

CLEBER SOARES DE LIMA JUNIOR  
MARIA ZÉLIA PORTUGAL GONÇALVES DOS SANTOS

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE  
DIMENSIONAMENTO DE TALUDES RODOVIÁRIOS**

CARATINGA  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CARATINGA  
ENGENHARIA CIVIL

2012

CLEBER SOARES DE LIMA JUNIOR  
MARIA ZÉLIA PORTUGAL GONÇALVES DOS SANTOS

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE  
DIMENSIONAMENTO DE TALUDES RODOVIÁRIOS**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Instituto Doctum de Educação e Tecnologia, como parte das exigências para conclusão do curso de Graduação em Engenharia Civil e como requisito parcial para à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Msc. Cristiane Sobral  
Coorientador: Prof. Tales Moreira de Oliveira

CARATINGA  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CARATINGA

2012

**Cleber Soares de Lima Júnior**

**Maria Zélia Portugal Gonçalves dos Santos**

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO  
DE TALUDES RODOVIÁRIOS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
submetida à Comissão Examinadora  
pelo Curso de Graduação em  
Engenharia Civil como requisito para  
obtenção do grau de Bacharel.

---

Prof. Msc. Cristiane Raquel do S. Sobral (Orientadora)

---

Prof. Msc. Priscila Soraia da Conceição

---

Prof. José Salvador Alves

## SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO .....	10
2 – JUSTIFICATIVA .....	12
3 – OBJETIVO DA PESQUISA .....	13
3.1 – OBJETIVO GERAL .....	13
3.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
4 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	14
4.1 - SOLOS .....	14
4.2 – MOVIMENTAÇÃO DOS SOLOS.....	14
4.2.1 – Resistência ao cisalhamento do solo.....	15
4.2.2 – Ângulo de atrito.....	16
4.2.3 – Coesão .....	17
4.3 – TALUDES.....	17
4.3.1 – Movimentação de taludes .....	18
4.3.2 – Classificação da movimentação de taludes .....	18
4.4 – FATOR DE SEGURANÇA DE UM TALUDE RODOVIÁRIO.....	20
4.5 – DIMENSIONAMENTO DE UM TALUDE RODOVIÁRIO .....	21
4.5.1 – Método empírico .....	21
4.5.2 – Método de análise de estabilidade.....	21
4.5.3 – Método das fatias (Lamelas).....	22
4.6 – CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS CONSTITUINTES DE TALUDES RODOVIÁRIOS.....	25
4.6.1 – Ensaio de limite de consistência ou liquidez .....	25
4.6.2 – Ensaio de granulometria .....	26
4.6.3 – Ensaio ao cisalhamento direto .....	26
4.6.4 – Ensaio ao cisalhamento triaxial.....	26
5 – METODOLOGIA.....	28
6 – ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	29
7 – CONCLUSÃO.....	33
8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	34
ANEXO A – DEMONSTRAÇÃO DE UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE .....	36

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Critério de ruptura de Mohr Coulomb .....	16
Figura 2 - Estrutura de um talude.....	17
Figura 3 – Exemplo de desprendimento de terra ou rocha. ....	19
Figura 4 – Exemplo de escorregamento (corridas). ....	19
Figura 5 - Exemplo de escoamento ou rastejo.....	20
Figura 6 – Equilíbrio de Força .....	23
Figura 7 – Método de Morgensten e Price (forças aplicadas a uma fatia de solo) .....	25
Figura 8 – Esquema da caixa de cisalhamento direto.....	26
Figura 9 – Esquema da caixa de cisalhamento triaxial .....	27
Figura 10 - Perfil do talude natural. ....	30
Figura 11 – Perfil do talude dimensionado empiricamente.....	31
Figura 12 – Perfil do talude dimensionado pelo método de análise de estabilidade (Morgensten e Price).....	32
Figura 13 – Tela inicial do Programa SLOPE/W Versão 5.15, GEO-SLOPE International, Ltd.....	36
Figura 14 – Representação da geometria do talude desenhada no programa SLOPE/W.....	37
Figura 15 – Representação da tela onde são introduzidos as propriedades do solo no programa SLOPE/W. ....	37
Figura 16 – Representação do desenho para definição das linhas da superfície de deslize e grade de centros de rotação no programa SLOPE/W. ....	38
Figura 17 – Representação do programa SLOPE/W SOLVE .....	38
Figura 18 – Representação da demonstração do resultado no programa SLOPE/W CONTOUR.....	39

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Incógnitas do método das fatias .....	23
Quadro 2 – Equações do método das fatias .....	24
Quadro 3 – Parâmetros do talude analisado .....	29

“Tudo posso naquele que me fortalece”

Filipenses 4:13

## **AGRADECIMENTOS**

### **Maria Zélia**

Agradeço a Deus primeiramente por ter me dado o dom da vida.

À minha família, em especial meus pais, por serem presentes em minha caminhada acadêmica.

Ao eu marido Paulo, por me ajudar em todas as vezes que precisei de sua explicação e me apoiar em minhas escolhas.

Aos meus colegas de sala, pela amizade e companheirismo.

Aos professores, em especial ao Tales Oliveira Moreira, por nos ajudar a construir este trabalho; mesmo não fazendo mais parte do corpo docente da Faculdade, ao professor Eduardo Marques, da Universidade Federal de Viçosa, por ter nos cedido materiais importantes para a construção deste trabalho; à professora Cristiane Sobral, pela presteza e auxílio na orientação e, finalmente, ao professor José Salvador Alves, por ser meu maior exemplo de profissional na área da Engenharia sendo, em muitos momentos, minha maior inspiração.

### **Cleber**

Agradeço a Deus, pois Ele não deixou faltar força para minha caminhada, que foi longa. A toda minha família e meus amigos, que fiz ao longo do curso, não podendo deixar de me lembrar dos professores que nos acompanharam nesta caminhada. Um muito obrigado aos professores Tales Oliveira Moreira e Eduardo Marques, da Universidade Federal de Viçosa, por terem nos cedido materiais importantes para a construção deste trabalho.

## RESUMO

Este trabalho buscou realizar a comparação entre dois métodos de dimensionamento de taludes rodoviários: o método empírico e o método de análise de estabilidade, utilizando o software SLOP/W da empresa GeoSlop. O dimensionamento pelo método empírico é baseado na análise tátil visual e na experiência do profissional, sendo o talude dimensionado com inclinação de 1:1,50. Este método não prevê sondagem, ao contrário do método de análise de estabilidade, no qual são realizados estudos do solo visando a sua identificação. Nos estudos de análise de estabilidade (Morgensten e Price), após a identificação do solo realiza-se o dimensionamento do talude através de simulação computacional, respeitando o fator de segurança mínimo de 1,5, de acordo com a NBR 11682 (1991). Para a comparação dos diferentes métodos utilizou-se dados reais referentes a um talude localizado na cidade de Viçosa – MG. De posse dos dados foi possível simular o dimensionamento dos taludes para cada um dos métodos descritos, e determinar o fator de segurança que cada método proporcionou. O método empírico não garantiu a estabilidade do talude, pois de acordo com a análise dos dados, tal método não alcançou o fator de segurança mínimo recomendado pela norma. O método de análise de estabilidade (Morgensten e Price) foi considerado seguro, pois o fator de segurança encontrado foi acima do recomendado.

Palavras chave: Estabilidade de taludes, fator de segurança, simulação computacional.

## ABSTRACT

This paper attempts to make a comparison between two methods of road embankments sizing: the empirical method and the method of stability analysis, using the software SLOP / W GeoSlop company. The design method is based on the empirical analysis in the visual and tactile experience of the professional, and the scaled slope with inclination of 1:1,50. This method does not provide for sampling, unlike the method of analysis of stability studies are performed in which the ground in order to be identified. In studies of stability analysis (Morgensten and Price), after identification of the soil is carried out by scaling the slope of computer simulation, respecting the minimum safety factor of 1.5 in accordance with the NBR 11 682 (1991). To compare the different methods we used real data concerning a slope in the city of Viçosa - MG. Armed with the data it was possible to simulate the design of slopes for each of the methods described, and to determine the safety factor provided that each method. The empirical method did not ensure the stability of the slope, because according to the data analysis, this method has not reached the minimum factor of safety recommended by the standard. The method of stability analysis (Morgensten and Price) was considered safe because the safety factor was found above recommended.

Keywords: Stability of slopes, safety factor, computational simulation.

## 1 – INTRODUÇÃO

A expansão econômica vivenciada no Brasil vem demandando a ampliação das rodovias, já que este é o principal meio de transporte utilizado para o escoamento de produtos, assim o volume de construção de estradas vem aumentando significativamente nos últimos anos.

Grande parte do país apresenta topografia acidentada, o que gera grande número de cortes e aterros no processo de execução das rodovias, tornando a construção de taludes um processo recorrente.

Tal processo apresenta grande importância, no que diz respeito à segurança e estabilidade das rodovias, principalmente em estradas como as da região de Minas Gerais, que devido ao relevo montanhoso demanda a construção de taludes em praticamente todas as vidas do estado.

Verificar a eficiência dos taludes rodoviários, no que tange a segurança e estabilidade destes, é de fundamental importância, uma vez que eles devem proporcionar à população, que faz uso das rodovias, seja pelo transporte público, privado ou particular, a maior segurança e conforto possível.

Os taludes rodoviários apresentam diversos problemas relacionados à estabilidade. Assim o estudo detalhado destas obras demonstra que em determinados casos, é preciso redimensionar até mesmo os taludes naturais, evitando o escorregamento de solo do talude para a estrada, fato que pode trazer transtornos como acidentes e engarrafamento das vias. Já os taludes artificiais apresentam problemas principalmente quando são construídos por solos transportados.

Os problemas relacionados à estabilidade dos taludes relacionam-se principalmente ao seu mau dimensionamento, definição do ângulo de atrito, coesão do solo e à sua resistência ao cisalhamento.

Neste trabalho estão apresentados dois métodos de dimensionamento de taludes, o método empírico, que é realizado por meio do conhecimento do solo pelo profissional somado à sua experiência e o método de análise de estabilidade, que se divide em análise de tensões e equilíbrio limite.

A análise de equilíbrio de limite se subdivide em diferentes métodos e dependerá da forma de simplificação do cálculo adotado para se realizar o dimensionamento mais conveniente para o talude. O método utilizado neste trabalho será o método das fatias de Morgenster-Price, por ser o mais utilizado.

## **2 – JUSTIFICATIVA**

A construção de taludes em rodovias é um recurso frequentemente utilizado, na região de Caratinga, Minas Gerais e em quase todas as regiões do Brasil que apresentam relevo montanhoso. O aspecto topográfico, consideravelmente sinuoso aumenta o número de rodovias que acompanha o contorno das montanhas, sendo a elaboração dos taludes indispensável.

Assim, o mau dimensionamento de um talude pode ocasionar graves transtornos, como: instabilidade da obra, deslocamento de terra e rochas, rebaixamento de vias, interrupção de trechos de vias, engarrafamentos de veículos e acidentes no trânsito envolvendo veículos públicos e particulares, podendo, em alguns casos, gerar vítimas fatais.

Desta forma, o presente trabalho se justifica devido à importância que os taludes rodoviários apresentam para a segurança das rodovias e conseqüentemente para as populações que fazem uso delas.

## **3 – OBJETIVO DA PESQUISA**

### **3.1 – OBJETIVO GERAL**

Comparar a segurança oferecida por taludes elaborados pelo método empírico e pelo método de análise de estabilidade de taludes (Morgensten e Price).

### **3.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Avaliar a estabilidade do talude, localizado na cidade de Viçosa – MG, por meio do método empírico;
- Avaliar a estabilidade deste mesmo talude pelo método de análise de estabilidade;
- Comparar a eficiência dos dois métodos utilizados em relação ao fator de segurança.

## **4 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **4.1 - SOLOS**

De acordo com Caputo (1988), os solos são materiais que resultam do intemperismo das rochas, podendo ser por desintegração mecânica ou decomposição química. Os três principais tipos de solos são:

- Solos Residuais:

São aqueles que permanecem no local da rocha de origem, podendo-se observar uma gradual transição do solo até a rocha;

- Solos sedimentares:

Estes solos são caracterizados por sofrerem a ação de agentes transportadores, podendo ser aluviados (pela água), eólicos (pelo vento), coluvionares (pela ação da gravidade) e glaciais (pelas galerias);

- Solos de Formação Orgânica:

São aqueles que se formam a partir da fração orgânica presente nos solos.

### **4.2 – MOVIMENTAÇÃO DOS SOLOS**

Os solos podem ser considerados como um tipo de material com comportamento diferenciado, já que ele apresenta os três estados físicos em sua composição: sólido, líquido e gasoso.

Além da composição diferenciada, ele apresenta dinamismo em seu comportamento, não podendo ser considerado um material estático. Tal fato pode ser atribuído a sua localização e constante exposição a diferentes tensões e variações climáticas.

Por não se comportar como um elemento de massa física única e estar constantemente exposto a tensões e outros fatores de alteração, o solo sofre movimentações frequentes que podem ser atribuídas a diversos fatores, como a resistência ao cisalhamento, ângulo e atrito e coesão, que serão descritos a seguir.

#### 4.2.1 – Resistência ao cisalhamento do solo

Os solos, de modo geral, resistem bem a tensões de compressão, porém têm uma capacidade bastante limitada de suportar tensões de tração e de cisalhamento. Segundo Pinto (2002), a resistência ao cisalhamento é a máxima tensão cisalhante que um determinado solo pode suportar, sem que haja ruptura do mesmo.

As tensões cisalhantes do solo são causadas por forças, tanto internas quanto externas. As forças externas podem ser causadas pela mudança da geometria do talude (inclinação e/ou altura), devido ao corte e aterro no talude, ao aumento de carga atuante ou pelas atividades sísmicas (TERZAGHI, 1952).

Uma causa interna que ocorre com frequência é a variação do nível da água, que gera variação do peso específico do material e da poro-pressão (redução da pressão efetiva) e saturação em areias (TERZAGHI, 1952).

A resistência ao cisalhamento dos solos utiliza um modelo matemático aproximado para relacionar a resistência ao estado de tensão atuante. O modelo mais utilizado é o critério de ruptura de Mohr Coulomb, baseado na lei de Coulomb e no critério de ruptura de Mohr (GERSOVINH, 2009).

Esse critério considera a envoltória de resistência ao cisalhamento do solo uma reta dada pela equação:

$$\tau = c' + \sigma \tan \phi' \quad \text{Equação 1}$$

onde:

- .  $\tau$  é a tensão de cisalhamento;
- .  $c'$  é a coesão;
- .  $\sigma$  é a tensão normal;
- .  $\phi'$  é o ângulo de atrito.

Os círculos de Mohr representam os estados de tensão do solo (Figura 1). A teoria de Mohr afirma que os materiais se rompem quando a tensão de cisalhamento, em um determinado plano, se iguala ou supera a resistência ao cisalhamento do material.

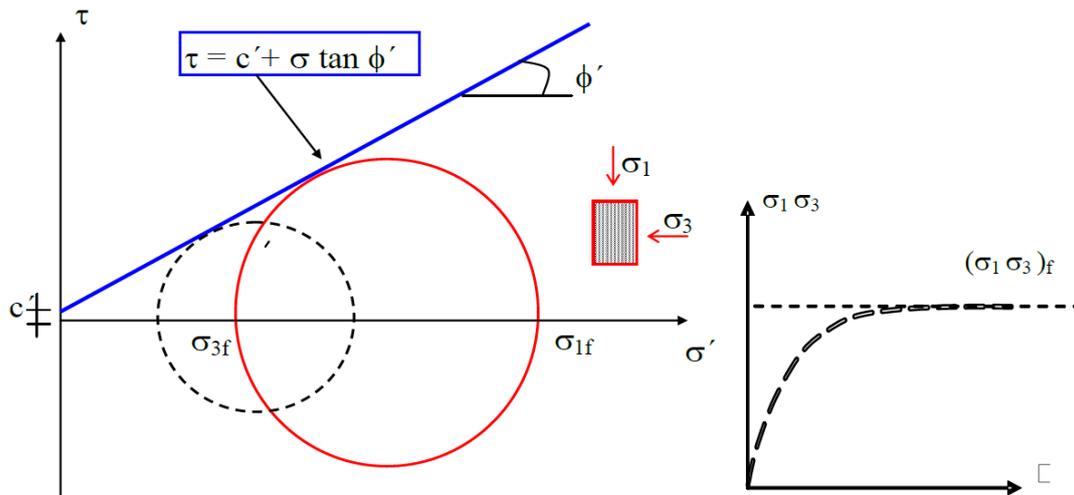


Figura 1 – Critério de ruptura de Mohr Coulomb. (GERSOVINH, 2009)

Ao se romper vários corpos de prova de mesmo solo, em distintas condições de solitação, serão obtidos vários círculos de Mohr. A reta tangente que passa por esses pontos será dada pela envoltória da resistência do solo, ou seja, esta reta definirá o estado iminente de ruptura do solo. portanto, este estado depende de dois parâmetros: ângulo de atrito e coesão.

#### 4.2.2 – Ângulo de atrito

Pinto (2002) define o ângulo de atrito como sendo o ângulo máximo que a força transmitida pelo corpo à sua superfície pode fazer com a normal ao plano de contato sem que ocorra deslizamento. O ângulo de um talude natural é o maior possível para que não haja deslizamento. (Horst 2007).

Para taludes com solos não coesivos, ou seja, as areias, o ângulo natural praticamente coincide com o ângulo de atrito interno. Para solos coesivos, as argilas, o ângulo de atrito teoricamente equivale a  $90^\circ$ . Porém, com a variação da quantidade de água (molhagem e secagem) do talude, aparecem fissuras que possibilitam a entrada de água no corpo do talude, gerando instabilidade e, como consequência, o ângulo natural do solo coesivo passa a ser em torno de  $40^\circ$  (CARDOSO 2002).

### 4.2.3 – Coesão

A palavra coesão tem como significado a força que une entre si as diversas moléculas ou parte de um líquido ou de um sólido. Na mecânica dos solos, este termo também pode ser utilizado com a mesma interpretação.

Entretanto a coesão, também, pode ser definida como uma força, que será determinada como a força equivalente a resistência ao cisalhamento de um solo, quando não houver nenhuma pressão externa sobre o este.

Machado (1997) aponta que a coesão está relacionada com a resistência de um solo, sendo independente de quaisquer tensões aplicadas e que se mantém, ainda que não necessariamente em longo prazo, se todas as tensões aplicadas ao solo forem removidas.

### 4.3 – TALUDES

Os taludes podem ser entendidos com superfícies inclinadas que limitam uma massa de terra e/ou rocha, como pode ser observado na Figura 2, sendo  $i$  o ângulo de inclinação. Estes podem ser naturais (encostas) ou artificiais (taludes de cortes e aterros).

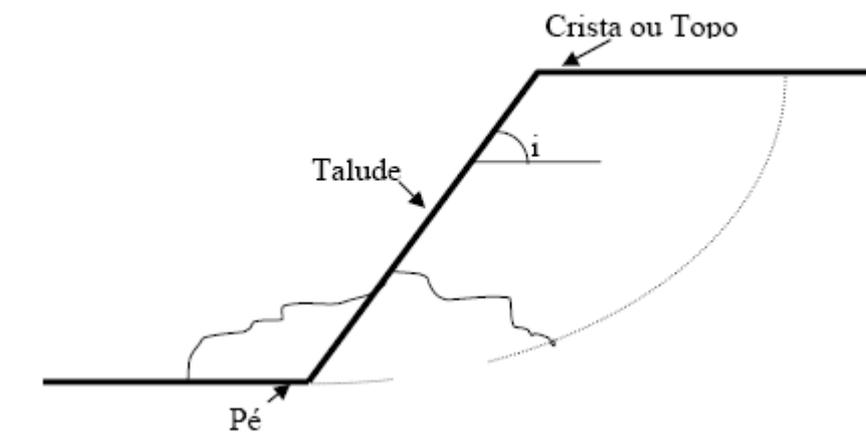


Figura 2 - Estrutura de um talude. (GERSOVINH, 2009)

Os taludes são importantes para a contenção de solos, principalmente em construções: residenciais (dependendo da topografia do terreno) e de

rodovias, em regiões acidentadas. Normalmente não apresenta nomenclatura específica, sendo apenas aqueles utilizados nas margens de rodovias denominados taludes rodoviários.

Em virtude das forças internas e externas que agem sobre estes, pode haver movimentações de solo, ocasionando desmoronamentos, escorregamento ou escoamento.

#### **4.3.1 – Movimentação de taludes**

Segundo Terzaghi (1952) podem-se dividir as causas de movimentação do maciço de um talude em causa externas, internas e intermediárias.

As causas externas são devidas às ações externas que alteram o estado de tensão atuante sobre o maciço. Esta alteração resulta num acréscimo das tensões cisalhantes que, igualando ou superando a resistência intrínseca do solo, leva o maciço à condição de ruptura, sendo elas o aumento da inclinação do talude; deposição de material ao longo da crista do talude e os efeitos sísmicos.

Por sua vez, as causas internas são aquelas que atuam reduzindo a resistência ao cisalhamento do solo constituinte do talude, sem ferir o seu aspecto geométrico visível, podendo ser o aumento da pressão na água intersticial e o decréscimo da coesão.

As causas intermediárias são as que não podem ser explicitamente classificadas em nenhuma das duas anteriores, como, por exemplo, a liquefação espontânea, a erosão interna e o rebaixamento do nível da água.

#### **4.3.2 – Classificação da movimentação de taludes**

Segundo Bianchini (2000), para se classificar a instabilidade de um talude ou a movimentação de massa, devem ser levados em conta alguns critérios importantes, como o tipo de material, a velocidade e o mecanismo do movimento do solo, as deformações, a geometria e a quantidade de água envolvida no processo.

Os tipos mais comuns de movimentação de taludes são:

- Desprendimento de terra ou rocha:

De acordo com Horst (2007), este fenômeno acontece quando uma porção de solo ou rocha de um fragmento se solta do resto do maciço, caindo livre e rapidamente (Figura 3).



Figura 3 – Exemplo de desprendimento de terra ou rocha. HORST (2007)

- Escorregamento (Corridas)

Para Guidicini (1983), este termo é uma definição ampla, sendo representado por deformações ou movimentos contínuos, podendo estar ou não presentes numa superfície definida, ou ao longo da qual a movimentação ocorre (Figura 4).



Figura 4 – Exemplo de escorregamento (corridas). GUIDICINI (1983)

- Escoamento ou Rastejo

De acordo com Horst (2007), este movimento implica no deslocamento lento e contínuo de camadas superficiais sobre camadas mais profundas, podendo ter ou não limite definido entre a massa do terreno que se desloca e o que não se movimentou (Figura 5).



Figura 5 - Exemplo de escoamento ou rastejo. HORST (2007)

#### 4.4 – FATOR DE SEGURANÇA DE UM TALUDE RODOVIÁRIO

Um projeto de engenharia possui sua segurança avaliada por meio de um fator de segurança (FS), definido como a razão entre a resistência disponível e o carregamento atuante.

Para Dell'Avanizi; Sayão (1988), a adoção de um valor de fator de segurança mínimo admissível em uma determinada obra implica na adoção de um risco calculado ou aceitável.

No caso de obras de engenharia que envolvem taludes rodoviários, o fator de segurança considerado aceitável é na ordem de 1,5 de acordo com norma NBR 11682 (ABNT, 1991).

## **4.5 – DIMENSIONAMENTO DE UM TALUDE RODOVIÁRIO**

O dimensionamento de um talude pode ser realizado seguindo diferentes parâmetros metodológicos, desde análises empíricas até análises complexas, que demandam ferramentas tecnológicas avançadas.

Diante de ampla variedade metodológica passível de ser utilizada no dimensionamento de taludes, serão descritas apenas as metodologias consideradas relevantes para o entendimento e compreensão do trabalho desenvolvido, respeitando os objetivos delineados pelo presente estudo.

### **4.5.1 – Método empírico**

De acordo com esta metodologia, os taludes são dimensionados com base na prática do profissional com inclinação variando entre 1:1 ou 1:1,5. Esta prática é frequentemente utilizada devido sua viabilidade econômica (BIANCHINI, 2000).

### **4.5.2 – Método de análise de estabilidade**

De acordo com Gersovich (2009) a análise de estabilidade permite avaliar a possibilidade de escorregamento de massa em um talude e envolve um conjunto de procedimentos que visa determinar um índice ou uma grandeza que permita quantificar quão próximo da ruptura um determinado conjunto de condicionantes atuantes se encontra (GERSOVICH, 2009).

Os métodos de análise de estabilidade se dividem em três grupos, sendo eles: os métodos analíticos (determinísticos), métodos experimentais e métodos observacionais, sendo os primeiros os mais utilizados. Existem dois tipos de abordagem dos métodos analíticos que possibilitam a determinação do Fator de Segurança (FS) sendo estes: a análise de tensões e a teoria de equilíbrio limite.

#### **4.5.2.1 – Análise de tensões**

A análise de tensões é realizada através da comparação entre as tensões e as deformações. A sua determinação recebe auxílio de softwares baseados nos métodos dos elementos finitos (MEF) ou das diferenças finitas (MDF). Em ambos, as tensões cisalhantes são comparadas com a resistência ao cisalhamento (GERSOVICH, 2009).

#### **4.5.2.2 – Análise de equilíbrio limite**

Esta teoria foi desenvolvida em 1916, por pesquisadores suecos, devido a um escorregamento ocorrido no cais de Stigberg, em Gotemburgo - Suécia. Tal teoria baseia-se na hipótese de haver equilíbrio numa massa de solo, tomada como um corpo rígido-plástico, na eminência de entrar em um processo de escorregamento (GUIDICINI, 1983).

Esta análise supõe que o solo se comporta como material rígido-plástico, ou seja, rompe-se bruscamente sem se deformar. As equações de equilíbrio estático são válidas até a iminência das rupturas, quando, na verdade, o processo é dinâmico e o FS é constante ao longo da linha de ruptura (GERSOVICH, 2009).

Quando o solo é heterogêneo e de superfície irregular, pode-se utilizar o método das fatias (lamelas) para a análise do equilíbrio limite.

#### **4.5.3 – Método das fatias (Lamelas)**

De acordo com Gersovich (2009) o dimensionamento, baseado neste método, pode ser esquematizado da seguinte forma:

- Inicialmente, subdivide-se o talude em fatias e assume-se a base de uma fatia linear;
- Efetua-se o equilíbrio das forças atuantes em cada fatia (Figura 6), assumindo que as tensões normais na base de cada fatia sejam geradas pelo peso de solo contido na fatia;

- E finalmente calcula-se o equilíbrio do conjunto através da equação de equilíbrio de momento.

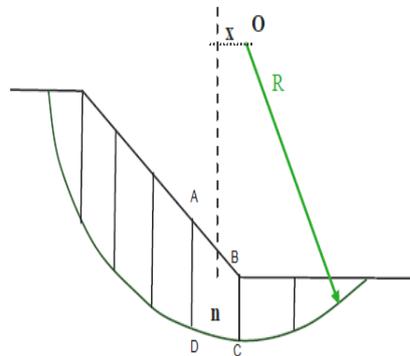


Figura 6 – Equilíbrio de Força. GUIDICINI (1983)

Este sistema de forças cria  $6n-2$  incógnitas, e apenas quatro equações ( $4n$ ) podem ser escritas no equilíbrio limite (Quadro 1 Quadro 2), o que torna esse problema indeterminado. No entanto, esse sistema tornar-se determinável com adoção de hipóteses simplificadoras que são adotadas conforme o método de análise em uso (GERSOVICH, 2009).

Quadro 1 – Incógnitas do método das fatias

Incógnitas	Descrição
$n$	Módulo da força normal à base de cada lamela, $N'$
$n$	Ponto de aplicação da força normal à base, $N'$
$n-1$	Módulo da força normal à interface entre as lamelas, $Z$
$n-1$	Ponto de aplicação da força normal à interface entre as lamelas
$n-1$	Módulo da força de cisalhamento na interface entre as lamelas.
$n$	Força de cisalhamento na base de cada lamela, $S_m$
1	Fator de Segurança, $FS$
$6n-2$	<b>Número total de incógnitas</b>

Fonte: GERSOVICH 2009

Quadro 2 – Equações do método das fatias

<b>Equações Conhecidas</b>	<b>Descrição</b>
n	Soma das forças na direção horizontal
n	Soma das forças na direção vertical
n	Soma dos momentos
n	Critério de ruptura de Mohr-Coulomb
4n	Número total de equações

Fonte: GERSCOVICH 2009

#### 4.5.3.1 – Método Morgenstern-Price (Morgenstern e Price)

Este método é similar ao método anterior, exceto que a inclinação da resultante das forças na interface entre fatias é assumida como uma variável da parcela de uma função. Essa parcela adicionada introduz uma incógnita, levando a  $4n$  incógnitas e  $4n$  equações.

GERSOVICH (2009) explica que, para que não haja rotação das fatias, a soma dos momentos no centro da base da fatia tem que se igualar a zero. (Figura 7).

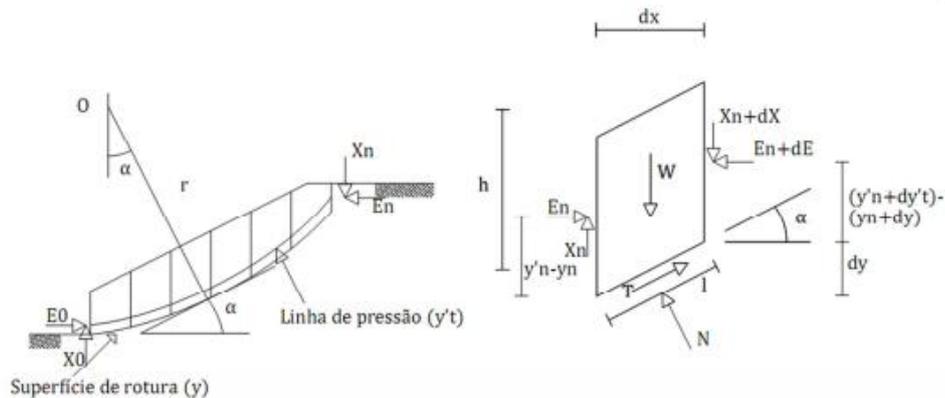


Figura 7 – Método de Morgenstern e Price (forças aplicadas a uma fatia de solo) GERSOVICH (2009)

#### 4.6 – CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS CONSTITUINTES DE TALUDES RODOVIÁRIOS

A construção de taludes rodoviários demanda a realização de ensaios para se determinar as características do solo que será trabalhado. Para determinar o tipo de solo e seus parâmetros são necessários alguns ensaios de laboratório que possibilitam essas caracterizações.

Segue os principais ensaios que são realizados no processo de caracterização do solo.

##### 4.6.1 – Ensaios de limite de consistência ou liquidez

O Limite de Liquidez pode ser entendido como a umidade abaixo da qual o solo se comporta como material plástico, ou seja, é a umidade de transição entre os estados líquido e plástico do solo (NBR 7180, 1982).

Já o Limite de Plasticidade pode ser definido como teor de umidade em que o solo deixa de ser plástico, tornando-se quebradiço, ou seja, é a umidade de transição entre os estados plástico e semissólido do solo (NBR 7180, 1982).

Esses ensaios são fundamentais no auxílio da identificação do tipo de solo. Para a realização deste ensaio devem ser obedecidos os padrões

normativos da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) de limite de Liquidez (NBR 6459, 1984) e Limite de Plasticidade (NBR 7180, 1982).

#### 4.6.2 – Ensaio de granulometria

O ensaio de granulometria possibilita determinar o tamanho médio dos grãos do solo. Este pode ser realizado por peneiramento ou por combinação de sedimentação e peneiramento.

Este ensaio possibilita elaborar uma curva de distribuição granulométrica, sendo importante para a classificação do solo e a sua realização deve seguir o proposto na NBR 7181 (ABNT, 1982).

#### 4.6.3 – Ensaio ao cisalhamento direto

No ensaio de resistência ao cisalhamento direto, coloca-se a amostra de solo em uma caixa bipartida (horizontal), em seguida aplica-se uma força normal  $N$  (vertical). Após este procedimento coloca-se uma força  $T$  (horizontal) na metade inferior da caixa, provocando o deslocamento de uma das partes da caixa em relação à outra até o momento em que ocorra a ruptura.

De acordo com VIECILI (2003) com este movimento a área do plano de ruptura é reduzida gradativamente, alterando assim as tensões normais e cisalhante durante todo o ensaio (Figura 8).

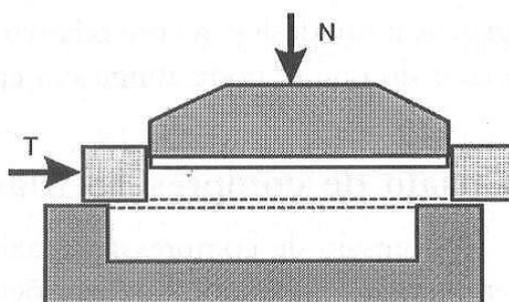


Figura 8 – Esquema da caixa de cisalhamento direto. PINTO (2002)

#### 4.6.4 – Ensaio ao cisalhamento triaxial

A realização deste ensaio demanda equipamentos complexos que são constituídos por uma câmara cilíndrica de parede transparente, no interior da qual se coloca a amostra, envolvida por uma membrana de borracha muito delgada.

A câmara cilíndrica é preenchida com água e a amostra é submetida às variações de pressão da água e cargas axiais adicionais, aplicadas em seus extremos, através de um pistão.

Estas cargas são aumentadas até que a amostra se rompa. Em cada teste, três ou mais corpos de ensaio são testados, sob diferentes pressões do fluido como pode ser observado na Figura 9 (Pinto, 2002).

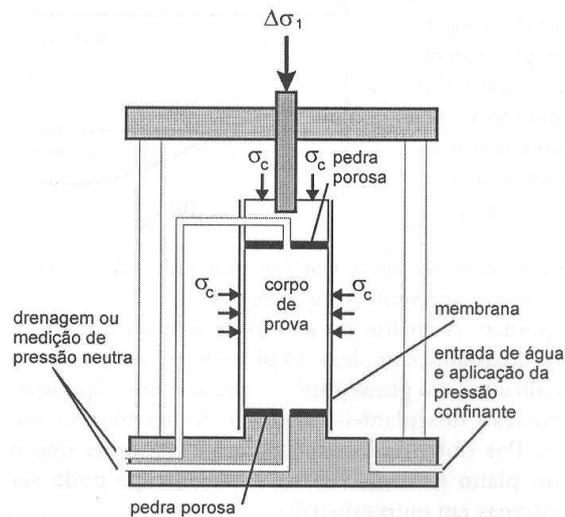


Figura 9 – Esquema da caixa de cisalhamento triaxial PINTO (2002)

## 5 – METODOLOGIA

Para a realização do presente estudo, escolheu-se um talude localizado próximo ao Departamento de Educação Física da Universidade Federal de Viçosa (UFV) que apresenta problemas de estabilidade.

Após a determinação do objeto de estudo, realizou-se uma visita ao local a fim de se obter dados para o desenvolvimento do trabalho. Entretanto o talude escolhido possui algumas características já identificadas, não sendo necessária a realização de alguns ensaios. Tais dados foram obtidos a partir de um relatório elaborado por Marques e colaboradores (2012).

Após a obtenção dos dados foram realizadas simulação utilizando o software SLOPE/W (Anexo A) visando à obtenção do fator de segurança para o talude considerando diferentes inclinações.

O programa descrito utiliza a teoria de equilíbrio limite para calcular o FS, podendo utilizar vários métodos diferentes para a obtenção do referido fator. Entretanto, definiu-se o método de Morgenstern-Price como base para o desenvolvimento do trabalho, por ser o mais utilizado.

Para a utilização do software, definiu-se a geometria do talude estudado, em seguida foram inseridos parâmetros do solo do talude em estudo, sendo eles: ângulo de atrito, coesão, altura, comprimento, peso específico, nível da água (quando necessário) e o tipo de solo. Em seguida foram definidas as linhas ou os pontos computados no raio de círculo da superfície de ruptura, gerando gráficos que possibilitaram realizar a análise do resultado, somada ao fator de segurança calculado.

Os ensaios foram realizados utilizando diferentes inclinações. Inicialmente considerou-se as dimensões naturais do talude, em seguida realizou-se um ensaio com inclinação 1:1,50 (método empírico) e finalmente utilizando a relação 1:1,75 (análise de estabilidade).

## 6 – ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

De acordo com dados de relatório utilizado (MARQUES 2012) constatou-se que na região em estudo há dois tipos de solo, sendo: o primeiro um solo residual de gnaiss de cor variada, com foliação preservada e constituído por intercalações de bandas quartzo-feldspáticas mais claras e outras formadas por piroxênios/anfibólios e biotitas, mais escuras; e o segundo solo encontrado apresentou coloração marrom, argiloso, sendo sua presença comumente associada a intrusões de rocha ígnea ou a presença de estruturas geológicas, com falhas.

Os dados utilizados durante a simulação, encontram-se no Quadro 3.

Quadro 3 – Parâmetros do talude analisado

Parâmetros do talude analisado	
Ângulo de atrito do solo marrom	37,1°
Ângulo de atrito do solo branco	33,0°
Coesão do solo marrom	120,0 KPa
Coesão do solo branco	9,5 KPa
Altura	55,86 m
Comprimento	120,00 m
Coesão do solo marrom	120,0 KPa
Coesão do solo branco	9,5 KPa
Peso específico do solo marrom (natural)	12,00 g/cm <sup>3</sup>
Peso específico do solo branco (natural)	7,94 g/cm <sup>3</sup>
Peso específico do solo marrom (saturado)	25,10 g/cm <sup>3</sup>
Peso específico do solo branco (saturado)	24,72 g/cm <sup>3</sup>

Fonte: MARQUES 2012

Inicialmente, a partir destes parâmetros, foi realizada uma análise do talude natural que apresenta inclinação de 1:0,5. O fator de segurança correspondente (determinado pelo software utilizado) foi igual a 1,327 (Figura 10).

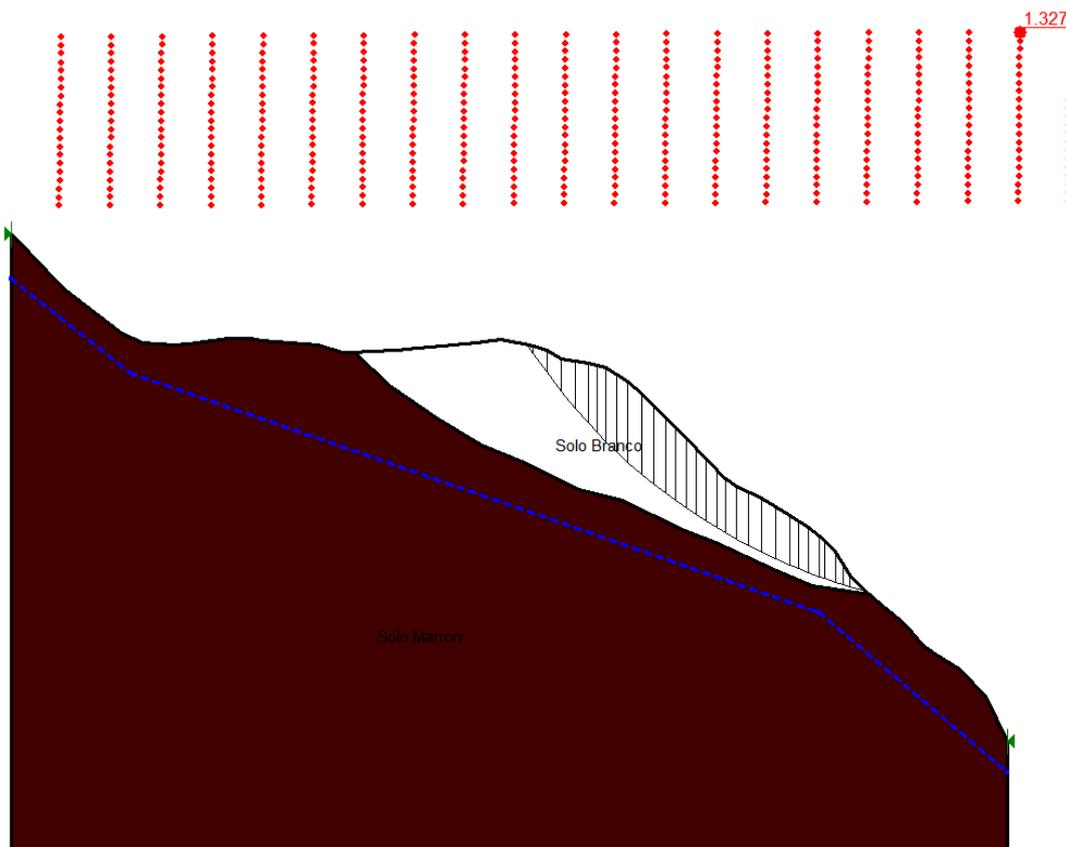


Figura 10 - Perfil do talude natural.

Tal inclinação não apresenta a segurança necessária inviabilizando a sua continuidade natural, pois implica na instabilidade deste talude, uma vez que o fator de segurança encontrado foi menor que 1,5 de acordo com as normas vigentes (NBR 11682, 1991).

Dessa forma, houve a necessidade do seu redimensionamento buscando adequar o fator de segurança, para que não ocorra qualquer tipo de escorregamento do solo. Tal fato deixa clara a necessidade de reajuste do talude em estudo.

O método empírico utiliza inclinação de 1:1,5, como anteriormente explicado. Para a determinação de seu fator de segurança também se utilizou o software, obtendo  $FS = 1,489$  (como pode ser observado na Figura 11) para esta inclinação de 1:1,5.

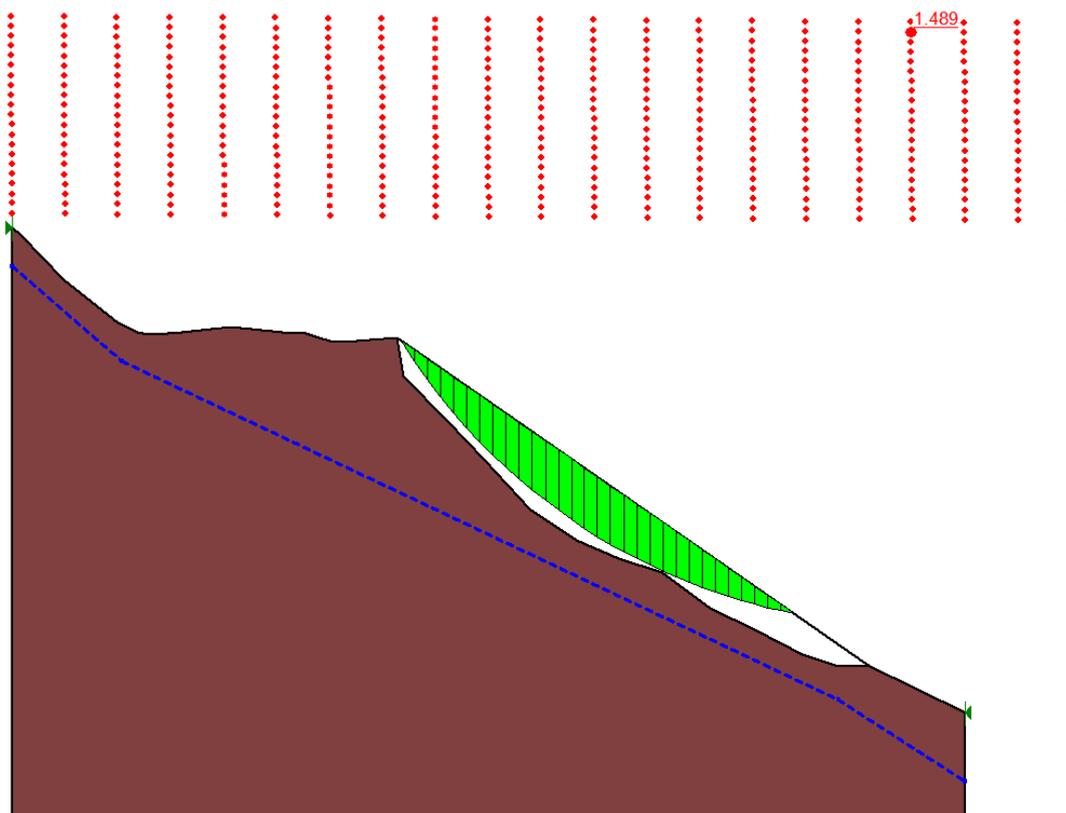


Figura 11 – Perfil do talude dimensionado empiricamente

Assim, pode-se observar que o fator de segurança 1,489 encontrado também foi menor que o recomendado de 1,5, inviabilizando o dimensionamento do talude pelo método empírico.

Pelo método de análise de estabilidade (Morgensten e Price), como a inclinação de 1:1,5 não resultou num fator de segurança satisfatório, passou-se para uma inclinação de 1:1,75 sendo encontrado pelo software  $FS = 2,150$  (como pode ser observado na Figura 12).

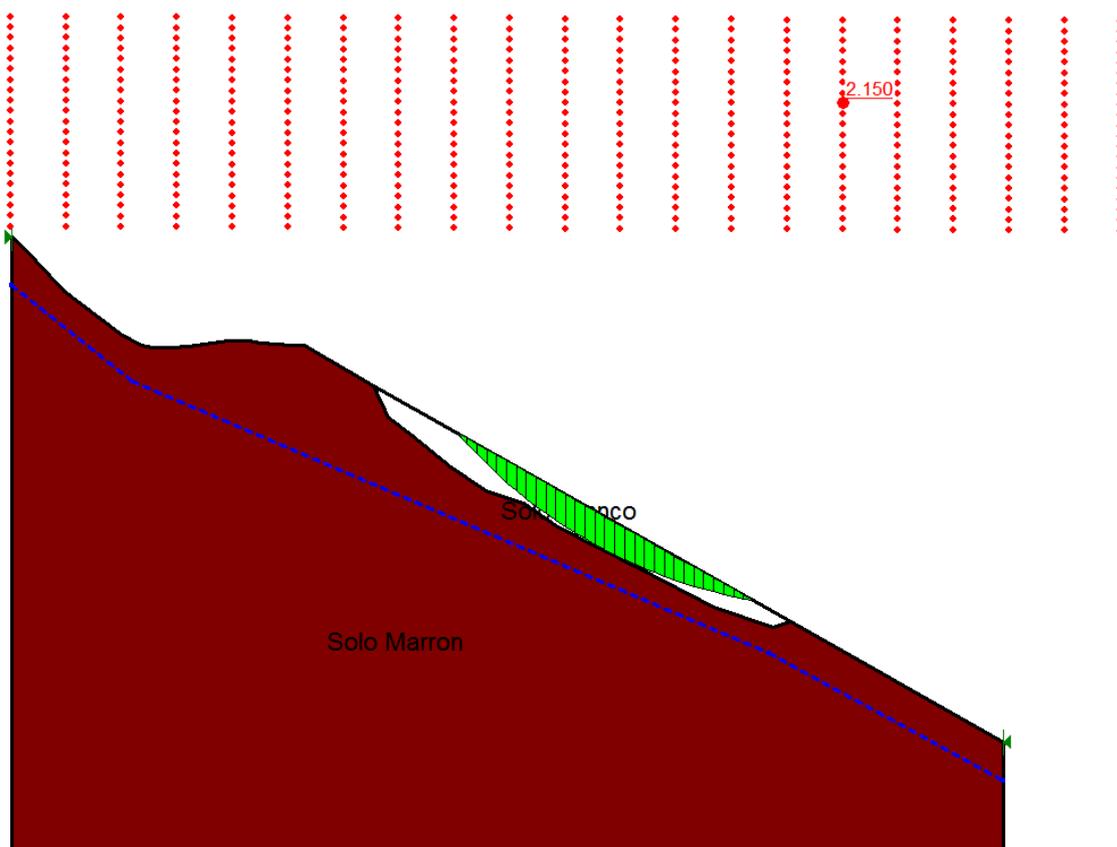


Figura 12 – Perfil do talude dimensionado pelo método de análise de estabilidade (Morgensten e Price).

Este resultado de  $FS = 2,150$  foi satisfatório por ser maior ou igual a 1,5 não sendo então necessário realizar um novo dimensionamento deste talude.

Caso o fator de segurança desta inclinação de 1:1,75, não fosse satisfatória, teria que redimensionar o talude com outra inclinação ate que se atinja um fator de segurança maior ou igual 1,5.

## 7 – CONCLUSÃO

O método empírico demonstrou-se ineficiente enquanto a segurança do talude estudado, já que o seu fator de segurança não atende ao requisito mínimo estabelecido em norma. Demonstrando assim, certa vulnerabilidade da metodologia, que é amplamente difundida.

O método de análise de estabilidade (Morgensten e Price) em inclinação 1:1,75 foi o mais eficiente quanto ao fator de segurança gerado, pois garantiu um valor bem acima do mínimo considerado pela norma.

A estabilidade de taludes demanda estudos e análises aprofundados, pois metodologias empíricas podem ocasionar instabilidade e conseqüentemente riscos às rodovias e seus usuários. Entretanto, ressalta-se que tal assunto não se esgota neste trabalho, recomendando-se novos estudos em diferentes regiões e em solos com características diferentes da do estudado, para apenas então poder-se fazer conclusões efetivas sobre a efetividade das metodologias empíricas.

## 8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, **Solo – Determinação de limite de plasticidade**. Norma Técnica NBR 7180. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, 1982.

ABNT, **Solo – Análise granulométrica**. Norma Técnica NBR 7181. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, 1982.

ABNT, **Solo – Determinação de limite de liquidez**. Norma Técnica NBR 6459. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, 1984

ABNT, **Estabilidade de talude**. Norma Técnica NBR 11682. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, 1991.

BIANCHINI, M. Regina. **Estudo da instabilidade de um talude rodoviário em São Jerônimo/RS. Dissertação do Programa de Pós Graduação em Engenharia civil da Escola da Universidade Federal do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 2000.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Fundamentos. 6ª edição, Rio de Janeiro: Livro Técnico e Científico, 1988.

CARDOSO, Dr. Francisco Ferreira. **Sistema de Contenção**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

DELL'AVANZI, Eduardo; SAYÃO. Alberto S. F. J. **Avaliação da probabilidade de ruptura de taludes**. In: XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG 1998, volume I, 1998.

DNIT, **MANUAL DE IMPLANTAÇÃO BÁSICA DE RODOVIA**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2010.

GEO-SLOPE. **Slope/w for slope stability analysis – User´s Guide Version 5. Geo Slope International Ltda.** Calgaey, Alberta, Canadá , 1991.

GERSCOVICH, Denise M.S. **Apostila de Estabilidade de Talude.** Universidade do Estado do Rio de Janeiro- UERJ, 2009.

GUIDICINI, Guido; NIEBLE, Carlos M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação.** 2ª ed. São Paulo: Editora Blucher, 1983.

HORST, Rafael. **Avaliação dos métodos para cálculo de estabilidade de taludes em maciço terroso.** Trabalho de conclusão de curso de engenharia civil da Universidade Regional do Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ihuí, 2007.

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

MARQUES, Eduardo e GRIPP, Joel. **Caracterização geotécnica e análise de estabilidade do talude a montante da área do departamento de educação física.** Relatório Técnico. Viçosa, MG, 2012.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas.** 2a ed. São Paulo. Oficina de Textos, 2002.

TERZAGHI, K., RICHART, F.E. **Stresses in rock about cavities.** Géotechnique, Vol.3, 1952.

VIECILI, Cristiano. **Determinação dos Parâmetros de resistência do Solo de Ijuí a partir do Ensaio de Cisalhamento Direto.** Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil da Universidade regional do Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, UNIJUÍ, 2003.

## ANEXO A – DEMONSTRAÇÃO DE UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE

Este anexo tem como objetivo demonstrar a utilização do software SLOPE/W. A Figura 13 apresenta a tela inicial do software. (GEO-SLOPE, 1991)

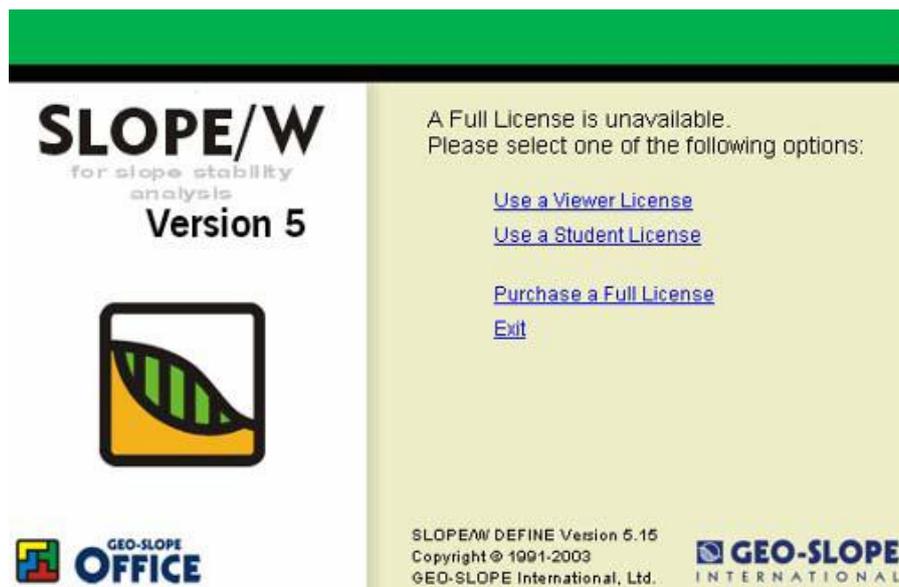


Figura 13 – Tela inicial do Programa SLOPE/W Versão 5.15, GEO-SLOPE International, Ltd.

O programa SLOPE/W possui três rotinas executáveis sendo:

- definir o modelo do talude que será analisado (DEFINI);
- computar os resultados (SOLVE);
- visualizar os resultados (CONTUOUR).

A primeira rotina do software se refere à definição do talude que será analisado. Para esta definição, deve-se inicialmente fazer a sua representação geométrica, como pode ser observado na Figura 14.

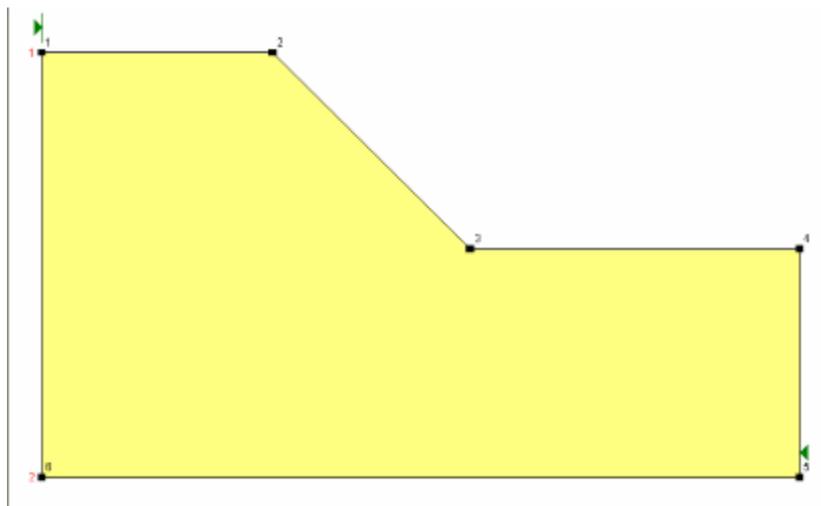


Figura 14 – Representação da geometria do talude desenhada no programa SLOPE/W.

Todos os dados, referentes ao talude e ao solo, são alimentados no software pela ferramenta DEFINI por meio de telas específicas, como por exemplo, a tela demonstrada na Figura 15.

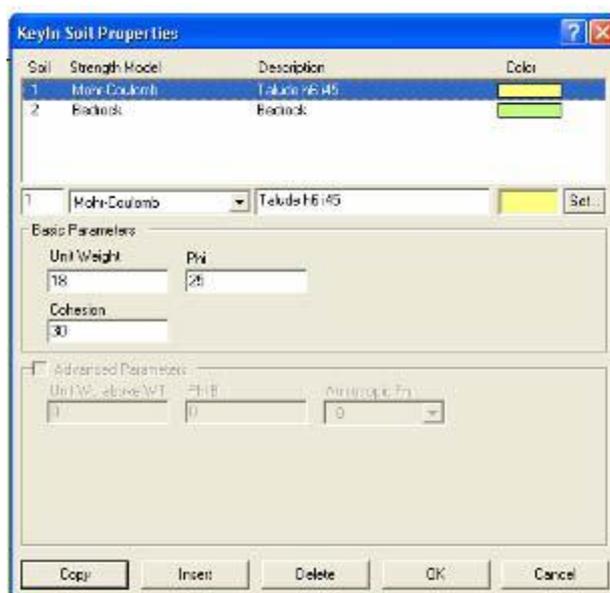


Figura 15 – Representação da tela onde são introduzidos as propriedades do solo no programa SLOPE/W.

Após a inserção de todos os dados, deverão ser definidos então os pontos ou linhas que serão utilizados para computar o raio do círculo da superfície de ruptura, como pode ser observado na Figura 16.

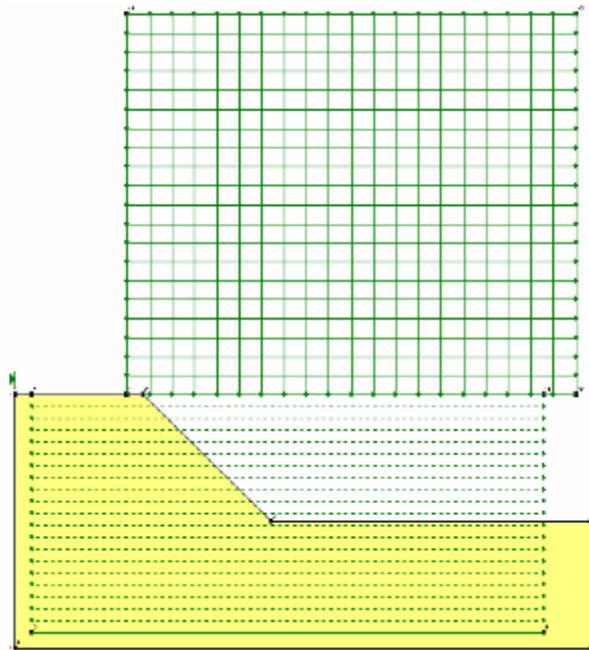


Figura 16 – Representação do desenho para definição das linhas da superfície de deslizamento e grade de centros de rotação no programa SLOPE/W.

Após a alimentação de todos os dados, passa-se à segunda rotina do software, onde os dados inseridos no software são computados pela ferramenta SOLVE, como pode ser observado na Figura 17.

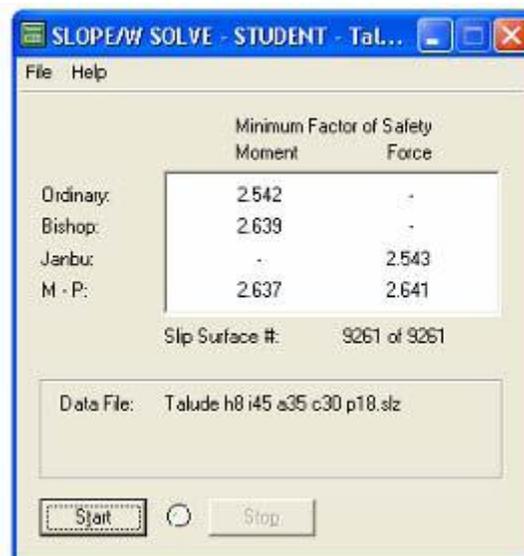


Figura 17 – Representação do programa SLOPE/W SOLVE

Na terceira e última rotina do software, os resultados obtidos podem ser visualizados pela ferramenta CONTOUR, como pode ser observado na Figura 18.

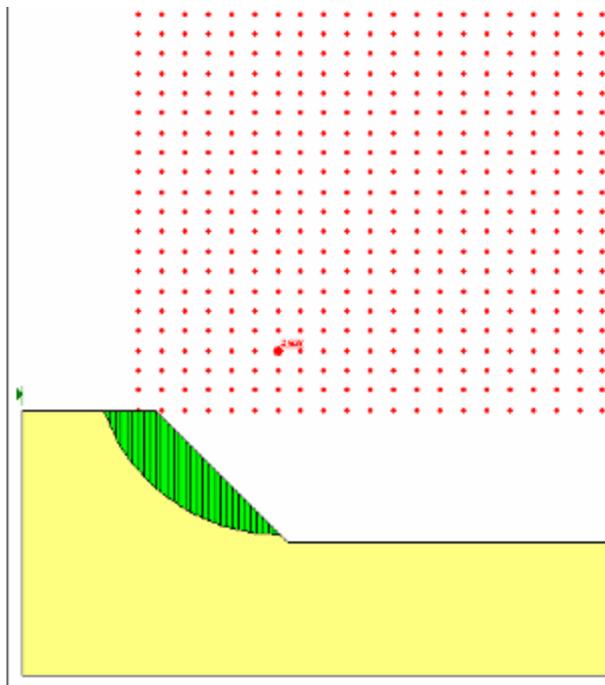


Figura 18 – Representação da demonstração do resultado no programa SLOPE/W CONTOUR