

N. CLASS. MG24.151363
CUTTER M5782
ANO/EDIÇÃO 2014

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ANDRÉ FIGUEIREDO MESQUITA

**RETROANÁLISE EM TALUDE RODOVIÁRIO – ESTUDO DE CASO: Talude
localizado no km 758+500 pista norte da Rodovia Fernão Dias (BR 381).**

**Varginha
2014**

FEPESMIG

ANDRÉ FIGUEIREDO MESQUITA

**RETROANÁLISE EM TALUDE RODOVIÁRIO – ESTUDO DE CASO: Talude
localizado no km 758+500 pista norte da Rodovia Fernão Dias (BR 381).**

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Civil do
Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG
como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel,
sob orientação do Prof. Esp. Armando Belato Pereira.

**Varginha
2014**

ANDRÉ FIGUEIREDO MESQUITA

**RETROANÁLISE EM TALUDE RODOVIÁRIO – ESTUDO DE CASO: Talude
localizado no km 758+500 pista norte da Rodovia Fernão Dias (BR 381).**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Civil
do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG
como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel,
pela Banca Examinadora composta pelos membros:

Aprovado em / /

Prof. Esp. Armando Belato Pereira

Prof. M.Sc. Antônio de Faria

Prof. Esp. Leopoldo Freire Bueno

OBS.:

Aos meus pais, Cláudio e Luiza pelo muito que fizeram e ao meu irmão Bruno por sempre estar alegrando nossas vidas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela saúde e força nos momentos mais difíceis desta trajetória.

Aos meus pais e irmãos por sempre estarem ao meu lado em todas as decisões, sempre me entendendo e dando o maior apoio nas horas difíceis.

A minha segunda mãe, Vó Nenzinha, pelas orações e por todos os ensinamentos passados ao longo da minha infância, juntamente com aquele que já nos deixou e que faz muita falta, Vô Nelo.

Ao grande amigo, parceiro e colega de faculdade Dimas, pela oportunidade a mim dada e pelo companheirismo de sempre.

Ao meu orientador e professor Armando, pela paciência e colaboração com seus conhecimentos no ramo da Engenharia, para que este trabalho pudesse se concretizar.

Aos colegas do curso de Engenharia Civil, por toda a amizade criada e por sempre estarmos unidos uns ajudando os outros ao longo de todos esses anos.

Aos amigos em geral pela amizade e pelo companheirismo.

“Se você quer ser bem sucedido, precisa ter dedicação total, buscar seu último limite e dar o melhor de si mesmo.”

Ayrton Senna da Silva

RESUMO

Este trabalho trata-se do estudo detalhado de um talude de corte, localizado na rodovia Fernão Dias. O talude em estudo, devido a intensas intempéries, sofreu uma série de escorregamentos ao longo de quatro anos seguidos, acarretando em uma erosão de grande porte. Para recuperação desta erosão foi necessário, durante o dimensionamento da estrutura de contenção, ou seja, do seu projeto de estabilização, determinar os parâmetros médios equivalentes do talude no instante da ruptura.

Para determinar os parâmetros, uma forma alternativa e de baixo custo é o emprego das técnicas de retroanálise, onde são escolhidos os parâmetros de resistência dos solos que satisfazem a condição de $F.S. = 1,00$. Esta técnica é realizada de forma empírica, onde para este trabalho foi baseada na fixação dos valores de ângulo de atrito e peso específico e na estimativa dos valores de coesão dos materiais envolvidos. Os resultados, bem como toda metodologia desde a obtenção da geometria até os resultados finais, serão apresentados e comentados ao longo deste trabalho.

Palavras-chave: 1 – parâmetros de resistência, 2 - Fator de Segurança, 3 - retroanálise.

ABSTRACT

This article comes from the detailed study of a cutting slope, located in Fernão Dias highway. The slope in the study due to severe weather, suffered a series of landslides over four years in a row, resulting in a large erosion. For recovery of erosion has been necessary for the dimensioning of the containment structure, that is, its stabilization design, determine the parameters of the equivalent average slope at the instant of rupture.

To determine the parameters, an alternative and cost effective way is the use of back analysis techniques, which are chosen strength parameters of soils that meet the condition $F.S. = 1.00$. This technique is performed empirically, which for this study was based on the setting of the values of friction angle and unit weight and estimation of cohesion of the materials involved. The results and methodology since the whole geometry to obtain the final results will be presented and discussed throughout this work.

Keywords: 1 – strength parameters, 2 - Safety Factor, 3 - backcalculation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Associação entre tensão de cisalhamento e tensão normal.....	19
Figura 2 - Exemplo do resultado do ensaio de cisalhamento direto.....	22
Figura 3 - Exemplo da determinação de coesão e ângulo de atrito.....	22
Figura 4 - Exemplo do resultado de uma retroanálise.....	23
Figura 5 - Nomenclaturas usuais de taludes.....	24
Figura 6 – Sinais que evidenciam a presença de rastejo: (A) blocos deslocados de sua posição inicial; (B) árvores inclinadas ou com troncos recurvados; (C) estratos de camadas rochosas sofrendo variações bruscas (encosta abaixo) ou xistosidade; (D) deslocamento de postes e cercas; (E) trincas e rupturas em elementos rígidos, como muretas, muros e paredes; (F) eixos de estradas e ferrovias sofrendo inflexões no alinhamento; (G) matacões arredondados; (H) linhas de seixos recobertas por regolito em movimentação de rastejo (Sharpe,331).....	26
Figura 7 - Escorregamento tipo translacional.....	27
Figura 8 - Talude rochoso, com quedas de blocos.....	27
Figura 9 - Erosão em talude tipo ravina.....	28
Figura 10 - Relação de forças na análise de ruptura circular.....	29
Figura 11 - Relação de forças na análise de ruptura plana.....	30
Figura 12 - Mecanismo de ruptura por cunha.....	31
Figura 13 - Subdivisão do talude em fatias.....	34
Figura 14 - Forças atuantes em cada fatia.....	34
Figura 15 - Método Bishop Simplificado – Principais forças.....	36
Figura 16 - Forças atuantes em uma fatia pelo método Mogenstern & Price.....	38
Figura 17 - Programa GeoStudio, GEO-SLOPE International, Ltd.....	39
Figura 18 - Abertura do programa GeoStudio.....	39
Figura 19 - Representação da geometria do talude desenhada no programa.....	40
Figura 20 - Entrada de dados das propriedades dos materiais.....	40
Figura 21 - Definição das grelhas de centro de rotação.....	41
Figura 22 - Representação da demonstração do resultado no programa.....	42
Figura 23 – Localização do talude.....	43
Figura 24 - Vista frontal e lateral do talude em 2009.....	44
Figura 25 - Vista frontal do talude em 2011.....	44
Figura 26 - Vista do talude já recuperado em 2014.....	45
Figura 27 – Levantamento planialtimétrico.....	46

Figura 28 – Localização dos pontos de sondagem em planta.	46
Figura 29 - Perfil do talude BR 381 – km 758+500 Pista Norte	47
Figura 30 - Índices pluviométricos ano 2009	48
Figura 31 - Índices pluviométricos ano 2010	48
Figura 32 - Índices pluviométricos ano 2011	49
Figura 33 - Índices pluviométricos ano 2012	49
Figura 34 – Geometria inicial (seção média) do talude, antes dos escorregamentos.	50
Figura 35 - Geometria inicial (seção média) do talude dividida em pontos (1 até 13).....	52
Figura 36 – Saída gráfica para ruptura geral (F.S. = 0,999).....	55
Figura 37 – Saída gráfica para ruptura local (F.S. = 0,998).....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores típicos de Fator de segurança.....	33
Tabela 2 – Coordenadas arredondadas dos pontos.....	51
Tabela 3 – Peso específico dos solos arenosos (correlações empíricas – uso	53
Tabela 4 – Resultados obtidos para ruptura geral.....	54
Tabela 5 – Parâmetros de resistência do solo, para F.S. = 0,999.	55
Tabela 6 – Resultados obtidos para ruptura local.....	56
Tabela 7 - Parâmetros de resistência do solo, para F.S. = 0,998.	57
Tabela 8 – Orçamento Ensaio de Cisalhamento Direto.....	59
Tabela 9 – Orçamento Retroanálise.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Fa – Força atuante

Fr – Força resistente

F.S. – Fator de Segurança

Ma – Momento Atuante

Mr – Momento Resistente

NBR – Norma Brasileira

SPT - Standard Penetration Test

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 JUSTIFICATIVA	16
3 OBJETIVOS	17
3.1 Objetivo geral	17
3.2 Objetivos específicos	17
4 METODOLOGIA	18
5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
5.1 Parâmetros do solo	19
5.1.1 Ângulo de atrito, coesão e peso específico.....	19
5.2 Resistência dos solos	20
5.2.1 Ensaio de cisalhamento direto	21
5.2.2 Retroanálise	23
5.3 Taludes	24
5.3.1 Taludes Construídos	25
5.3.2 Taludes Naturais	25
5.4 Tipos de movimentos de massa	25
5.4.1 Escoamentos	26
5.4.2 Escorregamentos.....	26
5.4.3 Quedas ou Tombamentos	27
5.4.4 Erosões	28
5.5 Causas dos movimentos	28
5.6 Mecanismos de ruptura	29
5.6.1 Ruptura circular	29
5.6.2 Ruptura plana.....	30
5.6.3 Ruptura em cunha	31
5.7 Métodos de análise de estabilidade	31
5.7.1 Fator de Segurança	32
5.7.2 Métodos para cálculo de estabilidade de taludes.....	33
5.7.2.1 Método das Fatias.....	33
5.7.2.2 Método de Fellenius	35
5.7.2.3 Método de Bishop Simplificado	36
5.7.2.4 Método de Morgenstern & Price	37
5.8 Programa GeoStudio	38
6 ESTUDO DE CASO	43
6.1 Localização da área de estudo	43
6.2 Histórico das rupturas	43
6.3 Levantamento Topográfico.....	45
6.4 Investigações geotécnicas.....	46
6.5 Índices pluviométricos.....	47
7 DESENVOLVIMENTO	50
7.1 Análises Elaboradas.....	50
7.2 Cálculo da Estabilidade	51
7.3 Resultados obtidos.....	53

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	58
9 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

1 INTRODUÇÃO

Atualmente a população brasileira tem vivenciado o deslizamento de taludes, o qual vem provocando acidentes catastróficos, colocando inclusive vidas de pessoas em risco e que tem sido causa de grandes entaves ao deslocamento em rodovias em todo o país nos últimos tempos.

Este trabalho visa obter conhecimentos importantes sobre toda a envoltória a respeito de taludes, começando pelo estudo da resistência dos solos. A resistência dos solos está relacionada ao seu cisalhamento, o qual engloba os parâmetros dos solos, que são: coesão, ângulo de atrito, além do peso específico.

Foi apresentada a definição de taludes com suas divisões e a Figura 5, o qual indica algumas nomenclaturas que são importantes o seu conhecimento neste ramo. Os taludes, quando estão em processo de ruptura, podem ser caracterizados de diversas maneiras, de acordo com o tipo de movimento, onde foram apresentados alguns dos principais tipos de movimentos de massa, indicando suas características. Além disso, também foram apontadas as principais condicionantes que levam estes taludes a instabilização.

De acordo com a porção de massa escorregada e da situação que se encontra o talude é importante a sua caracterização e para isso foi apresentado os tipos de mecanismos de rupturas, esforços solicitantes e resistentes e as condições geométricas necessárias a esta caracterização.

Também foram apresentados os métodos de análise de estabilidade de talude, bem como a definição e condição que o talude pode estar de acordo com o resultado obtido no fator de segurança, esse podendo ser calculado através dos métodos analíticos ou determinísticos. Para que se possa ter uma análise rápida dos resultados obtidos e devido à complexidade dos cálculos, existe no mercado *softwares* que auxiliam na modelagem dos problemas de estabilidade, onde para este trabalho será utilizado o GeoSlope.

Finalmente, o trabalho propõe realizar um estudo de caso em um talude rodoviário, localizado ao longo da rodovia Fernão Dias, onde foi realizado todo um levantamento de dados, a fim de caracterizar o talude e indicar as possíveis causas que o levaram aos escorregamentos observados. Posteriormente, será realizado a retroanálise, definindo os parâmetros de resistência dos solos, onde os resultados obtidos serão apresentados e comentados.

2 JUSTIFICATIVA

Os taludes estão presentes de maneira geral na maioria das construções em todo o país, e em específico e grande volume, em cortes exigidos em obras de barragens e rodovias de tráfego intenso, tornando necessário realizar o estudo de análise da estabilidade destes taludes, ou seja, ver se a situação em que ele se encontra é segura ou tende a gerar algum tipo de problema futuro ou curto prazo.

Diante dessa situação, para a realização de projetos de estabilidade de taludes, é de suma importância para o Engenheiro Civil projetista, o conhecimento de informações pertinentes relacionadas aos parâmetros do solo, onde o trabalho apresentado a seguir fornece conteúdo de modo a determinar estes parâmetros no instante da ruptura de um talude.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

- Definição do talude para estudo de caso;
- Definição das características do talude;
- Apontamento das possíveis causas dos escorregamentos.

3.2 Objetivos específicos

- Levantamento de dados relativos à topografia do talude;
- Estudo dos boletins de sondagens e índices pluviométricos;
- Determinação da geometria do talude;
- Utilização do *software* aplicado no estudo de estabilidade de taludes;
- Aplicação da retroanálise.

4 METODOLOGIA

Este trabalho caracterizou-se como uma pesquisa descritiva do tipo estudo de caso, ou seja, uma pesquisa que envolve um estudo profundo sobre determinado assunto, permitindo o seu conhecimento detalhado e foi desenvolvido com base em uma revisão bibliográfica dos assuntos pertinentes, em conversas com profissionais e engenheiros da área de geotecnia, levantamentos em campo, acompanhamento na execução do levantamento topográfico e sondagens, consulta a projetos já existentes e utilização de *softwares*.

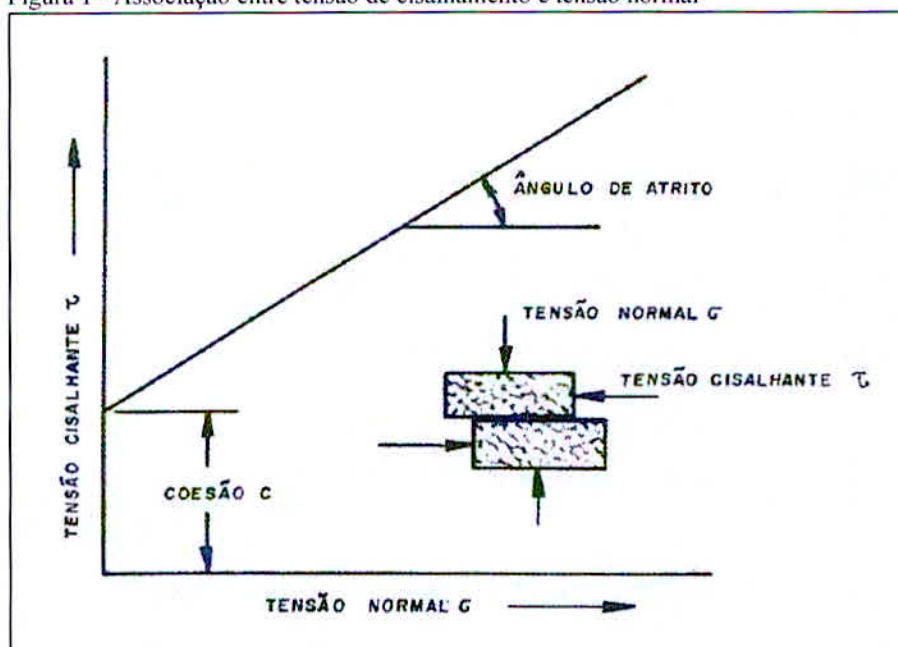
5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

5.1 Parâmetros do solo

5.1.1 Ângulo de atrito, coesão e peso específico.

São fatores que possuem maior peso no estudo da análise de estabilidade, pelo fato de suas propriedades serem as mais significativas. Um método fácil de definição de ângulo de atrito e coesão pode ser observado na Figura 1, o qual associa as tensões normais e tangenciais, no ensaio de cisalhamento direto.

Figura 1 - Associação entre tensão de cisalhamento e tensão normal



Fonte: (Guidicini e Nieble, 1983, p. 70).

Para ocorrer o deslizamento entre as duas amostra de materiais é necessário que se aplique uma força na horizontal, denominada de tensão cisalhante τ , na qual aumenta com a aplicação da força na vertical, tensão normal σ , aumentando assim a superfície de contato entre as amostras. O ângulo de atrito ϕ é definido como a inclinação da linha que relaciona estas duas tensões (normal e cisalhante). Já a coesão é definida, quando a descontinuidade entre as amostras são seladas, estando à tensão normal igual à zero, sendo necessário aplicar certo valor de tensão cisalhante para provocar a movimentação, sendo este valor inicial definido como coesão no plano de descontinuidade

(GUIDICINI; NIEBLE, 1983). Outros autores e normas definem ângulo de atrito, coesão e peso específico como:

De acordo com Pinto (2002), o ângulo de atrito é o máximo ângulo que a força transmitida pelo corpo a sua superfície pode fazer com a normal ao plano de contato sem ocorrer deslizamento e ao ser atingido este ângulo, a componente tangencial é maior que a resistência ao deslizamento, que depende da sua componente normal.

Conforme NBR (6502, p. 10) a coesão é definida como “parcela de resistência ao cisalhamento de um solo, independente da tensão efetiva normal atuante, provocada pela atração físico-química entre partículas ou pela cimentação destas”.

Para Machado (1997) a coesão do solo decorre de uma força resultante de atração entre as suas próprias partículas.

De acordo com a NBR (6502, p. 16) o peso específico natural “é a relação entre o peso total de um solo (fase sólida e líquida) e seu volume total no estado natural”.

Segundo Pinto (2002), a variação do peso específico natural, pode variar entre 19 a 20 kN/m³, podendo ser pouco maior (21 kN/m³) ou pouco menor (17 kN/m³), e em casos especiais, 14 kN/m³ (argilas orgânicas moles).

5.2 Resistência dos solos

A resistência dos solos está relacionada com o seu cisalhamento, e para análise da estabilidade de taludes não é diferente, a determinação dos parâmetros de resistência dos solos são fatores preponderantes, os quais são determinados no estudo de resistência ao cisalhamento, este sendo definido como a máxima tensão cisalhante que um solo pode suportar sem sofrer ruptura e que segundo Machado (1997), esta resistência dos solos pode ser definida como sendo o resultado da combinação de dois fatores, já mencionados anteriormente, denominados coesão e ângulo de atrito.

Conforme já mencionado, nos cálculos de estabilidade de taludes é necessário dispor dos parâmetros de resistência dos solos, onde as envoltórias de resistência da maioria dos solos podem ser expressas de forma aproximada, pela equação de Mohr-Coulomb.

$$\tau = c + \sigma \cdot \text{tg}\varphi \quad (1)$$

Onde:

τ = resistência ao cisalhamento;

c = coesão;

σ = tensão normal atuante no plano de ruptura; e

φ = ângulo de atrito do solo.

Esta equação, assim como seus parâmetros intervenientes, pode ser considerada em termos de tensões (pressões) totais ou em termos de tensões efetivas, podendo ser obtidos através de:

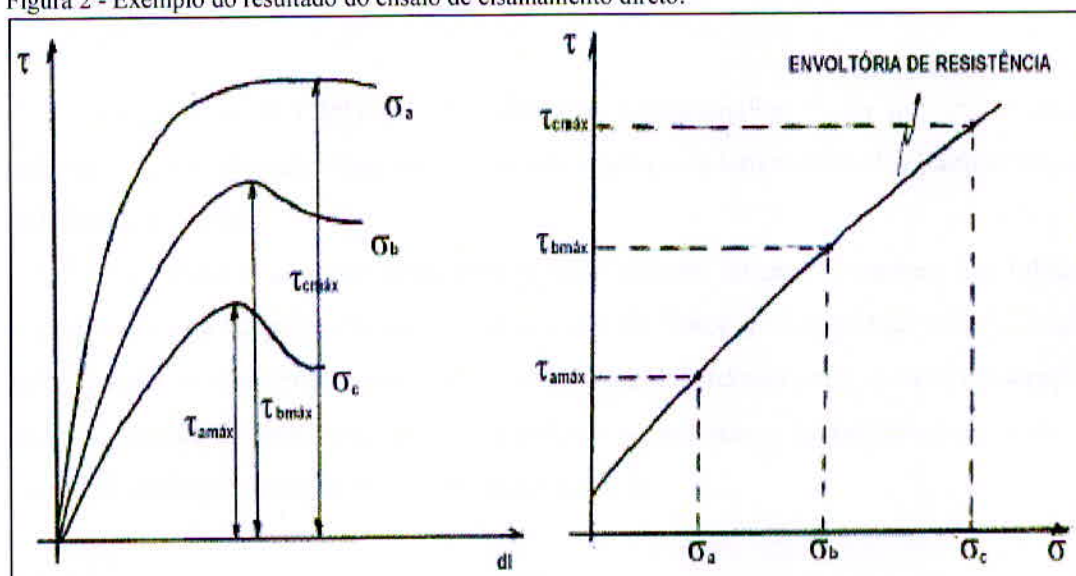
- Ensaios laboratoriais (ensaios triaxiais ou de cisalhamento direto);
- Ensaios *in situ* (SPT) associados a correlações estatísticas previamente determinadas;
- Retroanálises de casos reais de ruptura.

5.2.1 Ensaio de cisalhamento direto

Este tipo de ensaio possui um procedimento antigo e consiste em colocar uma porção do solo (amostra) a ser ensaiado, numa caixa de cisalhamento, constituída por duas partes. A parte inferior é fixa enquanto a superior pode se movimentar, aplicando tensões cisalhantes no solo. Este corpo de prova é levado até a máquina de ensaio, onde é colocada a pedra porosa na sua extremidade, para permitir a drenagem durante o ensaio. Sobre o corpo de prova é aplicado tensões normais que permanecem constantes até o final do ensaio.

Para poder romper o corpo de prova é aplicado tensões ou deformações controladas, onde durante o ensaio é realizado três leituras: o deslocamento horizontal (δh), a força cisalhante aplicada (S) e a deformação vertical (ϵv), a qual fornecerá variação de volume do corpo de prova. Ressalta-se que para este tipo de ensaio é necessário à realização de pelo menos três CPs, ou seja, temos que ter pelo menos três pontos para ter uma reta. A Figura 2 demonstra gráficos usados para auxílio na determinação dos parâmetros.

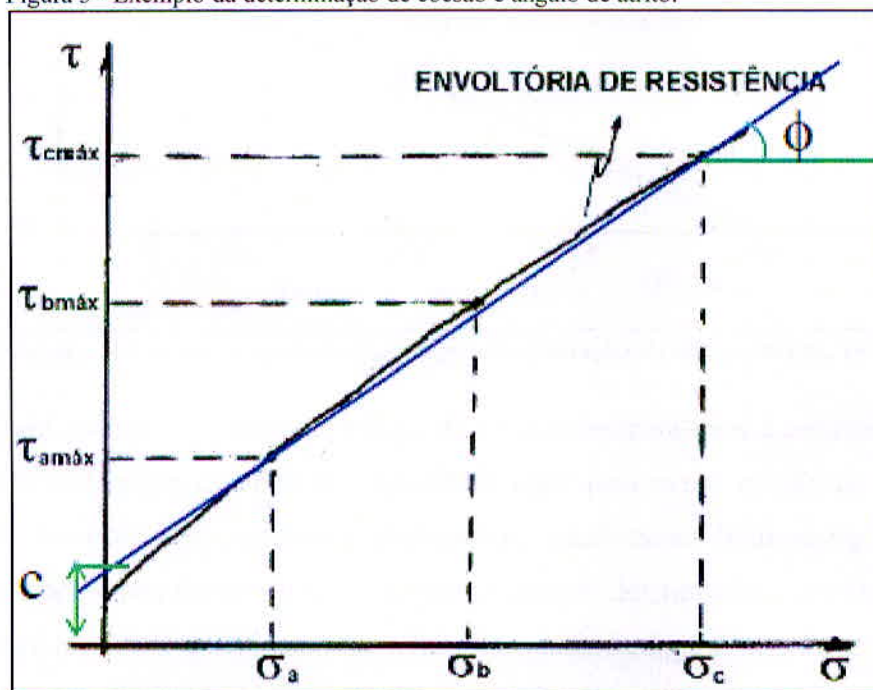
Figura 2 - Exemplo do resultado do ensaio de cisalhamento direto.



Fonte: (Bastos).

A coesão e o ângulo de atrito são determinados a partir do segundo gráfico acima (tensão x deformação), traçando uma reta passando pelos três pontos. O valor do ângulo de atrito é determinado através da inclinação que esta linha (envoltória) faz com a horizontal, e a coesão, pelo prolongamento da reta até o encontro com a linha em que a tensão normal é zero, conforme pode ser observado pela Figura 3.

Figura 3 - Exemplo da determinação de coesão e ângulo de atrito.



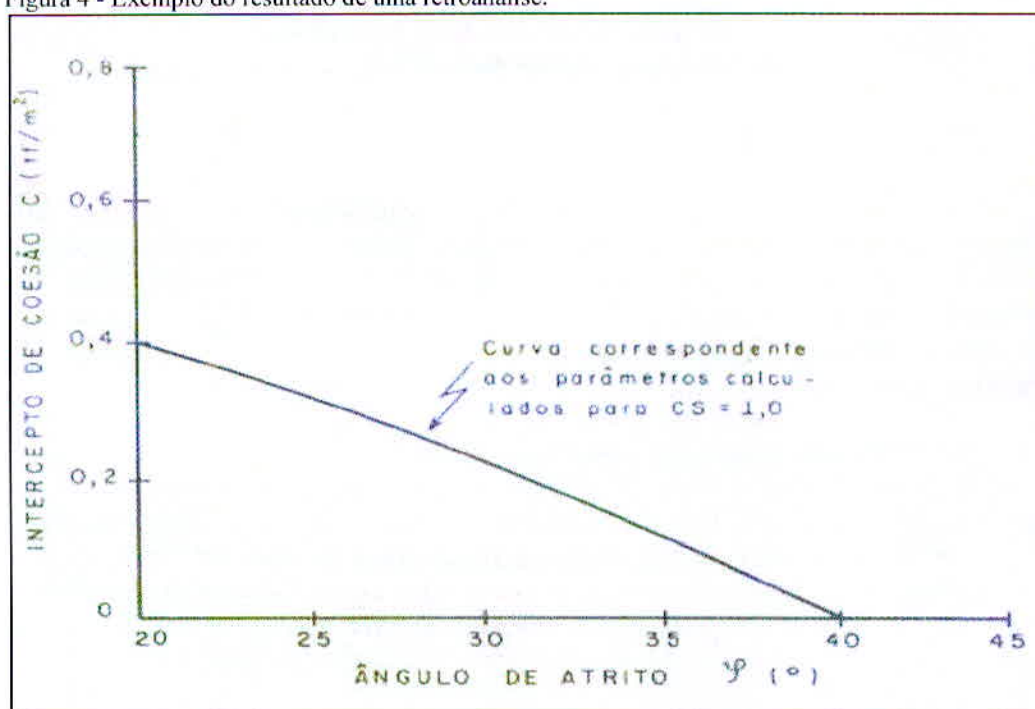
Fonte: (Bastos).

5.2.2 Retroanálise

Carvalho et al (1991, p. 349) cita que a retroanálise é um dos meios mais práticos e confiáveis para obter uma estimativa rápida e a baixo custo dos parâmetros de resistência dos solos.

Esta técnica consiste basicamente que quando ocorre à ruptura do talude, considera-se que naquele momento que o valor do Fator de Segurança reduziu a um valor inferior a 1,00. Posteriormente em uma análise determinística, essa consideração permite, através de tentativas que se calculem os parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito) à condição de $F.S = 1,00$ (Figura 4).

Figura 4 - Exemplo do resultado de uma retroanálise.



Fonte: (Taludes de Rodovia – Orientação para diagnóstico e soluções de seus problemas, 1991, p. 350).

Para obtenção dos pares de valores de c e ϕ , correspondentes à condição limite é necessário realizar os cálculos de estabilidade onde para maior eficiência, caso seja possível, determinar as condições geométricas, geotécnicas, hidrogeológicas e da superfície de ruptura deste talude, sendo primeiramente determinado o ângulo de atrito ϕ , devido à facilidade de estimar a sua ordem de grandeza e logo depois a coesão c .

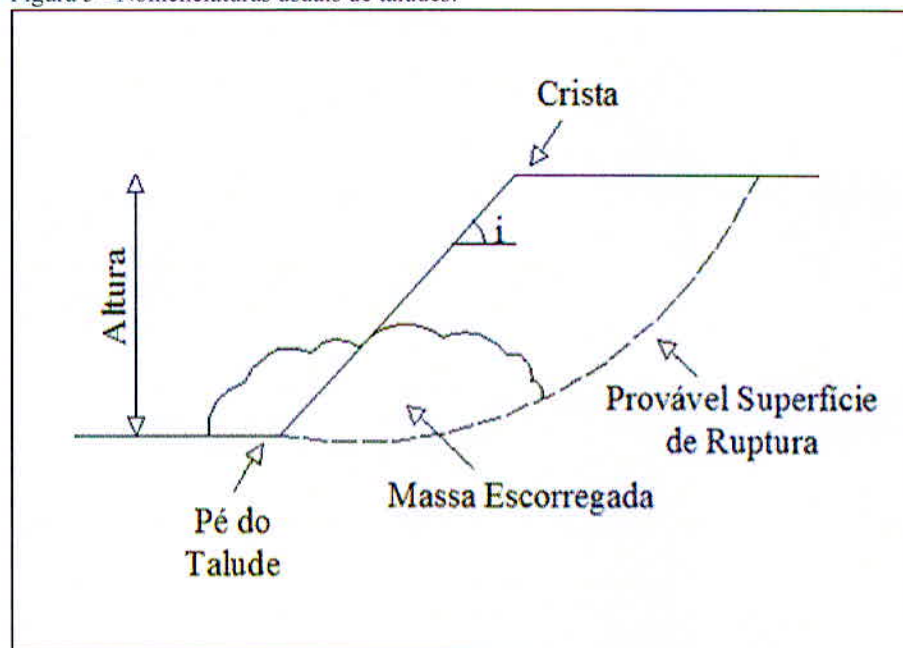
Deve-se lembrar de que os parâmetros obtidos tratam-se de parâmetros médios equivalentes, correspondente ao comportamento médio do talude como um todo, os quais atuavam no momento do evento (ruptura).

Esta técnica tem sido muito utilizada na avaliação do ganho de segurança com a execução de obras de estabilização de taludes rompidos ou em processo de ruptura, tendo os parâmetros de resistência obtidos através da retroanálise e posteriormente aplicadas técnicas de contenção de talude, desde as mais simples até as mais complexas, analisando o ganho/acréscimo no fator de segurança final, de acordo com a forma de contenção escolhida.

5.3 Taludes

Talude é definido como qualquer superfície inclinada que limita um maciço de terra, rocha ou terra e rocha, cuja superfície forma um ângulo com a horizontal, podendo ser naturais, denominados de encostas ou ainda construído pelo homem, sendo caracterizado pelos cortes ou aterros. A Figura 5 apresenta algumas denominações usadas para taludes.

Figura 5 - Nomenclaturas usuais de taludes.



Fonte: (o autor).

Onde:

Massa escorregada: porção de solo que se desprende do talude natural;

Pé do talude: ponto de menor cota, onde se inicia a inclinação;

Crista: ponto de maior cota, onde se finaliza o talude;

Altura: representa a medida na vertical entre o pé e a crista do talude;

i : ângulo formado com o plano horizontal;

Superfície de ruptura: mecanismo de ruptura da porção de solo.

5.3.1 Taludes Construídos

São aqueles taludes formados pela ação antrópica, resultante de corte em encostas, escavações, aterros, etc.

Ambos os taludes quando executados devem estar dentro dos parâmetros, para que possam garantir a estabilidade da obra, como os cortes tendo a altura e inclinação apropriadas e os aterros com seus devidos índices de compactação. (GERSCOVICH, 2012).

5.3.2 Taludes Naturais

Estes taludes são formados por solos residuais e/ou coluvionar, que permaneceram no local em que foram gerados ou que ganharam forma a partir de seu transporte, realizado pelos agentes transportadores. (GERSCOVICH, 2012).

5.4 Tipos de movimentos de massa

Os movimentos de massa têm sido objeto de estudo das mais diversas áreas científicas, não apenas por sua importância como causador da evolução das formas de relevo, mas também por suas consequências práticas e importância do ponto de vista econômico.

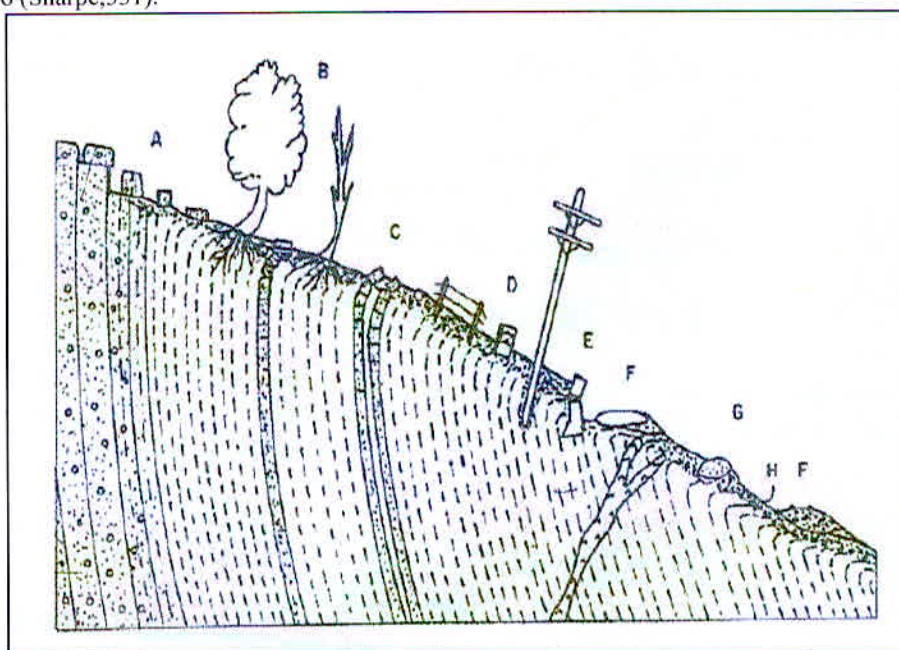
Segundo Gerscovich (2012), movimento de massa é qualquer deslocamento de um determinado volume de solo, no qual diz ainda que na literatura geral, estes movimentos de massa são tratados como processos associados a problemas de instabilidade de encosta.

Estes movimentos estão associados ao processo de intemperismo dos solos e ocorrem nos taludes e encostas, podendo ser de maneira muito lenta ou rápida, esta última responsável pelos eventos catastróficos. A seguir serão apresentados os tipos de movimentos de massas, com suas principais características e os fatores que causam estes movimentos.

5.4.1 Escoamentos

É um tipo de movimento que não possui interrupção, velocidade definida e pode ou não apresentar algum tipo de superfície de deslocamento. Sua característica marcante é a de se assimilar ao movimento de um fluido viscoso, ou seja, de consistência mole. Os principais tipos de escoamentos são os rastejos (lento) e corrida (rápido).

Figura 6 – Sinais que evidenciam a presença de rastejo: (A) blocos deslocados de sua posição inicial; (B) árvores inclinadas ou com troncos recurvados; (C) estratos de camadas rochosas sofrendo variações bruscas (encosta abaixo) ou xistosidade; (D) deslocamento de postes e cercas; (E) trincas e rupturas em elementos rígidos, como muretas, muros e paredes; (F) eixos de estradas e ferrovias sofrendo inflexões no alinhamento; (G) matacões arredondados; (H) linhas de seixos recobertas por regolito em movimentação de rastejo (Sharpe,331).



Fonte: (Guidicini e Nieble, 1983, p. 20).

5.4.2 Escorregamentos

Este tipo de movimento é perfeitamente visível à beira de rodovias, depois de intensos períodos de chuva e consiste no desprendimento de certo volume de massa (pequenos a grandes). O principal motivo desta ocorrência é que as relações entre a resistência média e as tensões médias do solo tenham decrescido ao valor de uma unidade no momento do escorregamento/ruptura. Suas características quanto à velocidade variam, pois depende da altura do talude, quanto mais alto maior a velocidade e vice-versa, onde também possui superfície de ruptura bem definida. Os principais tipos de escorregamentos são translacionais e rotacionais.

Figura 7 - Escorregamento tipo translacional.



Fonte: (Autopista Fernão Dias).

5.4.3 Quedas ou Tombamentos

Este tipo de movimento de massa, também pode ser facilmente presenciado e consiste no desprendimento/queda livre de blocos de rochas, os quais podem cair a altas velocidades dependendo da massa/volume e da altura do talude.

Figura 8 - Talude rochoso, com quedas de blocos.



Fonte: (Autopista Fernão Dias).

5.4.4 Erosões

As erosões estão ligadas a ação do homem, devido a sua forma devastadora, mas também podem ser caracterizadas de forma natural. Estas são evidenciadas após suscetíveis escorregamentos e trata-se de movimentos nas camadas mais superficiais, que também podem ser facilmente perceptíveis. As voçorocas e as ravinas são exemplos de erosões.

Figura 9 - Erosão em talude tipo ravina.



Fonte: (Autopista Fernão Dias).

5.5 Causas dos movimentos

As principais condicionantes que levam a instabilização dos taludes, gerando os movimentos de massa, no geral estão relacionadas ao:

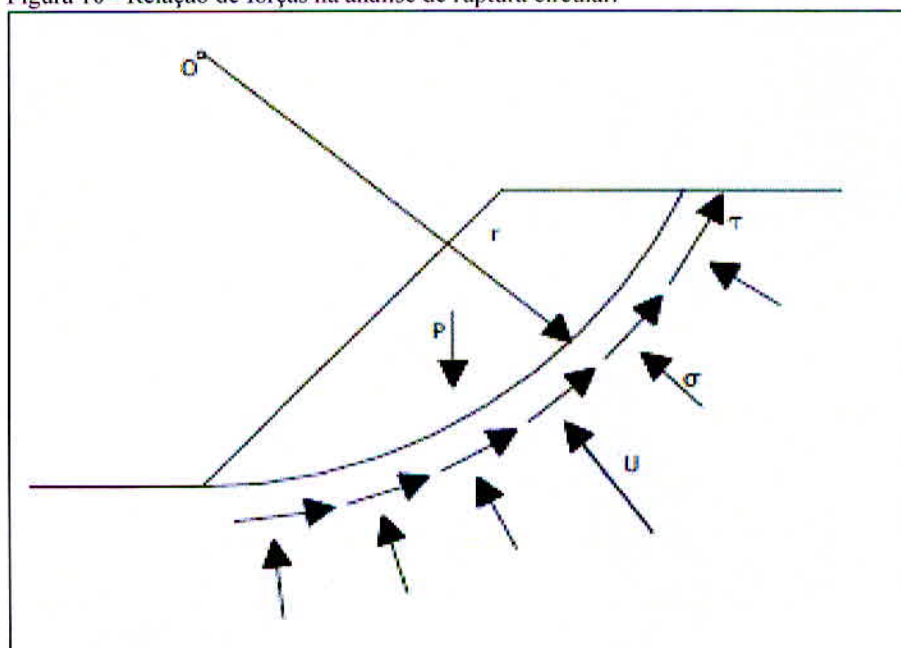
- Aumento de cargas aplicadas na crista e ao longo da face da encosta (Ex: acréscimo de peso);
- Diminuição da resistência ao cisalhamento (Ex: poro pressões);
- Erros executivos comuns (Ex: escavação próxima ao pé do talude);
- Ação da água (Ex: penetração nas juntas/fendas, saturação do maciço);
- Liquefação do solo (Ex: chuva).

5.6 Mecanismos de ruptura

5.6.1 Ruptura circular

Como o próprio nome já diz, este tipo de ruptura é aquela onde o talude se rompe de forma circular. Conforme Guidicini e Nieble (1983, p. 120), a análise desta ruptura é realizada no plano bidimensional, onde os esforços solicitantes e resistentes são apresentados na Figura 10.

Figura 10 - Relação de forças na análise de ruptura circular.



Fonte: (Guidicini e Nieble, 1983, p. 121).

Onde:

r = raio da superfície de ruptura;

P = peso próprio do material;

U = resultante das pressões neutras atuantes na superfície de ruptura;

σ = tensão normal efetiva distribuída ao longo da superfície de ruptura;

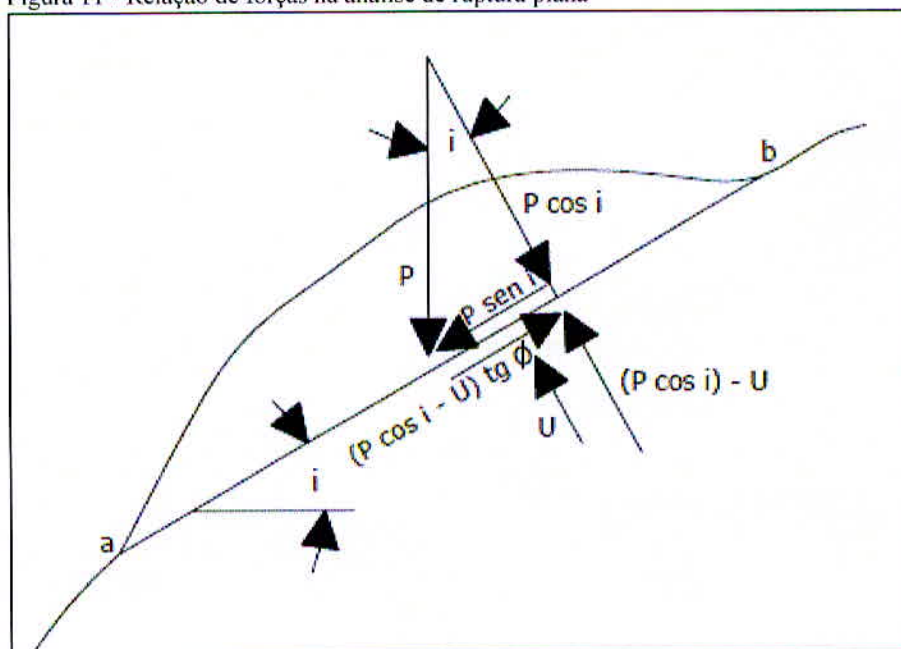
τ = tensão de cisalhamento distribuída ao longo da superfície de escorregamento.

5.6.2 Ruptura plana

Segundo Guidicini e Nieble (1983, p. 139), para rupturas planas as condições geométricas necessárias para o escorregamento ocorrer num único plano são as seguintes:

- O plano deve ter direção paralela ou subparalela à face do talude;
- O mergulho do plano de ruptura deve ser inferior ao mergulho da face do talude;
- O mergulho do plano de ruptura deve ser maior que o ângulo de atrito plano;
- Superfícies de alívio devem prover resistências laterais desprezíveis ao escorregamento ou, ainda, não existirem.

Figura 11 - Relação de forças na análise de ruptura plana



Fonte: (Guidicini e Nieble, 1983, p. 141).

Onde:

P = peso do bloco;

U = subpressão na base do bloco;

i = inclinação do plano de ruptura;

ϕ = ângulo de atrito do contato bloco-plano;

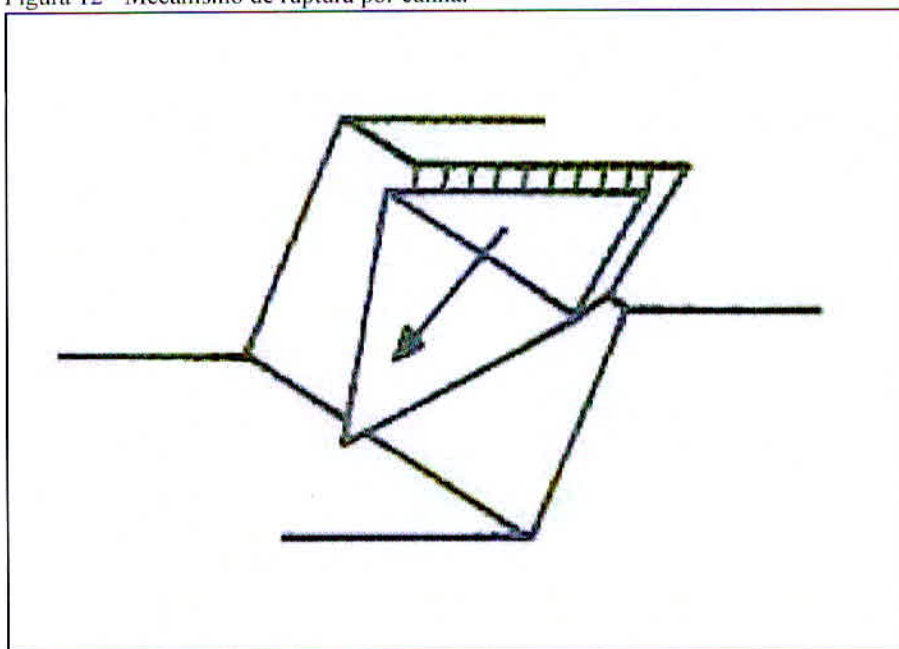
$(P \cos i - U) \operatorname{tg} \varphi =$ esforço resistente ao escorregamento;

$P \operatorname{sen} i =$ esforço solicitante.

5.6.3 Ruptura em cunha

Para Guidicini e Nieble (1983, p. 146), a complexidade de análise de ruptura de um talude, onde dois ou mais sistemas de descontinuidades isolam cunhas, é um fato e não há dúvida de que, para se chegar a alguma quantificação prática que revele a estabilidade do talude, algumas simplificações básicas devem ser feitas. Este tipo de ruptura (Figura 12), frequentemente pode ser observado em taludes rochosos.

Figura 12 - Mecanismo de ruptura por cunha.



Fonte: (Guidicini e Nieble, 1983, p. 121).

5.7 Métodos de análise de estabilidade

Para a análise de estabilidade, vários procedimentos estão envolvidos, com o objetivo de se determinar um índice ou grandeza que consiga quantificar o quão próximo se encontra a ruptura de um determinado talude, num determinado conjunto de condicionantes atuantes. Os métodos de análise estão divididos em:

- Métodos Analíticos: baseado na teoria do equilíbrio-limite e nos modelos matemáticos de tensão e deformação;

- Métodos Experimentais: emprega modelos físicos de diferentes escalas;
- Métodos Observacionais: são calculados na experiência acumulada com análise de rupturas anteriores.

Estes métodos de cálculo, com o avanço e amplo desenvolvimento da informática, ficaram disponíveis em *softwares* computacionais (Ex: GeoStudio), facilitando a utilização, estando diretamente ligados a caracterização geológica-geotécnica, entendimento dos agentes, causas, geometria e do escorregamento ocorrido dos taludes.

5.7.1 Fator de Segurança

Os métodos de cálculo da estabilidade de taludes expressam a estabilidade de um talude por um Fator de Segurança.

O Fator de Segurança pode ser calculado pelo quociente entre os momentos resistentes (M_r) e os momentos atuantes (M_a), pelo quociente entre as forças resultantes (F_r) e as forças atuantes (F_a), ou ainda por ambas. Em outras palavras, estas relações são descritas por tudo aquilo que tende a segurar o talude, dividido por tudo que tende a derrubar, o qual a partir do resultado obtido consegue determinar a condição em que o talude se encontra.

O talude é considerado inseguro para $F.S. < 1$ e caso implantado, provavelmente deverá sofrer ruptura. Porém, devido às simplificações que cada método de análise e as variações dos parâmetros geotécnicos e geométricos adotados, não são incomuns, as análises que apontam $F.S.$ maiores que a unidade estejam associados a taludes instáveis.

Para $F.S. = 1$, temos que o talude encontra na condição limite de estabilidade (meia-estabilidade), quando associada à eminência de ruptura. Esta condição, também é adotada nos cálculos de retroanálise.

Taludes com $F.S. > 1$, temos certa condição de estabilidade, porém quanto mais próximo de um for o $F.S.$, mais rúptil e precária será a condição de estabilidade para este talude. Por outro lado, quanto maior que um for o $F.S.$, menor serão as possibilidades de este talude vir a sofrer ruptura quando submetido a condições críticas, considerando assim, este talude como estável.

Para a realização de projetos executivos de engenharia a definição do $F.S.$ admissível vai depender, dentre outros fatores, das consequências que ocorrerão devido

a uma eventual ruptura, em terrenos de perdas humanas e ou econômicas. O F.S. adotado deve considerar não somente as condições atuais do talude, mas também o uso futuro da área, preservando-se o talude contra cortes no pé, desmatamentos, sobrecargas, infiltrações excessivas.

Na Tabela 1 são apresentados os valores típicos para o F.S. mínimo como padrão de avaliação dos parâmetros de segurança, para projetos de taludes, conforme a NBR 11682/1991.

Tabela 1 - Valores típicos de Fator de segurança.

Grau de segurança necessário ao local	Métodos baseados no equilíbrio-limite	Tensão-deformação
	Padrão: fator de segurança mínimo*	Padrão: deslocamento máximo
Alto	1,50	Os deslocamentos máximos devem ser compatíveis com o grau de segurança necessário ao local, à sensibilidade de construções vizinhas e à geometria do talude. Os valores assim calculados devem ser justificados.
Médio	1,30	
Baixo	1,15	

* Podem ser adotados fatores diferentes, desde que justificados.

Fonte: (NBR 11682, 1991, p.18).

5.7.2 Métodos para cálculo de estabilidade de taludes

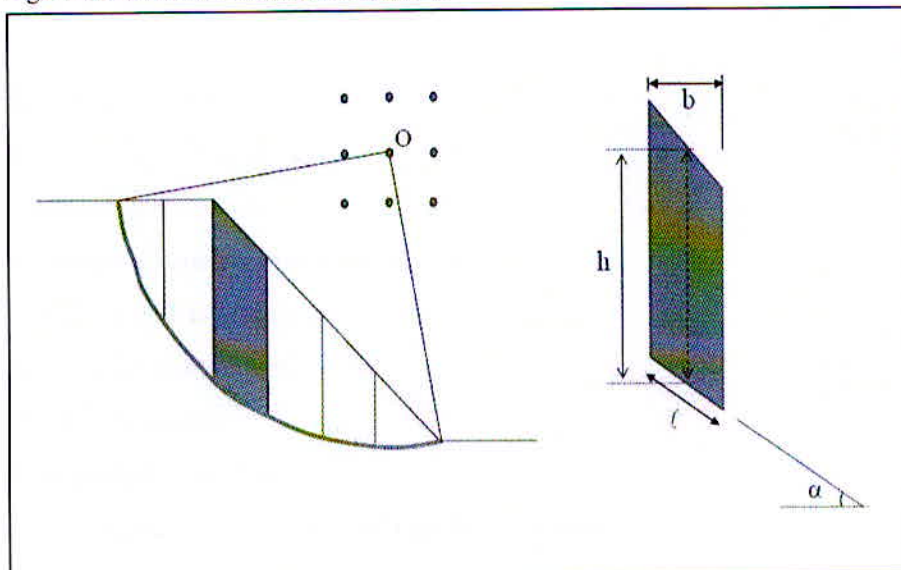
Dentre os vários métodos de cálculo de estabilidade por equilíbrio limite, será citado apenas os métodos das fatias utilizados em Bishop Simplificado, Fellenius e Morgstain Price, sendo estes diferenciados quanto aos mecanismos de rupturas, quanto às equações de equilíbrio usadas e quanto às hipóteses de forças aplicadas sobre as fatias do talude.

5.7.2.1 Método das Fatias

Segundo Gerscovich (2012), este método não apresenta restrições quanto à natureza dos solos, geometria do talude e tipo de análise (em termos de tensão total ou efetiva) e por isso se tornou a forma mais utilizada em estudos de estabilidade de taludes.

A metodologia da solução consiste nas seguintes etapas:

Figura 13 - Subdivisão do talude em fatias.

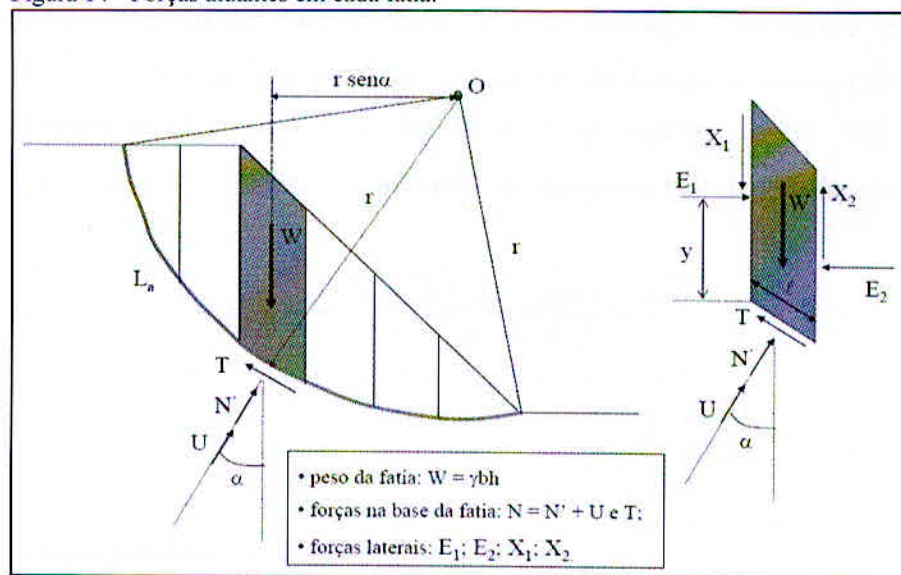


Fonte: (Romero).

- A superfície de ruptura é circular (de centro O e raio r);
- A massa de solo potencialmente instável é subdividida em fatias (largura b);
- A base da lamela é aproximada a um segmento de reta (comprimento l);
- Cada base de lamela deve compreender apenas um tipo de solo;
- A altura da fatia é medida no centro da mesma (h);
- O ângulo de inclinação da base da fatia com a horizontal é α .

Forças atuantes em cada fatia (Figura 14):

Figura 14 - Forças atuantes em cada fatia.



Fonte: (Romero).

Onde:

W = peso da fatia

γ = peso específico do solo

b = largura da lamela

h = altura da lamela medida no centro

N = força na base da fatia

N' = tensão normal efetiva

U = tensões totais

T = resistência na base

La = somatório dos comprimentos (l) das lamelas

c' = coesão efetiva

A partir do equilíbrio de momentos, temos a equação geral do cálculo do fator de segurança para o método de fatias:

$$F. S. = \frac{c'. La + tg\phi. \Sigma N'}{\Sigma W. sen\alpha} \quad (2)$$

5.7.2.2 Método de Fellenius

Também denominado de método sueco, este método proposto por Fellenius opcionalmente seria apenas para o estudo de solos saturados, estendendo mais tarde para outros tipos de solos em condições de análise de tensões efetivas. Este tipo de análise consiste na eliminação do somatório das forças horizontais (E1, E2) e forças verticais (X1, X2) entre as fatias, sendo o fator de segurança calculado pela equação:

$$F. S. = \frac{c'. La + tg\phi. \Sigma (W. cos\alpha - u. l)}{\Sigma w. sen\alpha} \quad (3)$$

Onde:

W = peso da fatia

U = tensões totais

L = somatório dos comprimentos (l) das lamelas

c' = coesão efetiva

ϕ = ângulo de atrito

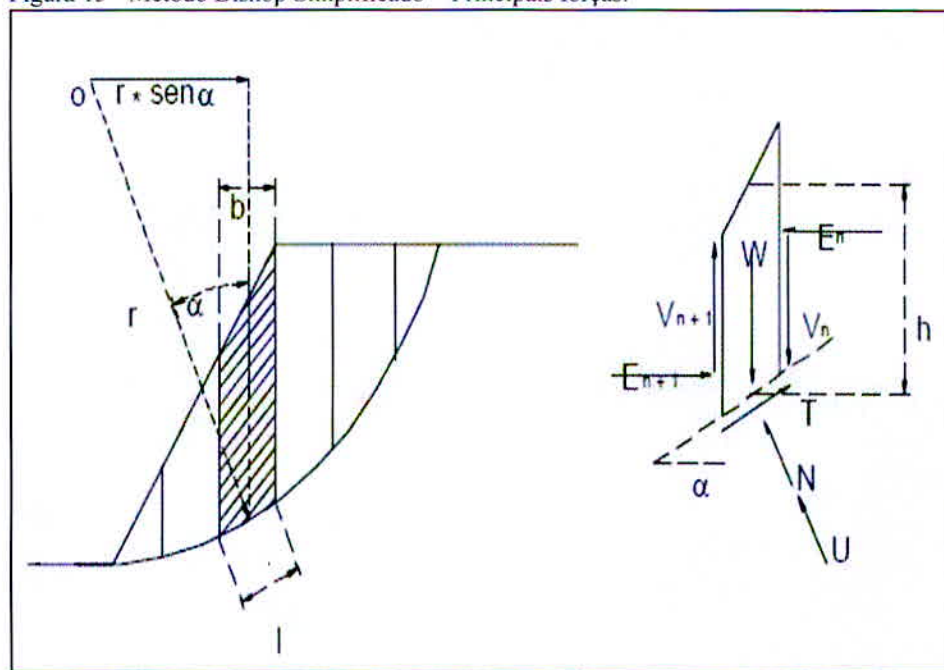
α = ângulo de inclinação da base da fatia

5.7.2.3 Método de Bishop Simplificado

Entre os métodos determinísticos baseados na teoria equilíbrio limite, este método é um dos mais utilizados, tendo como restrição o fato de apenas poder ser aplicado á superfícies de rupturas circulares, tendo exatidão para todas as situações.

Este método está baseado em algumas simplificações, as quais admitem: somente superfície circular; fator de segurança constante ao longo de toda a superfície de ruptura; e que o somatório das forças verticais (X) atuantes nas fatias se anulam. As principais forças são apresentadas na Figura 15.

Figura 15 - Método Bishop Simplificado – Principais forças.



Fonte: (Gomes, 2003, p. 10).

Onde:

W = peso total da lamela

- N = força normal atuante na base da lamela
 U = resultante das pressões neutras na base da lamela
 T = força resistente na base da lamela
 E_n, E_{n+1} = forças horizontais nas laterais da lamela
 V_n, V_{n+1} = forças verticais nas laterais da lamela
 b = largura da lamela
 h = altura da lamela
 l = comprimento da base da lamela
 r = raio de círculo
 O = centro do círculo
 α = ângulo de atrito da lamela com a horizontal

A partir do equilíbrio de forças, o fator de segurança através do Método de Bishop Simplificado pode ser calculado pela equação:

$$F. S. = \frac{\Sigma[c. b + (W - u. b). \operatorname{tg}\phi]. \frac{1}{Ma}}{\Sigma W. \operatorname{sen}\alpha} \quad (4)$$

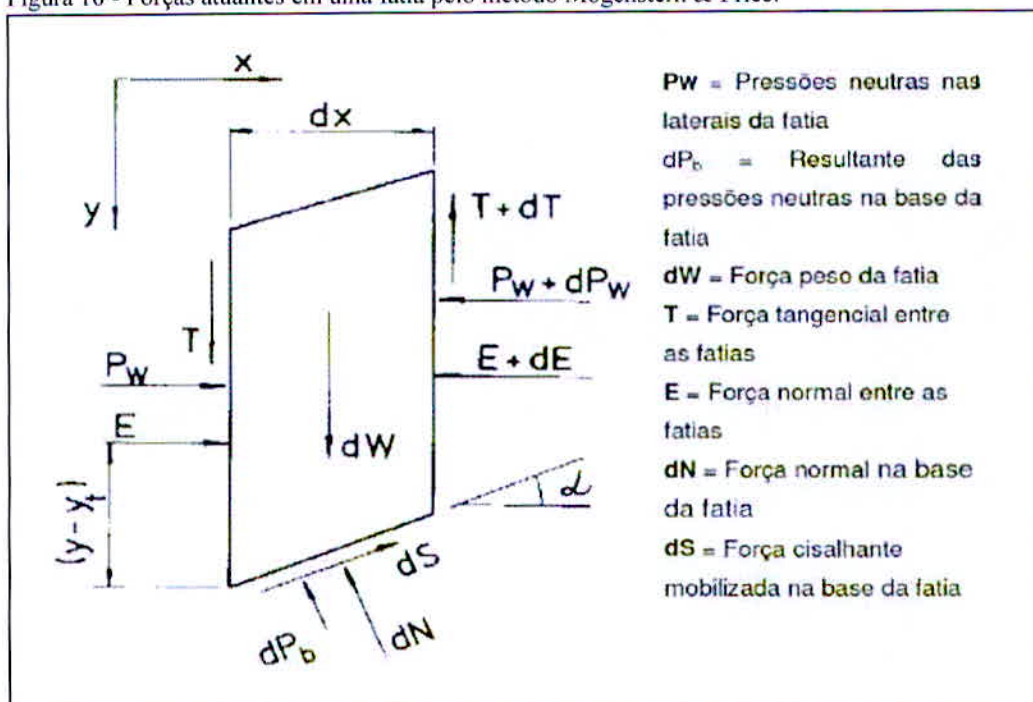
Sendo:

$$Ma = \left[1 + \left(\operatorname{tg}\phi. \frac{\operatorname{tg}\alpha}{2}\right)\right]. \operatorname{cos}\alpha \quad (5)$$

5.7.2.4 Método de Morgenstern & Price

Este método baseia-se numa análise por equilíbrio limite para uma superfície de qualquer ruptura onde todas as condições de equilíbrio estático são satisfeitas e a massa instável é dividida em fatias sendo necessário o auxílio de programas computacionais para a execução dos cálculos. (FIAMONCINI, 2009 apud PEREIRA, 2012, p.80). As principais forças, entre elas a poro pressão, são apresentadas na Figura 16.

Figura 16 - Forças atuantes em uma fatia pelo método Morgenstern & Price.



Fonte: (PEREIRA, 2012, apud CHOWDHURY, 1978, apud FIAMONCINI, 2009).

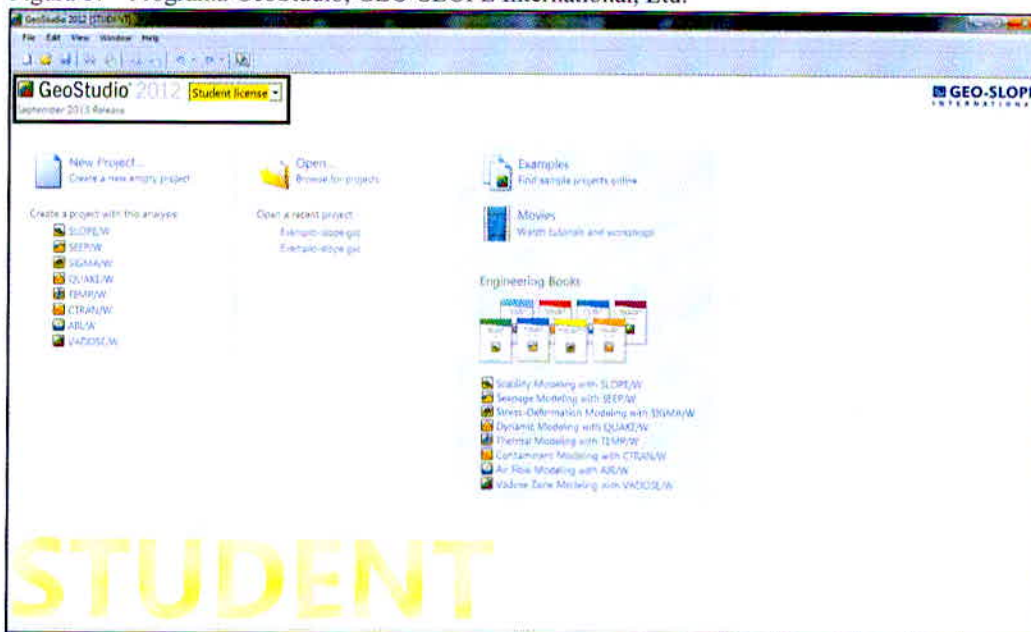
5.8 Programa GeoStudio

Atualmente o uso de ferramentas computacionais não só no ramo da Engenharia Geotécnica, mas também em outras áreas da Engenharia é de grande amplitude e muito utilizado, devido a gama possibilidade de controle e modelagem dos problemas técnicos, o qual com a situação ganhou-se um maior tempo nas análises numéricas, devido à agilidade de entrada e saída de dados.

Para modelagem dos problemas de estabilidade, um dos programas presente no mercado é o Geo-Studio, o qual é composto por diferentes módulos e específicas aplicações, as quais variam desde a análise de estabilidade de taludes a equilíbrio hídrico e que servirá de auxílio para este trabalho.

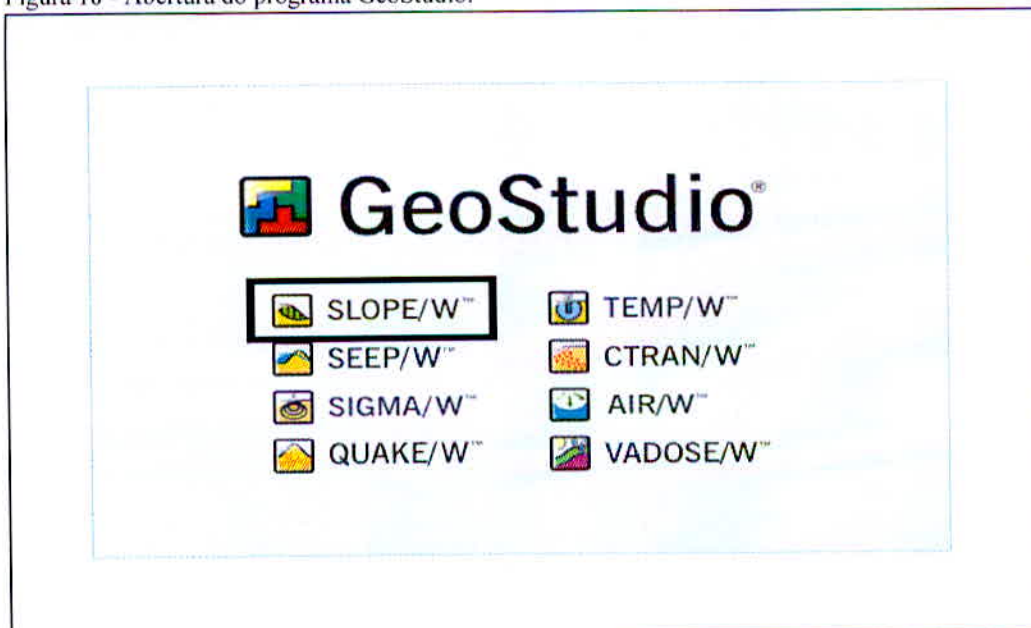
O módulo Slope/w utiliza os métodos analíticos baseado na teoria equilíbrio limite para a realização da análise de estabilidade e obras de reforço. Os principais métodos de cálculo utilizados são Fellenius, Janbu e Bisshop e também métodos mais rigorosos como Morgenstern & Price e Spencer. As Figuras 17 e 18 apresentam a interface de abertura do programa.

Figura 17 - Programa GeoStudio, GEO-SLOPE International, Ltd.



Fonte: (o autor).

Figura 18 - Abertura do programa GeoStudio.

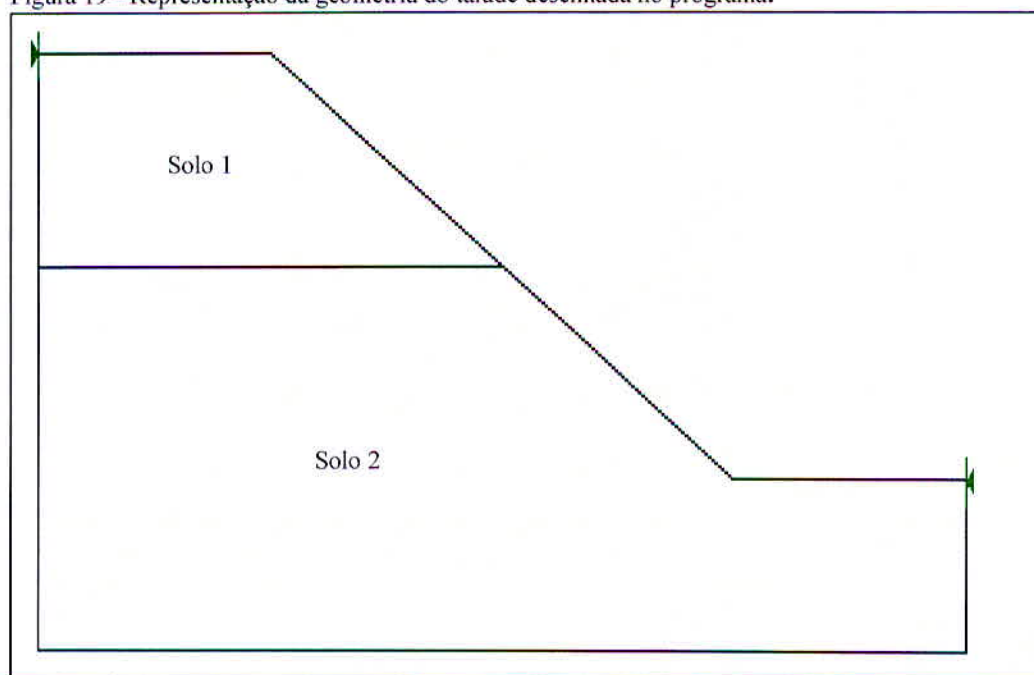


Fonte: (o autor).

Este programa possui rotinas executáveis, o qual *define* (para definir o modelo do talude a ser analisado) e *results* (para computar e visualizar os resultados). Abaixo, será demonstrado um passo a passo de um exemplo para o cálculo utilizando o programa.

Primeiro, é realizada a definição de toda geometria e a divisão dos tipos de solo presente neste talude, como pode ser visto na Figura 19:

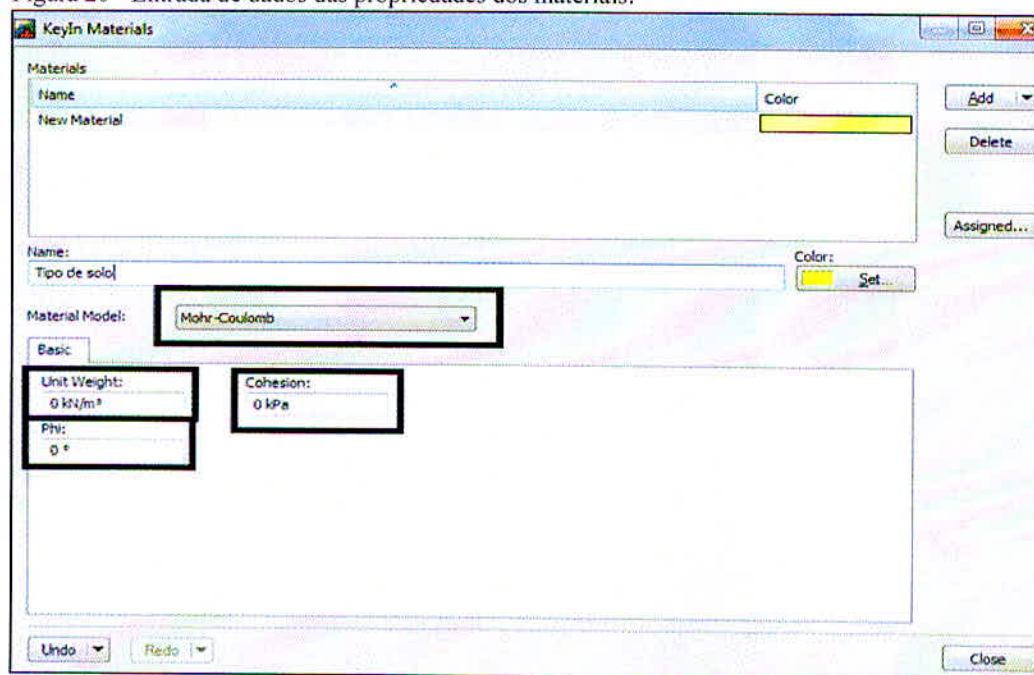
Figura 19 - Representação da geometria do talude desenhada no programa.



Fonte: (o autor).

Na sequência é definido o modelo de análise da resistência ao cisalhamento, o qual é utilizado o critério de Mohr-Coloumb, e também os parâmetros de resistência (coesão, ângulo de atrito e peso específico) dos tipos de solo presentes no talude, demonstrado pela Figura 20. Caso necessário, também é possível inserir o nível de água.

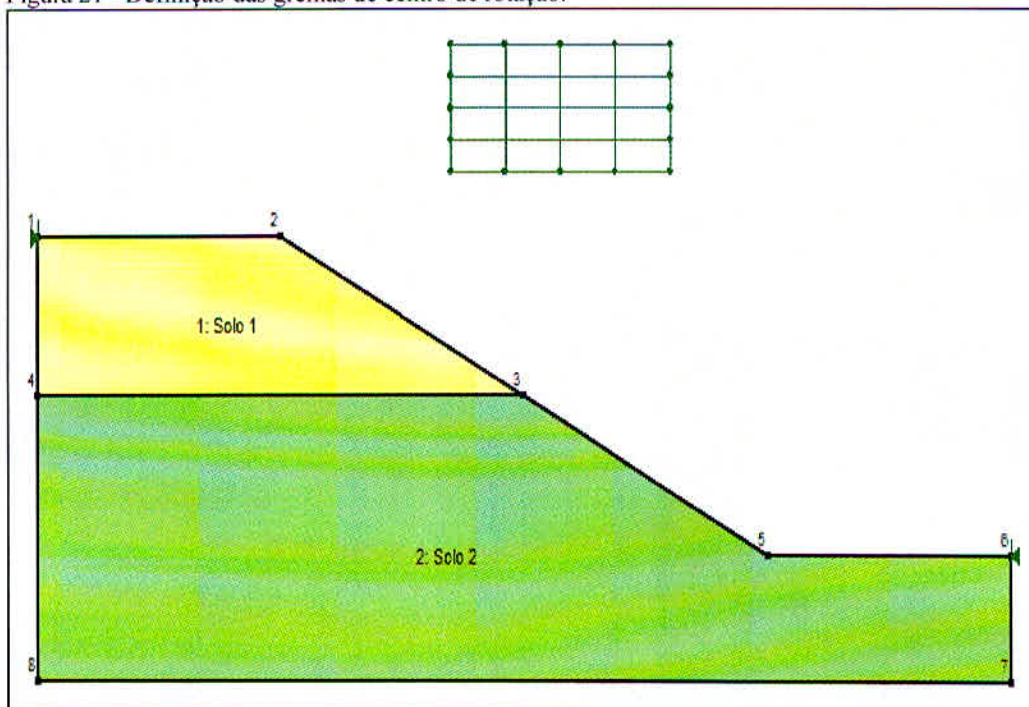
Figura 20 - Entrada de dados das propriedades dos materiais.



Fonte: (o autor).

Depois de definida a geometria do talude e de todos os parâmetros de resistência do solo, é necessário obter os pontos ou linhas usados para computar o raio do círculo da superfície de ruptura, e também deverá ser estabelecida uma grade de centros de rotação para controlar o local de ensaio das superfícies de desliz, Figura 21. Vale lembrar que, caso haja necessidade, é possível inserir a linha piezométrica (altura do nível d'água) no talude.

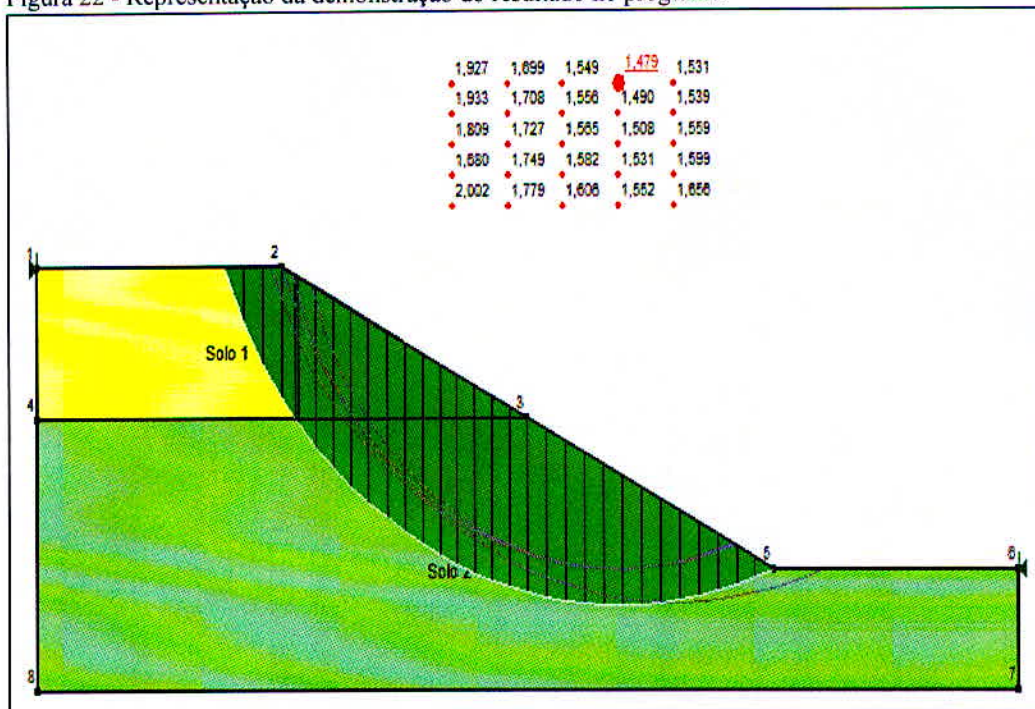
Figura 21 - Definição das grelhas de centro de rotação.



Fonte: (o autor).

Finalmente, para fazer a análise da estabilidade e calcular o Fator de Segurança mínimo (crítico), o *results* carrega automaticamente os dados inseridos no *define* e processa as simulações de acordo com a grade e linhas definidas para a superfície de desliz, permitindo ver os resultados da análise graficamente e visualizar todos os parâmetros do solo, seus limites e observações do ensaio.

Figura 22 - Representação da demonstração do resultado no programa.



Fonte: (o autor).

6 ESTUDO DE CASO

6.1 Localização da área de estudo

Trata-se de um talude de corte executado na época da duplicação da rodovia Fernão Dias, localizado no km 758+500 da pista norte, no município de Três Corações/MG, em frente ao posto da Polícia Rodoviária Federal.

Figura 23 – Localização do talude



Fonte: (Autopista Fernão dias – Ortofoto 23/08/2009).

6.2 Histórico das rupturas

Através da troca de informações com engenheiros e consultores da Autopista Fernão Dias e de registros fotográficos, pode se ter uma visão do acontecimento dos escorregamentos.

Conforme os depoimentos, o primeiro escorregamento deste talude de aproximadamente 19,0 metros de altura, que era composto por uma berma, ocorreu em fevereiro de 2009, apresentado pela Figura 24, prosseguido de novos escorregamentos ainda no final de dezembro do mesmo ano. Em 2010, 2011 e 2012 novos escorregamentos foram observados. Após estes escorregamentos houve erosão do material escorregado e das camadas expostas do solo (Figura 25), causando o aprofundamento das rupturas e o carreamento do material para pista. Conforme pode ser

visto através da Figura 26, atualmente este talude encontra-se recuperado com solo grampeado.

Figura 24 - Vista frontal e lateral do talude em 2009.



Fonte: (Autopista Fernão Dias).

Figura 25 - Vista frontal do talude em 2011.



Fonte: (Autopista Fernão Dias).

Figura 26 - Vista do talude já recuperado em 2014.



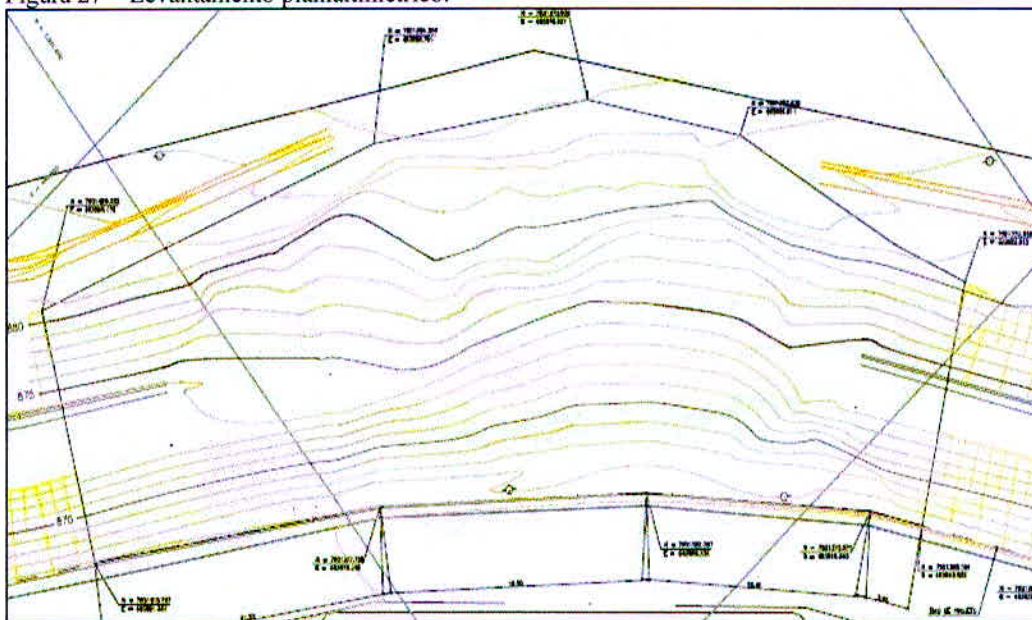
Fonte: (Autopista Fernão Dias).

6.3 Levantamento Topográfico

A caracterização geométrica do talude em estudo foi obtida com a utilização da estação total, modelo Topcon ES 105, onde foi gerado todo levantamento planialtimétrico e cadastral, com curvas de níveis de um em um metro, conforme pode ser visto pela Figura 27.

Este levantamento foi realizado com o intuito de abranger um estudo detalhado da região e para facilitar a compreensão e identificação das causas do ocorrido (geometria da ruptura, planta e perfis).

Figura 27 – Levantamento planialtimétrico.

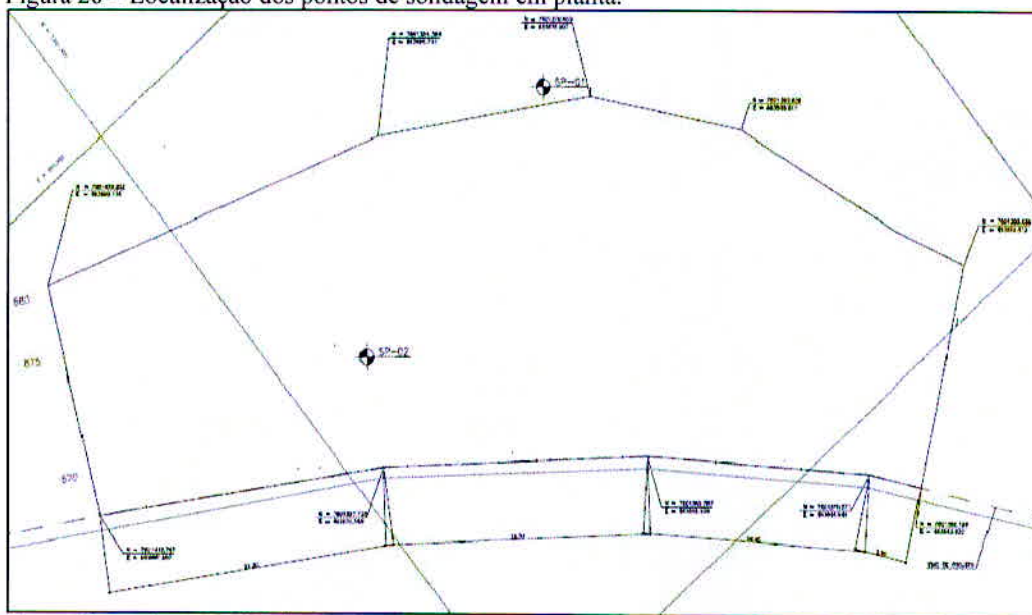


Fonte: (Autopista Fernão Dias).

6.4 Investigações geotécnicas

Para a determinação das características e tipos de solo presente no talude foram realizadas duas sondagens a percussão, denominadas de SP-01 (Coordenadas N = 7.601.373,0370; E = 463.881,2770) localizada no topo do talude e SP-02 (Coordenadas N = 7.601.394,1650; E = 463.876,4780) localizada no meio do talude, onde existia a berm de equilíbrio.

Figura 28 – Localização dos pontos de sondagem em planta.

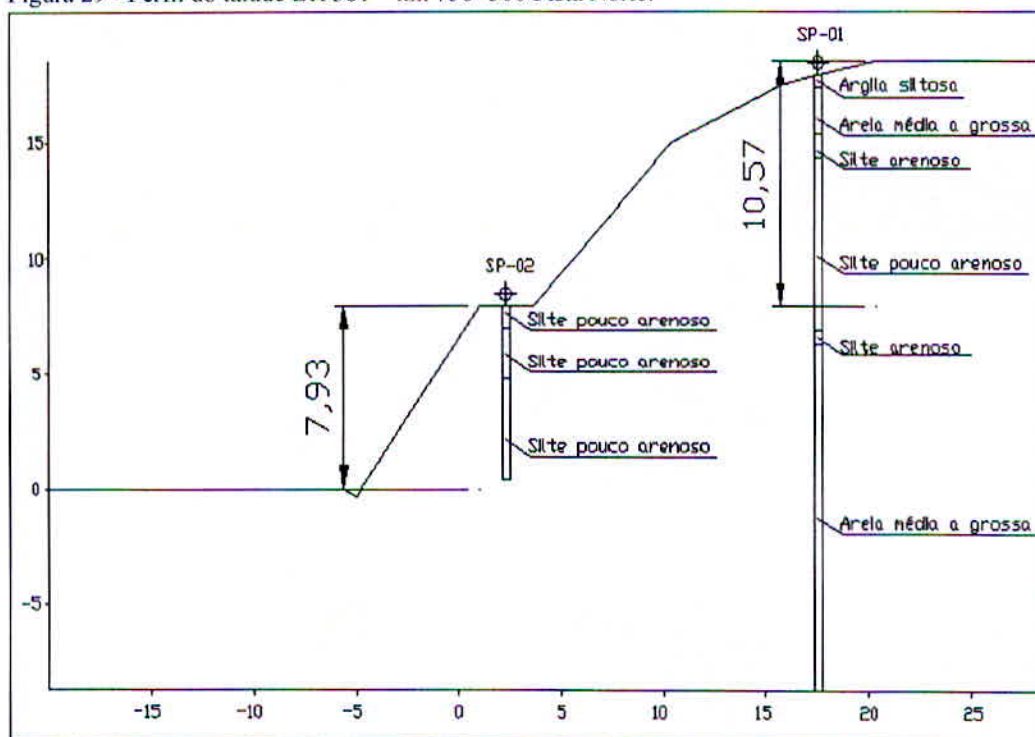


Fonte: (Autopista Fernão Dias)

Analisando os relatórios de sondagens realizados, o primeiro furo (SP-01) apresentou camadas de argila siltosa a 0,50 m de profundidade, areia médio a grossa, pouco siltosa a 2 m abaixo da argila siltosa, uma grande camada de silte a 8,6 m da areia e no final 2,60 m de areia médio a grossa. Já no segundo furo (SP-02) observaram-se apenas variações de silte, em uma camada de 7,36 m. Com relação à resistência de penetração (NSPT) o mesmo crescia à medida que aumentava a profundidade até o término do furo, ultrapassando os 40 golpes. Durante as sondagens realizadas, em ambos os furos não foi constatada a presença de água.

A Figura 29 demonstra a geometria do talude com suas alturas aproximadas, a localização das sondagens e os perfis das camadas de solo.

Figura 29 - Perfil do talude BR 381 – km 758+500 Pista Norte.



Fonte: (o autor).

6.5 Índices pluviométricos

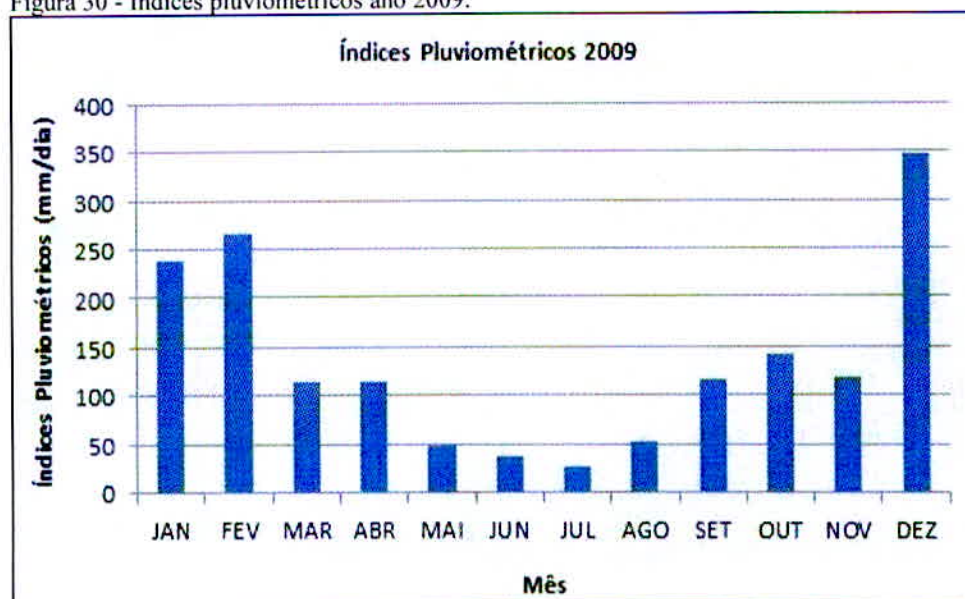
Com o intuito de levantar a maior quantidade de dados possíveis para o estudo, foi realizada a busca por estas informações, onde foram obtidos os índices pluviométricos de 2009 a 2012, período em que ocorreram os escorregamentos.

Na análise dos índices pluviométricos do ano de 2009, percebeu-se que houve intenso período chuvoso nos meses de janeiro, fevereiro e o maior deles em dezembro.

O primeiro escorregamento ocorreu em janeiro e a partir dali veio se agravando, principalmente nos meses de fevereiro e dezembro, este último com maior precipitação 347,9mm.

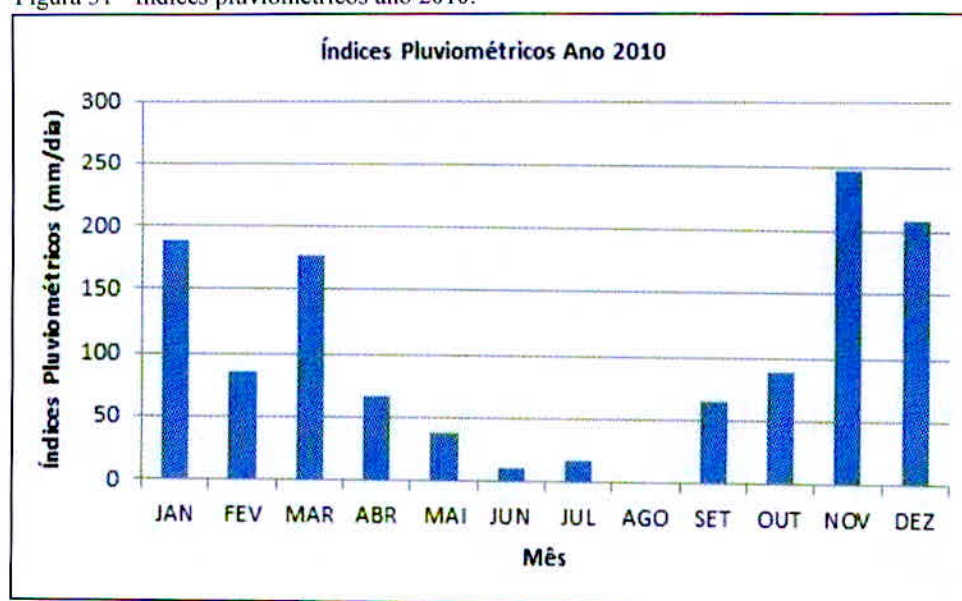
Em 2010 os maiores registros de precipitações variaram de 177,3mm a 209,5mm, o qual agravou ainda mais a ruptura do talude com novos escorregamentos. No ano de 2011 e 2012 não foi diferente, altos índices pluviométricos foram observados e novos escorregamentos aconteceram, piorando a situação.

Figura 30 - Índices pluviométricos ano 2009.



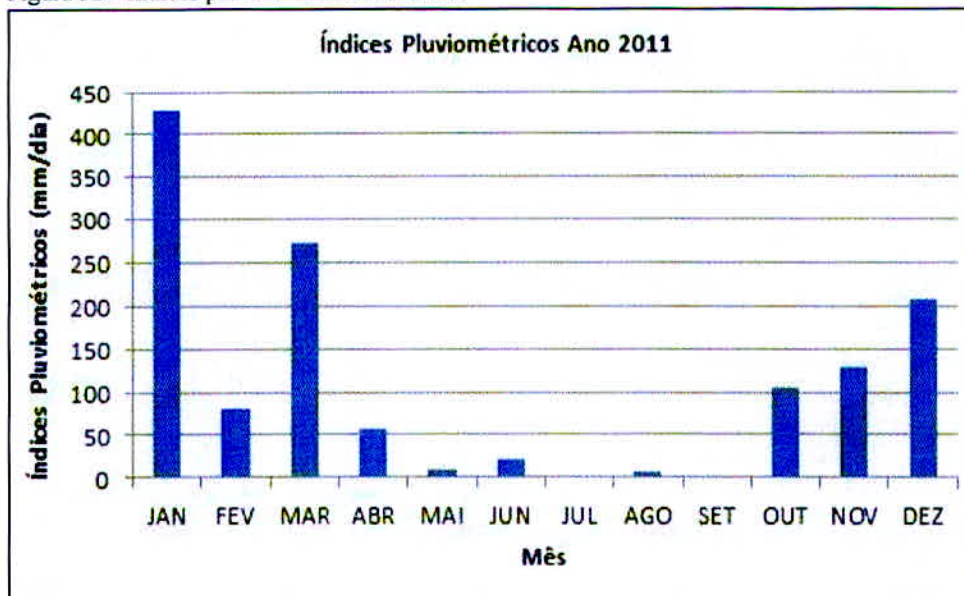
Fonte: (Autopista Fernão Dias/Climatempo)

Figura 31 - Índices pluviométricos ano 2010.



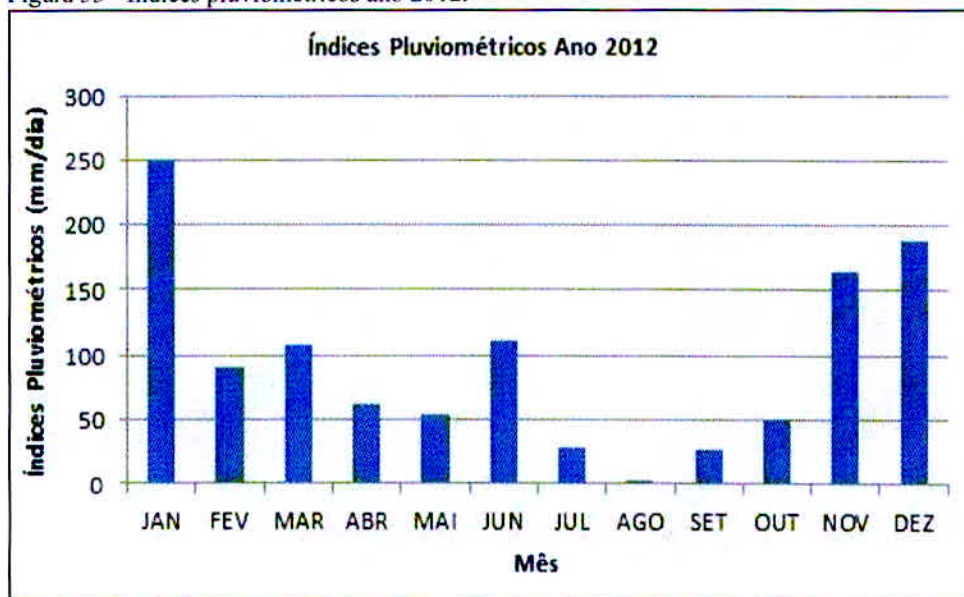
Fonte: (Autopista Fernão Dias/Climatempo)

Figura 32 - Índices pluviométricos ano 2011.



Fonte: (Autopista Fernão Dias/Climatempo)

Figura 33 - Índices pluviométricos ano 2012.



Fonte: (Autopista Fernão Dias/Climatempo)

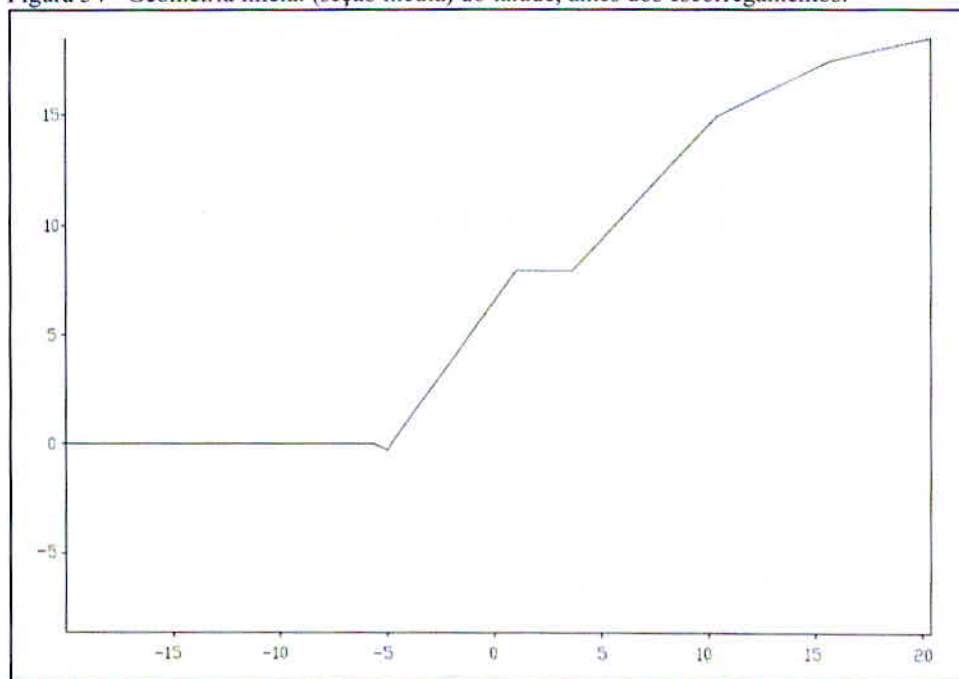
7 DESENVOLVIMENTO

7.1 Análises Elaboradas

Para a aplicação das técnicas de retroanálise de forma adequada, é necessário a primeiro momento a determinação da geometria interna e externa do talude, geometria da superfície de ruptura e das condições de pressão neutra no instante da ruptura.

No caso de taludes já rompidos, ou seja, taludes que já tiveram alguma alteração perceptível em comparação com sua estrutura inicial, a sua geometria pode ser determinada através de técnicas de topografia, levantando seções longitudinais no entorno da área escorregada (lado direito e esquerdo), admitindo a média destas seções como sendo a seção longitudinal correspondente à geometria original do terreno. Utilizando desta técnica e a comparando com a situação em campo, foi observado que a inclinação média do talude, antes da série de escorregamentos, era da ordem 1V:0,7H, em torno de 55° , conforme pode ser visto na Figura 34.

Figura 34 – Geometria inicial (seção média) do talude, antes dos escorregamentos.



Fonte: (o autor)

Após a determinação da geometria externa foi necessário de acordo com os relatórios de sondagem do local, inserir as camadas de solos, onde para este caso a principal composição é silte, com pequenas variações de argila e areia (solo heterogêneo), conforme pode ser visto na Figura 29.

7.2 Cálculo da Estabilidade

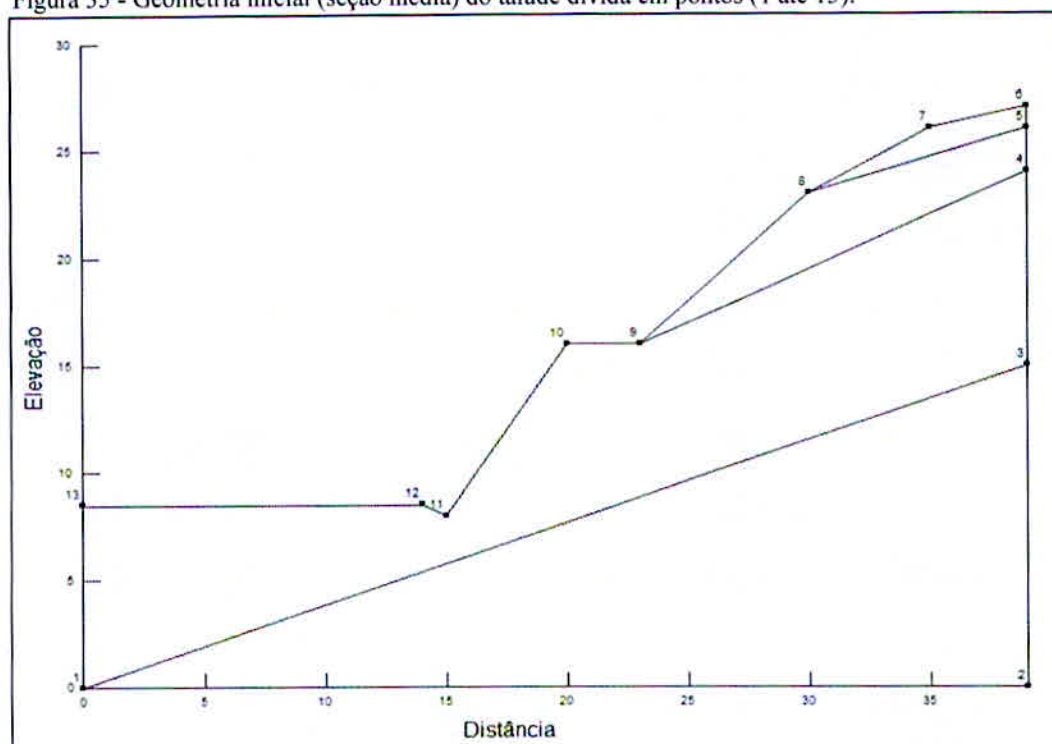
Com a geometria externa já elaborada, iniciou-se a modelagem no Slope/w. Por ser um *software* pago, utilizou-se a versão estudantil, porém esta versão restringe alguns comandos importante tais como: a exportação de arquivos (Dxf) gerados pelo *autocad*, inserção de mais de três tipos de materiais diferentes (solo), dificultando um pouco mais a modelagem. Para contornar esta situação, toda a geometria do talude com a divisão geológica, foi dividida em pontos (1 a 13) e modelada através do lançamento de coordenadas “arredondadas” (Tabela 2), obtidas através do *autocad*. Para isso, foi utilizando o comando *point draw* para lançamento destes pontos e posteriormente interligados através do comando *sketch line*, finalizando assim a geometria, conforme visto na sequência (Figura 35).

Tabela 2 – Coordenadas arredondadas dos pontos.

Pontos	Coordenadas em X	Coordenadas em Y
1	0	0
2	39	0
3	39	15
4	39	24
5	39	26
6	39	27
7	35	26
8	30	23
9	23	16
10	20	16
11	15	8
12	14	8,5
13	0	8,5

Fonte: (o autor)

Figura 35 - Geometria inicial (seção média) do talude dividida em pontos (1 até 13).



Fonte: (o autor).

Depois de modelado a geometria, foi necessário determinar as regiões, ou seja, dividir o talude de acordo com as camadas de solo, através do comando *draw regions*. Como possui quatro tipos diferentes de solos, optou-se por transformar a primeira camada de solo em uma única camada de areia, pelo fato de se ter uma quantidade pouco significativa de argila (0,50 metros). Posteriormente, através do comando *draw materials*, foram inseridos, a partir de estimativas, os parâmetros de resistência dos solos do talude de acordo com o tipo de material acusado nos boletins de sondagem.

Para tanto, em um primeiro momento, foi utilizado os dados da Tabela 3, para se estimar o peso específico dos solos arenosos, lembrando que este valor preliminar é utilizado para o cálculo de fundações. Já para os valores de ângulo de atrito e coesão, estes foram estimados através de trabalhos acadêmicos, contatos com profissionais da área, auxílio a projetos já desenvolvidos.

Tabela 3 – Peso específico dos solos arenosos (correlações empíricas – uso limitado a estudos preliminares).

N (golpes)	Consistência	Peso Específico (KN/m ³)		
		Areia seca	Úmida	Saturada
< 5	Fofa	16	18	19
5 - 8	Pouco compacta			
9 - 18	Mediamente compacta	17	19	20
19 - 40	Compacta	18	20	21
> 40	Muito compacta			

Fonte: (Godoy, 1972 adaptado pelo autor).

Para finalmente rodar as análises, foi utilizado o comando *slip surface* para determinar na geometria do talude os pontos de entrada e saída de dados. Feito isso, através do comando *solve manager*, foi dado início ao processo da análise da estabilidade, onde os resultados serão apresentados a seguir.

7.3 Resultados obtidos

Foram elaboradas duas retroanálises, uma considerando a ruptura como um todo (ruptura geral) e a outra considerando do pé à crista do talude (ruptura local), ambas com a finalidade de aferir os parâmetros de resistência da estrutura de corte. Considerando que os mecanismos de ruptura devem ter sido iniciados em razão da perda de coesão, procurou-se apresentar esta situação. Para isso, quando o fator de segurança calculado fosse diferente de 1,00, tendo o valor do ângulo de atrito fixado e o valor da coesão foi alterado, até que o fator de segurança fosse menor ou igual a 1,00.

Em ambas retroanálises, foi considerado que o fluxo de água durante a ocorrência das chuvas é majoritariamente vertical, portanto sem a geração de pressões neutras, informações estas, confirmadas pelo relatório de sondagem. Salienta-se também que todas estas análises foram elaboradas utilizando o Método de Bishop, através do programa GeoStudio, módulo Slope/w.

Para a ruptura do tipo geral, foram realizadas cinco modelagens, sendo apresentados na Tabela 4, quatro resultados destas modelagens.

Tabela 4 – Resultados obtidos para ruptura geral.

Modelagem	Tipo de Solo	γ (KN/m ³)	c (KPa)	ϕ (°)	F.S.
1ª	Solo 1 - Areia	16	0	25	0,993
	Solo 2 - Silte	17	10	28	
	Solo 3 - Areia muito compacta	18	15	35	
2ª	Solo 1 - Areia	16	0	25	1,026
	Solo 2 - Silte	17	11	28	
	Solo 3 - Areia muito compacta	18	15	35	
3ª	Solo 1 - Areia	16	0	25	1,009
	Solo 2 - Silte	17	10,5	28	
	Solo 3 - Areia muito compacta	18	15	35	
4ª	Solo 1 - Areia	16	0	25	1,003
	Solo 2 - Silte	17	10,3	28	
	Solo 3 - Areia muito compacta	18	15	35	

Fonte: (o autor).

Através dos valores indicados na Tabela 4, percebe-se que depois que fixado os valores de peso específico e ângulo de atrito, houve variação apenas na coesão que consequentemente alterou o valor do Fator de Segurança final.

Na primeira modelagem, os valores estimados dos parâmetros de resistência dos solos, resultaram um Fator de Segurança de 0,993, onde se pode concluir que naquele momento o talude já era considerado instável ($F.S. < 1$), ou seja, já estava em ruptura. A fim de estimar parâmetros mais coerentes e mais próximos de uma unidade, foi realizada a segunda modelagem, obtendo um Fator de Segurança de 1,026, que para estabilidades de talude, indica certa condição de estabilidade, porém muito próximo de 1,00. A partir daí foram realizadas mais três modelagens em que o Fator de Segurança, com a alteração do valor da coesão, variava na aproximação de 1,00.

Na quinta modelagem, os valores estimados já foram suficientes para satisfazer a metodologia de cálculo da retroanálise ($F.S. 0,999 < F.S. 1$), visto que o número de alterações dos valores da coesão, já era da ordem de um décimo (0,1) e, portanto, optou-

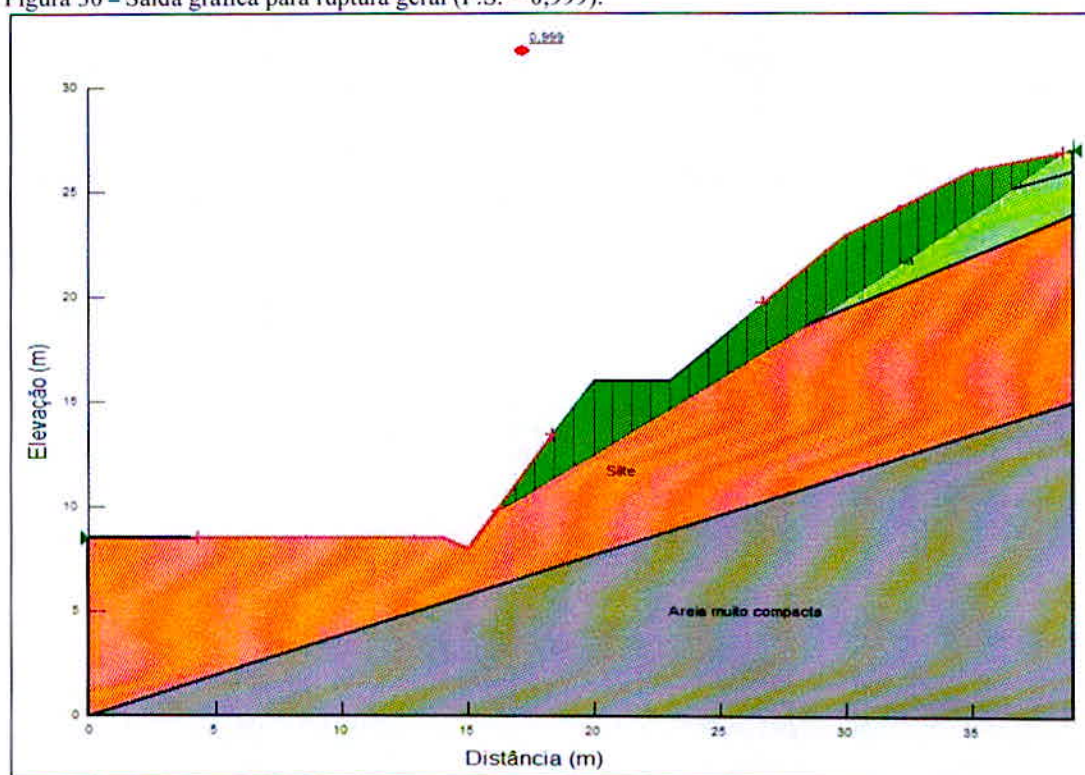
se parar por aqui. Estes valores foram apresentados na Tabela 5 e a Figura 36 apresenta a saída gráfica da modelagem da estrutura, para este tipo de ruptura.

Tabela 5 – Parâmetros de resistência do solo, para F.S. = 0,999.

Tipo de Solo	γ (KN/m ³)	c (KPa)	ϕ (°)
Solo 1 – Areia	16	0	25
Solo 2 – Silte	17	10,2	28
Solo 3 - Areia muito compacta	18	15	35

Fonte: (o autor).

Figura 36 – Saída gráfica para ruptura geral (F.S. = 0,999).



Fonte: (o autor).

Na ruptura do tipo local, foram realizadas duas modelagens a mais que a ruptura do tipo geral. No primeiro momento foram considerados os mesmos valores estimados para a ruptura do tipo geral e posteriormente foram alterados os valores de coesão. Ressalta-se que para a ruptura local em relação à ruptura geral, há alteração apenas na superfície de deslizamento. A Tabela 6, a seguir apresenta os resultados obtidos até a sexta modelagem.

Tabela 6 – Resultados obtidos para ruptura local.

Modelagem	Tipo de Solo	γ (KN/m ³)	c (KPa)	ϕ (°)	F.S.
1ª	Solo 1 - Areia	16	0	25	1,078
	Solo 2 - Silte	17	10	28	
	Solo 3 - Areia muito compacta	18	15	35	
2ª	Solo 1 - Areia	16	0	25	0,978
	Solo 2 - Silte	17	8	28	
	Solo 3 - Areia muito compacta	18	15	35	
3ª	Solo 1 - Areia	16	0	25	1,028
	Solo 2 - Silte	17	9	28	
	Solo 3 - Areia muito compacta	18	15	35	
4ª	Solo 1 - Areia	16	0	25	1,003
	Solo 2 - Silte	17	8,5	28	
	Solo 3 - Areia muito compacta	18	15	35	
5ª	Solo 1 - Areia	16	0	25	0,988
	Solo 2 - Silte	17	8,2	28	
	Solo 3 - Areia muito compacta	18	15	35	
6ª	Solo 1 - Areia	16	0	25	0,993
	Solo 2 - Silte	17	8,3	28	
	Solo 3 - Areia muito compacta	18	15	35	

Fonte: (o autor).

Logo na primeira modelagem, o valor do Fator de Segurança obtido, com os valores da ruptura geral foi de 1,078, este podendo ser considerado como estável. Como a técnica da retroanálise, consiste em que os valores do Fator de Segurança, devem ser inferiores a uma unidade, foi seguido à mesma linha de raciocínio da análise para ruptura do tipo geral.

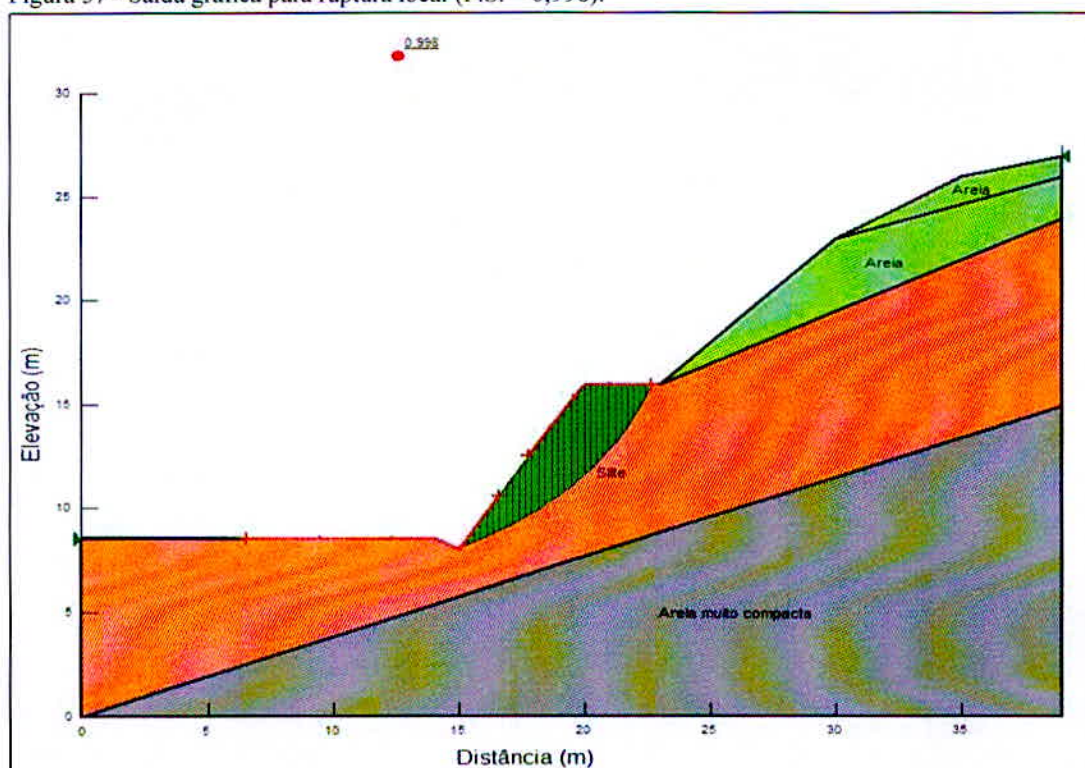
Os valores que satisfazem à condição da retroanálise, foram encontrados na sétima modelagem, resultando em um Fator de Segurança de 0,998, apresentados na Tabela 7 os parâmetros obtidos e a Figura 37, demonstra a saída gráfica.

Tabela 7 - Parâmetros de resistência do solo, para F.S. = 0,998.

Tipo de Solo	γ (KN/m ³)	c (KPa)	ϕ (°)
Solo 1 - Areia	16	0	25
Solo 2 - Silte	17	8,4	28
Solo 3 - Areia muito compacta	18	15	35

Fonte: (o autor).

Figura 37 – Saída gráfica para ruptura local (F.S. = 0,998).



Fonte: (o autor).

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho buscou apresentar através de um estudo de caso, uma maneira simples e rápida, capaz de facilitar a aplicação das técnicas de retroanálise em rupturas de taludes que possam ser consideradas como circulares.

Com a aplicação desta, elimina-se todo o procedimento trabalhoso utilizado para a determinação dos parâmetros de resistência dos solos, no qual por meio de tentativas e cálculos repetitivos, o F.S. é calculado e assim determinado os parâmetros de resistência dos solos.

Analisando e comparando os resultados das duas retroanálises elaboradas, chegou-se a conclusão que os parâmetros de resistência do solo que melhor descrevem a situação do talude no momento de ruptura, se devem a falta/perda de coesão. Na ruptura geral a coesão estimada foi de 10,2 KPa enquanto na ruptura local foi de 8,4 KPa havendo uma redução de aproximadamente 17,65% da ruptura englobando todo o talude, para a localizada.

É importante acrescentar que esses parâmetros obtidos correspondem a parâmetros médios equivalentes e que leva em consideração o comportamento médio da estrutura do talude, conforme já mencionado.

Conforme mencionado na revisão bibliográfica, existem outras formas de determinação dos parâmetros de resistência dos solos, além das técnicas de retroanálise, que são os ensaios laboratoriais, citado neste trabalho o ensaio de cisalhamento direto. Este tipo de ensaio possui rotinas que são executadas tanto em campo quanto em laboratório. Em campo é realizado o serviço de extração do corpo indeformado, no qual é gasto em torno de dois dias para a sua realização, sem falar nos fatores que podem atrasar a extração (condições climáticas desfavoráveis e o deslocamento campo/laboratório). No laboratório já é gasto mais um dia, para realização do ensaio (série 3 CPs), ou seja, no final os resultados poderão ser apresentados com três dias de trabalho, considerando condições favoráveis. Já para a realização da retroanálise, neste trabalho, foi gasto um dia para obter os resultados.

Outro fato importante que se deve levar em consideração, é o preço praticado no mercado para este tipo de ensaio. Em um orçamento realizado, apresentado na Tabela 8, o preço final apurado foi de R\$ 10.200,00.

Tabela 8 – Orçamento Ensaio de Cisalhamento Direto.

Descrição do Serviço	Preço (R\$)
Mobilização e desmobilização de equipe e equipamentos num raio de 300 km	8.850,00
Coleta e acondicionamento de 01 bloco indeformado em poço (30x30x30)	600,00
Ensaio de laboratório e apresentação dos relatórios com os resultados (3 CPs)	750,00

Fonte: (o autor).

Já a Tabela 9, apresenta o orçamento para a realização da retroanálise levando em consideração os preços praticados no mercado, obtido com profissionais da área, chegando ao valor final de R\$ 700,00.

Tabela 9 – Orçamento Retroanálise.

Descrição do Serviço	Preço (R\$)
Engenheiro Geotécnico (5 horas)	625,00
Cadista/Calculista (2 horas)	75,00

Fonte: (o autor).

Portanto, podemos concluir que além da diferença de tempo para a realização do ensaio de cisalhamento direto para a realização da retroanálise, existe uma diferença significativa quanto ao valor apurado para a apresentação destes resultados, onde podemos perceber que a técnica da retroanálise aplicada na engenharia geotécnica é considerada uma estimativa rápida e a baixo custo de se estimar/determinar os parâmetros de resistência dos solos, como pode ser comprovada por este trabalho.

9 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Apresenta-se a seguir algumas sugestões para trabalhos futuros que possam complementar ou estar relacionado a este trabalho:

- a) Dimensionamento da estrutura de contenção do tipo solo grampeado;
- b) Estudo do emprego de outras técnicas para recuperação do talude;
- c) Comparação dos resultados obtidos com resultados laboratoriais;
- d) Dimensionamento de elementos de drenagem para o talude.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABGE, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. **Geologia de engenharia**. São Paulo: Editores Antonio Manoel dos Santos Oliveira, Sérgio Nertan Alves Brito, 1998.
- ALMEIDA, GIL CARVALHO PAULO, **Caracterização Física e Classificação dos Solos**. 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11682: **Estabilidade de taludes**. Comitê Brasileiro de Construção Civil. Origem: Projeto 02:04.07-001/90. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6502: **Rochas e Solos**. Comitê Brasileiro de Construção Civil. Origem: Projeto NBR 6502/1995. Rio de Janeiro, 1991.
- BASTOS, PROF. CEZAR. **Mecânica dos Solos: Resistência ao Cisalhamento dos Solos**. Notas de Aula.
- CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Fundamentos. 6ª edição, Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos. Volume 1, 1988.
- CARVALHO, Pedro Alexandre Sawaya de et al. **Taludes de Rodovias: Orientação para Diagnóstico e Soluções de seus Problemas**. São Paulo: Ipt, 1991. 388 p
- GERSCOVICH, Denise M. S.. **Estabilidade de Taludes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 166 p.
- GOMES, Cláudio Luiz Ridente. **Retroanálise em Estabilidade de Taludes em Solo: Metodologia para Obtenção dos Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento**. Campinas: 2003. 146 p.
- CRAIG, Robert F.. **CRAIG Mecânica dos Solos**. 7. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2007. 380 p.
- GEO-SLOPE. Slope W. **User's Manual**. Edmonton, Canada: Geoslope Inc., 2014. Disponível em: <<http://www.geo-slope.com>>. Acesso em: 2014.

GUIDICINI, Guido; NIEBLE, Carlos M.. **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação**. 2. ed. São Paulo: Edgard Bluncher Ltda, 1983. 194 p.

MACHADO, Sandro Lemos, MACHADO, Miriam de Fátima. **Mecânica dos solos I: conceitos introdutórios**. Salvador, 1997.

MACHADO, Sandro Lemos, MACHADO, Miriam de Fátima. **Mecânica dos solos II: conceitos introdutórios**. Salvador, 1997.

MAIA, Paulo César de Almeida; SAYÃO, Alberto Sampaio Ferraz Jardim; SALLES, Raquel Ofrante. **Aplicação da Retroanálise Probabilística para Avaliação da Estabilidade de Taludes**. Rio de Janeiro: 2009. 9 f.

MARANGON, PROF. M., Unidade 04 – **Estabilidade de Taludes, Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra**.

MARANGON, PROF. M., **Elementos de Geologia**, 1995.

PEREIRA, Armando Belato. **Análise da Influência dos Grampos no Aumento da Estabilidade Global de Talude Contido em Solo Grampeado**. Ouro Preto: 2012. 99 p.

PINTO, Carlos de Souza. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

ROMERO, PROF. CÉSAR GOMES, **Obras de Terra**, CIV 247. Notas de Aula.

SOUZA, Gleicione Aparecida Dias Bagne de et al. **Técnicas para elaboração de trabalhos acadêmicos**. Varginha: Grupo Unis, 2012. 128 p.