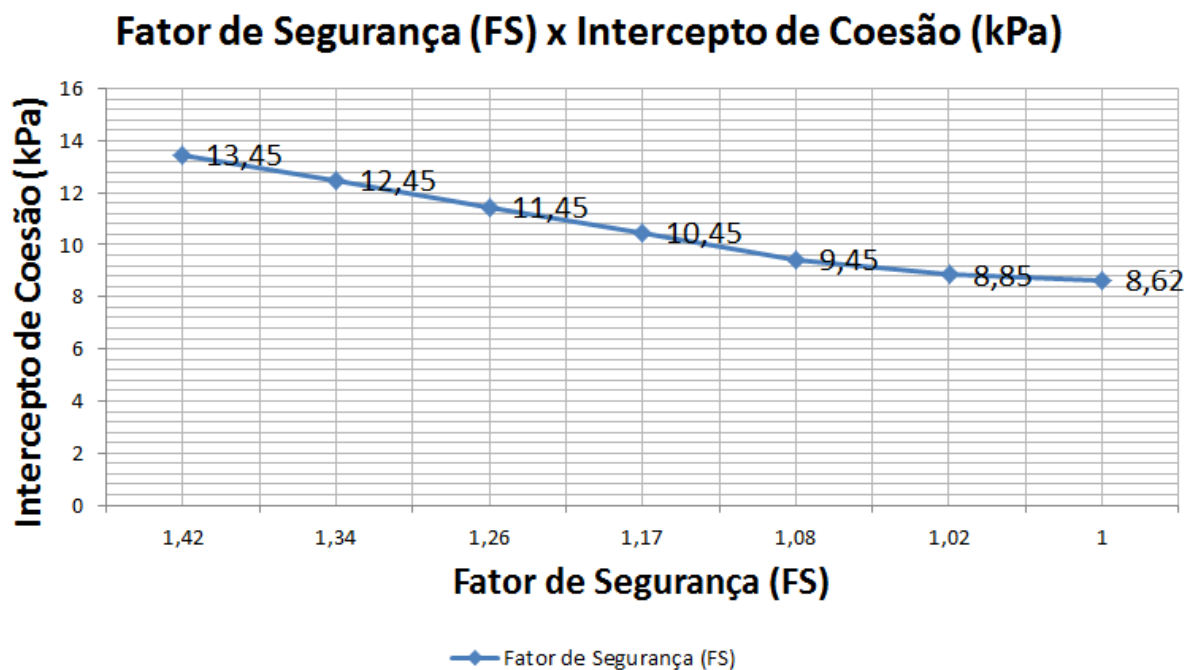


Gráfico 2 – Fator de segurança (FS) x Intercepto de coesão (kPa)
Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 23, é apresentada a análise de estabilidade do talude em estado parcialmente saturado e com o intercepto de coesão reduzido para 8,62 kPa, obtendo um fator de segurança (FS) igual a unidade, na iminência de cisalhar, através do método de Spencer, em iterações geradas pela ferramenta computacional *SLOPE-W* (Geoslope 2007).

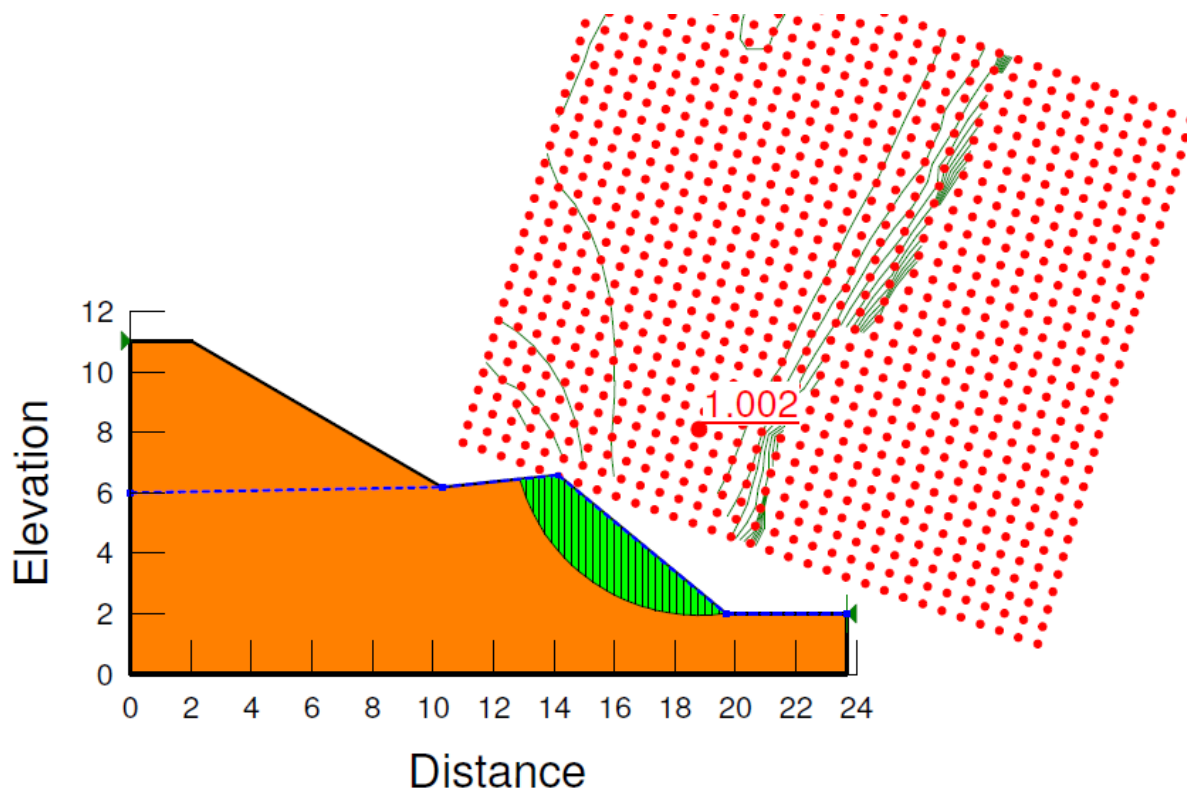


Figura 23 – Talude parcialmente saturado com coesão reduzida analisado pela ferramenta computacional (distância e elevação em metros)

Fonte: Autoria própria.

Como o talude apresenta um fator de segurança, para o caso parcialmente saturado, menor que 1,5 (valor recomendado pela norma NBR 11682 (ABNT, 2002)), adotou-se a instalação de drenos profundos de 2,5 metros de comprimento cada, espaçados em 1,5 metros, para assim obter o fator de segurança acima de 1,5 desejado. Na Figura 24, é apresentada a análise de estabilidade do talude em estado parcialmente saturado e com o intercepto de coesão igual a 13,45 (valor obtido em laboratório), aplicados os drenos profundos, obtendo um fator de segurança (FS) igual a 1,62, através do método de Spencer, em iterações geradas pela ferramenta computacional *SLOPE-W* (Geoslope 2007).

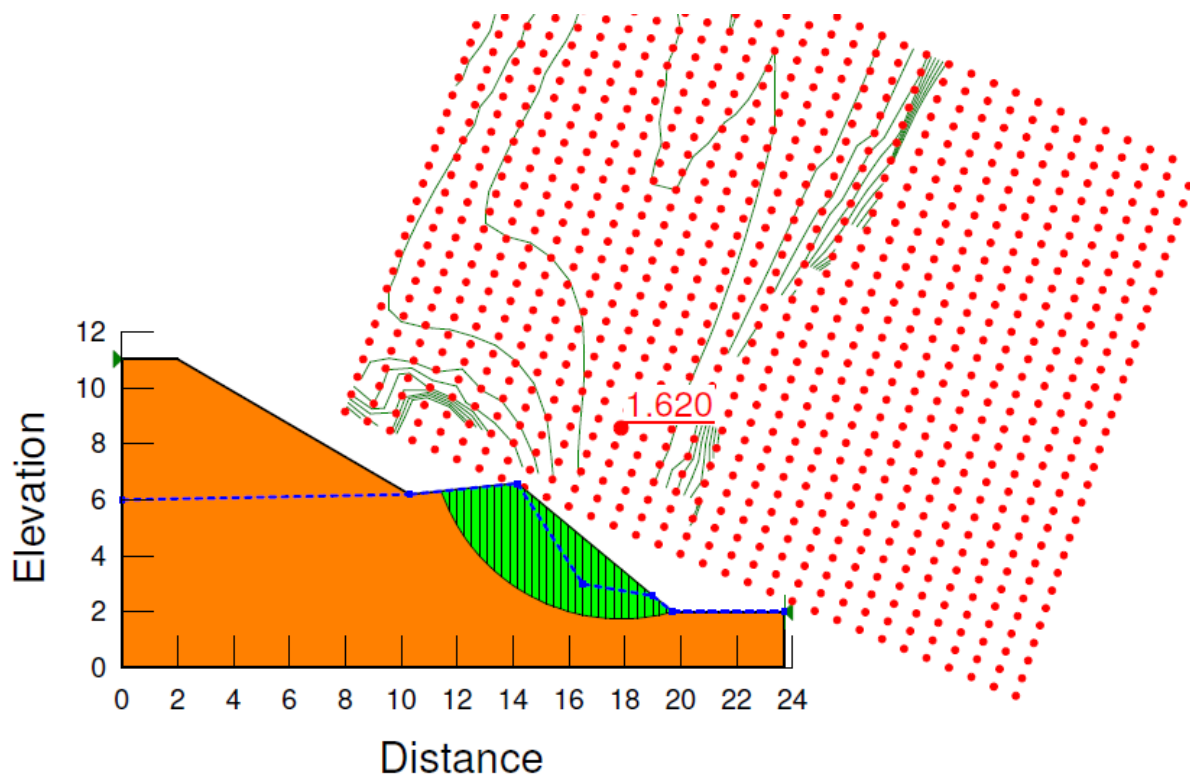


Figura 24 – Talude parcialmente saturado com dreno analisado pela ferramenta computacional (distância e elevação em metros)
Fonte: Autoria própria.

Também se recomenda recompor o ponto de rompimento de talude, inclusive sua vegetação gramínea.

As superfícies do talude seco e parcialmente saturado apresentam um fator de segurança acima da unidade, ou seja, numa situação de equilíbrio. Com este resultado, não é necessário a aplicação de uma contenção para equilibrar o talude.

6 CONCLUSÕES

Como existe uma ruptura rotacional no talude, surgiu a preocupação com a estabilidade do talude à beira de uma rodovia de alto fluxo de veículos e caminhões. Quando existe uma ruptura, é possível estimar suas causas através da retroanálise, variando parâmetros do solo obtidos em laboratório e deduzindo possíveis causas de deslizamento.

O solo analisado, inserido na formação Guabirota, está classificado como silte-arenoso, conforme norma D-2487 (ASTM, 2011). Seus parâmetros de cisalhamento, obtidos em laboratório, são 13,45 kPa para intercepto de coesão e $25,85^\circ$ para ângulo de atrito interno. Seu peso específico natural é $16,5 \text{ kN/m}^3$.

O talude encontra-se estável no ponto de ruptura existente, pois seu fator de segurança com o talude seco é igual a 2,18, e com o talude parcialmente saturado é igual a 1,42. Visto que o talude encontra-se rompido, levanta-se a questão de saber quais foram as alterações que se deram entre a estabilidade e o escorregamento do talude, já que o talude não poderia ter deslizado possuindo forças estabilizadoras maiores que forças instabilizadoras.

Possíveis causas do rompimento do talude foram levantadas. A primeira hipótese seria uma ruptura devido a uma infiltração localizada no patamar justamente acima, devido às falhas na drenagem fluvial do patamar, ocasionando um fluxo de água que conseqüentemente removeu uma parcela significativa de finos do solo com o tempo. Dentro desta hipótese, o intercepto de coesão do solo poderia ter diminuído para 8,62 Kpa (Figura 23), chegando assim no fator de segurança unitário. Acredita-se que esta hipótese seja a mais provável.

Outra hipótese plausível, seria uma lente no local da ruptura, abaixo do ponto de coleta de solo, com parâmetros de resistência inferiores aos obtidos em laboratório.

Como o talude apresenta um fator de segurança, para o caso parcialmente saturado, menor que 1,5 (valor recomendado pela norma NBR 11682 (ABNT, 2002), adotou-se a instalação de drenos profundos de 2,5 metros de comprimento cada, espaçados em 1,5 metros, para assim obter o fator de segurança acima de 1,5 desejado. Também se recomenda recompor a massa de solo e a vegetação do ponto de rompimento do talude.

Como as superfícies do talude seco e parcialmente saturado apresentam um fator de segurança acima da unidade, ou seja, numa situação de equilíbrio, não é necessário a aplicação de uma contenção para equilibrar o talude.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D 3080: **Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions**. West Conshohocken, Estados Unidos, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: **Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização: método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1986.

_____. NBR 6459: **Solo – Determinação do Limite de Liquidez: método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1984.

_____. NBR 7180: **Solo – Determinação do Limite de Plasticidade: método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1984.

_____. NBR 7181: **Solo - Análise Granulométrica: método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1984.

_____. NBR 9604: **Abertura de poço e trincheira de inspeção de solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas**. Rio de Janeiro, 1986.

_____. NBR 11682: **Estabilidade de taludes**. Rio de Janeiro, 2009.

BIANCHINI, M. R. **Estudo da Instabilidade de um Talude Rodoviário em São Jerônimo/RS**. 2000. 108 f. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2000.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2015**. Disponível em: <
http://pesquisarodoviascms.cnt.org.br/Relatorio%20Geral/PESQUISA_CNT2015_BAI_XA.pdf>. Acesso em: 22 set. 2015.

CRAIG, Robert F. **Mecânica dos solos**. 365 p. Rio de Janeiro: LTC, 7. ed., 2007.

DAS, BRAJA M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 610 p. São Paulo: Cengage Learning, 2013.

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS. **Descrição de ensaio de cisalhamento direto**. Disponível em: <<http://www.labgeo.ufscar.br/ensaios.php?item=7>>. Acesso em: 26 ago. 2015.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Taludes de rodovias**: orientação para diagnóstico e soluções de seus problemas. São Paulo, 1991.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Solos – Determinação da densidade real**: método de ensaio. DNER 093. Brasília, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Evolução do perfil da rede rodoviária federal pavimentada**. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/download/planejamento-e-pesquisa/planejamento/evolucao-da-malha-rodoviaria/evolucao-da-condicao-da-malha-ate-2011-por-uf-2001-a-2014-sf.pdf>>. Acesso em: 17 set. 2015.

FERREIRA, João L. F. **Análise de Estabilidade de Taludes pelos Métodos de Janbu e Spencer**. 2012. 144 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.

GEO-SLOPE INTERNATIONAL LTDA. **GUIA DE USUÁRIO SLOPE/W**. Disponível em: < <https://geotechinternship.files.wordpress.com/2015/06/documentation.pdf>>. Acesso em: 12 jan. 2016.

GOMES, Claudio L. R. **Retroanálise em Estabilidade de Taludes em Solo: Metodologia para Obtenção dos Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento**.

2003. 167 f. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2003.

KORMANN, Alessandro C. M. **Comportamento Geomecânico da Formação Guabirotuba: estudos de campo e laboratório**. 2002. 448 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Solos) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MACHAN, G. **Landslide Mitigation**. Engineering Geology and Geotechnical Engineering Symposium. Logan, Estados Unidos, 2006.

MINEROPAR. **Características geológico-geotécnicas na formação Guabirotuba: Erosão – movimentos gravitacionais de massa**. Curitiba: Serviço Geológico do Paraná – Mineropar, 2011.

ORTIGÃO, José A. R. **Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos**. 386 p. São Paulo: Terratek, 3ª ed., 2007.

ROAD TRAFFIC TECHNOLOGY. **The world's biggest road networks**. Londres, jan. 2014. Disponível em: <http://www.roadtraffic-technology.com/features/featurethe-worlds-biggest-road-networks-4159235>. Acesso em: 15 set. 2015.

RODRIGUES, Isabel M.; COLMENERO, João C. A importância da manutenção das rodovias para o sistema de redes logísticas. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, XXIX, 2009, Salvador, Bahia. **A engenharia de produção e o desenvolvimento sustentável: integrando tecnologia e gestão**. Disponível em: <http://pg.utfpr.edu.br/dirppg/ppgep/ebook/2009/CONGRESSOS/Nacionais/2009%20-%20enegep/1.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2016.

Sestrem, L. P.; Dyminski, A. S.; Kormann, A. C. M.; Santos, C. J. A. dos. **Retroanálise de estabilidade de talude rodoviário em uma encosta litorânea em Santa Catarina, 2012**. COBRAMSEG 2012, Porto de Galinhas, PE. Disponível em:

<<http://www.cobramseg2014.com.br/anais/2012/arquivos/2012.175.pdf>>. Acesso em: 21 jan. 2016.

SOLOTRAT ENGENHARIA GEOTÉCNICA. **Manual de solo grampeado**. São Paulo, 2001. Disponível em: <http://www.solotrat.com.br/ws/manual/pt_ManSoloGrampeado.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2016.

TANG, Wilson H.; STARK, Timothy D.; ANGULO, Mauricio. Reliability in back analysis of slope failures. **Soils and Foundations**, Tokyo, v. 39, n. 5, p. 73-80, out. 1999. Disponível em: <https://www.jstage.jst.go.jp/article/sandf1995/39/5/39_5_73/_article>. Acesso em: 28 ago. 2015.

Tonus, Bianca P. A. **Estabilidade e Taludes: avaliação dos métodos de equilíbrio limite aplicados a uma encosta coluvionar e residual da serra do mar paranaense**. 2009. 147 f. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2009.

UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Slope Stability**. Engineer Manuals 1110-2-1902. Department of the army. Washington, Estados Unidos, 2003.

Zirlis, Alberto C. Solo grampeado. **Revista Técnica**, São Paulo, edição 57, dez. 2001. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/57/artigo287231-1.aspx>>. Acesso em: 17 jan. 2016.

APÊNDICE A - DENSIDADE REAL DOS GRÃOS

UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná
 Laboratório de Mecânica dos solos
 ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE REAL DOS GRÃOS

DATA: DEZ 2015

Densidade real dos Grãos

Nº Picnômetro	Peso Picn. Vazio seco e limpo (g)	Peso Picn. + solo (g)	Peso Picn. + água (g)	Peso Picn. + solo + água (g)	Densidade real à temp. 23,3°C (adim.)	Densidade real à temp. 20°C (corrigido) (adim.)	Média
3	69,13	92,74	168,44	184,16	2,99239544	2,990301	2,947021
7	68,32	92,02	167,94	183,64	2,96250000	2,960426	
8	53,58	80,01	153,23	170,65	2,93340733	2,931354	
11	63,48	91,51	162,88	181,26	2,90466321	2,902630	
13	42,94	68,63	142,57	159,62	2,97337963	2,971298	
14	44,24	68,49	144,02	160,04	2,94653706	2,944474	
30	60,61	83,19	160,22	175,15	2,95163399	2,949568	

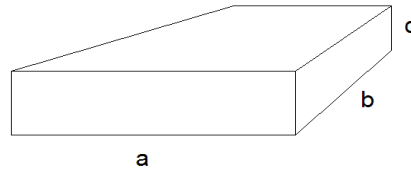
Média	2,950007
D. Padrão	0,02831
Lim.Superior	2,978318
Lim. Inferior	2,921697
D. dentro	71%

DADOS EM VERDE SÃO OS
 CONSIDERADOS,
 CONFORME NORMA

APÊNDICE B - CISALHAMENTO DIRETO CP 1, 2 E 3

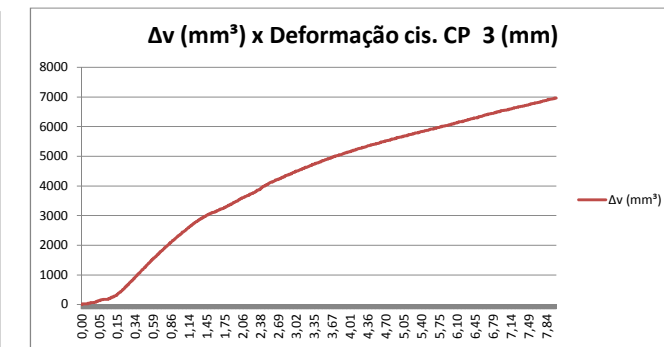
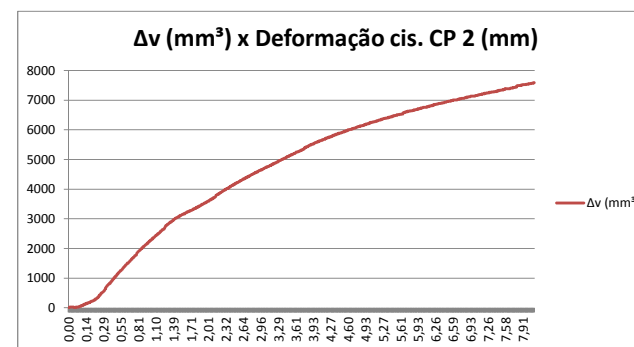
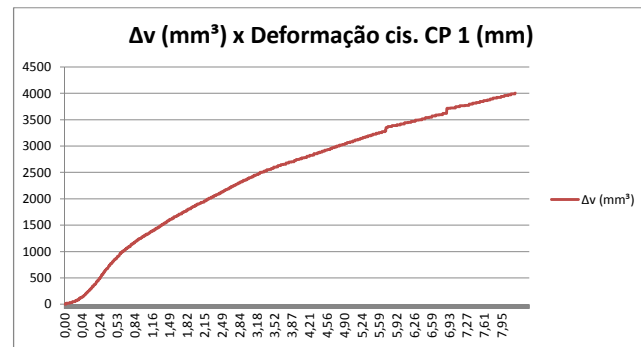
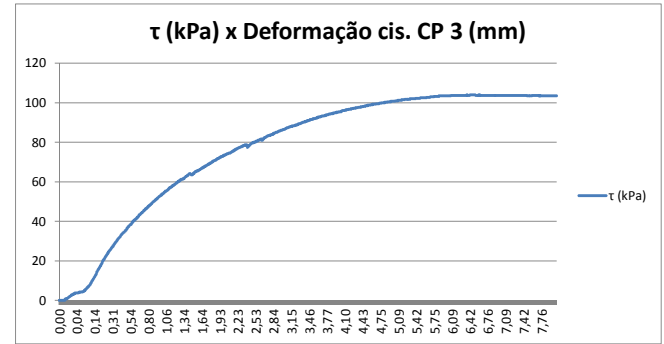
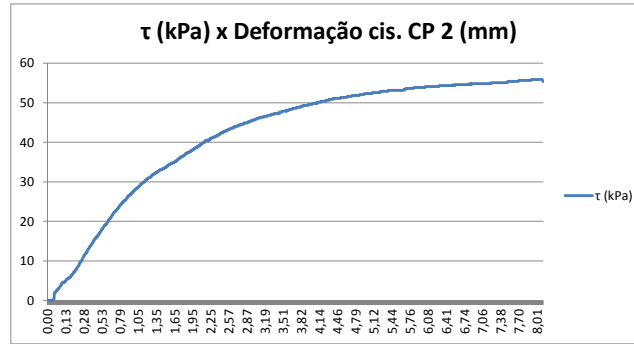
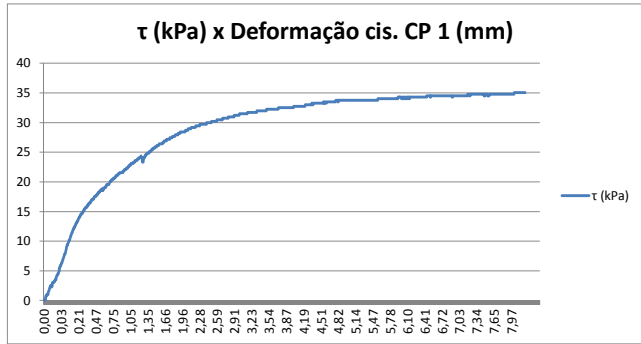
UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná
 Laboratório de Mecânica dos solos
 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO - CPS 1, 2 E 3
 DATA: JAN 2016

Cp 1	a=	9,87	9,93	9,95	Média=	99,166667	peso amostra + molde:	608,78
	b=	9,82	9,95	9,89	Média=	98,866667	peso molde:	272,91
	c=	2,01	2,01	2	Média=	20,066667	peso unitário natural:	17,07184
Cp 2	a=	9,95	9,98	9,95	Média=	99,6	peso amostra + molde:	601,56
	b=	9,98	9,95	9,99	Média=	99,733333	peso molde:	286,97
	c=	2,02	2,01	2,01	Média=	20,133333	peso unitário natural:	15,73003
Cp 3	a=	9,96	9,96	9,99	Média=	99,7	peso amostra + molde:	614,43
	b=	10,01	9,96	9,98	Média=	99,833333	peso molde:	276,35
	c=	2,04	2,04	2,03	Média=	20,366667	peso unitário natural:	16,67742
							Média	16,4931



- Dados:
- l vi : leitura vertical
 - l hi : leitura horizontal
 - Δv_i : variação vol. Do cp
 - Ti : força cisalhante
 - l mi : leitura do anel
 - K : constante do anel
 - ϵ : deformação cis. Específica
 - σ : tensão normal aplicada

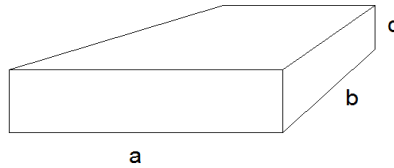
GRÁFICOS



APÊNDICE C - CISALHAMENTO DIRETO CP 4, 5 E 6

UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná
 Laboratório de Mecânica dos solos
 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO - CPS 4, 5 E 6
 DATA: JAN 2016

Cp 4	a=	9,93	9,9	9,96	Média=	99,3333	mostra + molde:	621,64
	b=	9,93	9,96	10,1	Média=	99,9667	peso molde:	281,82
	c=	2,01	2,01	2	Média=	20,0667	unitário natural:	17,05962
Cp 5	a=	9,93	9,97	9,99	Média=	99,6333	mostra + molde:	629,07
	b=	9,98	10	9,96	Média=	99,8	peso molde:	277,95
	c=	1,97	2	1,98	Média=	19,8333	unitário natural:	17,80429
Cp 6	a=	10	9,98	9,97	Média=	99,8333	mostra + molde:	571,57
	b=	9,98	9,98	10,02	Média=	99,9333	peso molde:	287,19
	c=	2,03	2	1,99	Média=	20,0667	unitário natural:	14,20489
							Média	16,35627



Dados:
 l vi : leitura vertical
 l hi : leitura horizontal
 Δvi : variação vol. Do cp
 Ti : força cisalhante
 l mi : leitura do anel
 K : constante do anel
 ε : deformação cis. Específica
 σ : tensão normal aplicada

GRÁFICOS

