

Taludes Estabilizados por Retroanálise – Análise Crítica e Comparativa com Métodos de Equilíbrio Limite

Stabilized slopes by back analysis - critical and comparative analysis with limit equilibrium methods

Douglas Correia Moscateli ^{1,2}  <https://orcid.org/0000-0001-5683-714X>

Nelson Henrique Joly ¹  <https://orcid.org/0000-0001-5433-8080>

José Antônio Urroz Lopes ³  <https://orcid.org/0000-0002-9866-1661>

Vítor Pereira Faro ⁴  <https://orcid.org/0000-0003-0001-5459>

¹ Mestre em Engenharia de Construção Civil - Geotecnia, PPGECC – UFPR, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil,

² Oficial do Corpo de Engenheiros da Marinha do Brasil – Comando do Sexto Distrito Naval, Ladário, Mato Grosso do Sul, Brasil,

³ Mestre em Geologia Ambiental, PPGG – UFPR, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil,

⁴ Professor Adjunto D.Sc., Departamento de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, Paraná, Brasil.

E-mail do autor principal: Douglas Correia Moscateli douglasmoscateli@gmail.com

Resumo

Este artigo apresenta uma comparação entre os métodos usuais de análise de estabilidade de taludes: Fellenius [1], Bishop Simplificado [2], Spencer [3] e Morgenstern & Price [4], que utilizam parâmetros de resistência obtidos de ensaios de laboratório, e o método teórico e prático de estabilidade de taludes naturais, através do método de regressão desenvolvido por Lopes [5], que procura estimar a estabilidade de taludes artificiais, a partir dos parâmetros de resistência obtidos com o exame de cicatrizes de escorregamentos naturais. Utilizou-se como estudo de caso, um talude rodoviário, localizado na Serra do Mar paranaense, que foi reprojeto utilizando o referido método de regressão. A comparação mostrou que utilizando parâmetros obtidos em laboratório, o FS resultante do talude (2,1) apresentou-se muito superior ao que foi imposto ao projeto (1,4) e muito próximo do obtido pelo método de regressão de Morgenstern & Price (1,5), indicando tratar-se de um método supostamente conservador, com FS igual a 1,3.

Palavras-Chave: Taludes; Parâmetros de Resistência; Método de Lopes; Método de Regressão.

Abstract

This article presents a comparison between the usual methods of slope stability analysis: Fellenius [1], Bishop Simplified [2], Spencer [3] and Morgenstern & Price [4], which use resistance parameters obtained from laboratory tests, and the theoretical and practical method of natural slope stability, through the regression method developed by Lopes [5], which tries to estimate the stability of artificial slopes, based on the resistance parameters obtained by examining natural slip scars. A road slope located in Serra do Mar, Paraná, was used as a case study, which was redesigned using the regression method previously mentioned. The comparison showed that, using parameters obtained in laboratory, the FS resulting from the slope (2.1) was much higher than that imposed on the project (1.4) and very close to that obtained by the Morgenstern & Price (1.5) regression method, indicating that it is a supposedly conservative method, with FS equal to 1.3.

Key-words: Slopes; Parameters of Resistance; Lopes Method; Regression Method.

1. Introdução

Os movimentos de massa que acontecem tanto em taludes de corte e aterro quanto em encostas naturais, são ocasionados "por fatores que geram o aumento das tensões cisalhantes (sobrecargas, cortes, erosões, vibrações, etc) e/ou a redução da resistência dos solos (intemperismo, fissuramento, amolgamento e aumento da tensão neutra) que constituem os mesmos." [6].

A aplicação da retroanálise para análises de estabilidade de encostas, vem sendo bastante considerada no meio geotécnico, tanto que a consagrada USACE (Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos), menciona a possibilidade de sua aplicação para avaliar deslizamentos de solos e rochas, com o intuito de estimar as forças cisalhantes e os níveis piezométricos, além de aferir a estabilidade [7].

Galeandro et al., usando penetrômetro de bolso, demonstrou que camadas argilosas espessas e aparentemente homogêneas são, na realidade, extremamente heterogêneas e anisotrópicas e possuem propriedades variáveis causadas pela ação de processos como deposição, diagênese e intemperismo. Os referidos autores mencionaram que "O perfil de resistência do solo mostrou que a relevante variabilidade da resistência do solo [...] era mais alta que o esperado [...]" [8].

Christaras et al. estudando dois escorregamentos em margas do Neogeno do Golfo de Kapsali na Grécia, verificaram que essas margas, quando secas, parecem duras e coesivas, mas quando molhadas, perdem, imediatamente sua coesão. Testes de laboratório indicaram valores de $\phi = 23,2^\circ$ para condições secas que levavam à obtenção de um FS entre 1,05 e 1,3. Os estudos de regressão, então realizados, estimaram entretanto, ϕ de 18° e c de 4 kPa que resultaram em um FS entre 0,993 e 0,998; o qual explicava a ocorrência dos escorregamentos. A conclusão desses autores foi que "[...] o método de regressão produz resultados mais realistas do que os originais de laboratório porque leva em consideração as condições ocorrentes no momento da ruptura." [9].

Baseado nesse contexto, este trabalho busca ressaltar a importância das análises de estabilidade em encostas e, ainda, verificar a eficiência do método de retroanálise aplicado ao talude estudado nesta pesquisa; metodologia que foi desenvolvida por Lopes [5], descrita e apresentada no 3º CBGE, em Itapema-SC e utilizada por Queiroz [10] para o desenvolvimento de ábacos altura/inclinação dos taludes de uma ferrovia, descritos em sua Dissertação de Mestrado e,

do mesmo modo, Lopes o incluiu, também, em sua Dissertação de Mestrado [11]. Fiori & Carmigiani [12] incluíram o Método (por eles denominado "Método de Lopes"), em seu livro texto de Mecânica dos Solos e Moscateli [13] o discutiu em sua Dissertação de Mestrado. O Autor incluiu, ainda, o Método em seu livro sobre encostas [14] e o apresentou no EN-GGEO'2019, na Turquia [15].

Por fim, o objetivo do presente artigo é a realização de análises paramétricas de estabilidade, em um talude já estabilizado pela metodologia de regressão proposta por Lopes [5], comparando-a com métodos analíticos tradicionais, simulados em um programa computacional, tanto no que tange ao fator de segurança resultante, quanto aos parâmetros de resistência geotécnica obtidos por diferentes critérios.

1.1. Estudo de Caso

A encosta considerada para este trabalho, localiza-se entre os municípios de Morretes e Antonina, na Serra do Mar paranaense, mais precisamente na cidade de Antonina, no km 19,8 da rodovia PR-408, conhecida também como Rodovia Deputado Miguel Bufara.

Eventos pluviométricos extremos ocorridos entre os dias 10 e 11 de março de 2011, na região de Antonina e Morretes, particularmente na porção conhecida como Serra do Mar, ocasionaram problemas de instabilidades em encostas naturais e taludes de cortes e aterros, na rodovia PR-408, se estendendo por cerca de 260 m ao longo dessa rodovia.

Como solução para reestabilização da encosta, a empresa consultora (ENGEMIN) [16] propôs a retirada da porção inferior (soerguida) da ruptura, com a reestabelecimento do greide de pavimentação em seu nível original, conjuntamente com o retaludamento e drenagem do corte, adotando-se um talude padrão compatível com as características mecânicas que o material, ao que tudo indica, apresentou por ocasião da ruptura e com a geometria da encosta, sendo, para tal, adotada a metodologia desenvolvida por Lopes [5].

2. Métodos expeditos/empíricos de retroanálise

Os dois subitens abaixo, tem por objetivo explanar duas metodologias para retroanálise de taludes: o primeiro deles (Método de Hoek) [17] foi a base dos estudos que originaram o segundo (Método de Lopes) [5], empregado como a principal ferramenta de análise desta pesquisa.

2.1 Método de Hoek

O método proposto por Hoek [17], considera basicamente dois tipos de ruptura: a planar, que ocorre ao longo de feições estruturais bem definidas, como fraturas, falhas ou planos de acamamentos, e a circular ou rotacional, que ocorre em locais de solos e rochas brandas, razoavelmente homogêneos e que, como consequência, não têm suas propriedades mecânicas regidas por feições estruturais. Além da condição "a seco", o autor considera a possibilidade de influência de pressão da água sob duas formas: "fluxo normal descendente, paralelo ao talude, e fluxo horizontal, no qual o movimento livre descendente da água subterrânea é inibido pela presença de camadas horizontais ou de juntas argilosas impermeáveis.". O método também considera a possibilidade de influências de possíveis fendas de tração, saturadas ou secas [12].

Para o caso de ruptura circular (que foi o adotado no estudo de caso desta pesquisa), os grupos adimensionais adotados por Hoek [17], por fornecerem uma boa aproximação à função ideal, foram os abaixo:

$$X = i - 1,2 \phi \quad (1)$$

$$Y = (\gamma_{nat} H)/c \quad (2)$$

onde:

X = função que define o ângulo de talude;

Y = função que define a altura de talude;

i = ângulo de inclinação do talude;

ϕ = ângulo de atrito interno do solo;

γ_{nat} = densidade aparente natural do solo;

H = altura do talude; e

c = coesão do solo.

O primeiro grupo foi denominado por Hoek [17] "função ângulo de talude", ou simplesmente X, e o

segundo denominado "função altura do talude", ou Y. "Os valores da função X, quando plotados contra os da função Y, caem sobre uma curva singular, que pode ser agora usada como base para um ábaco, uma vez que, conhecendo-se um valor de X, o valor para a função $Y = \gamma H/c$ poderá ser obtido, e vice-versa."

As relações estabelecidas por Hoek [17] entre os parâmetros básicos de coesão e ângulo de atrito, e as duas funções X e Y, são de caráter aproximado. Essas funções foram sendo ajustadas por tentativas e seus resultados foram comparados com os obtidos utilizando-se os métodos tradicionais, até obter-se boa concordância. Com elas o referido autor desenhou o ábaco (Figura 1), cuja validade foi testada e confrontada com métodos usuais de estudo de estabilidade.

A partir dos dois grupos originais, representativos da condição "a seco", Hoek [17] introduziu correções para presença de água e fendas de tração, configurando seis situações (Figura 2), que possibilitam nove combinações das funções X e Y que, aparentemente, são suficientes para cobrir os casos mais importantes que poderão surgir na análise da estabilidade de taludes em potencial de ruptura.

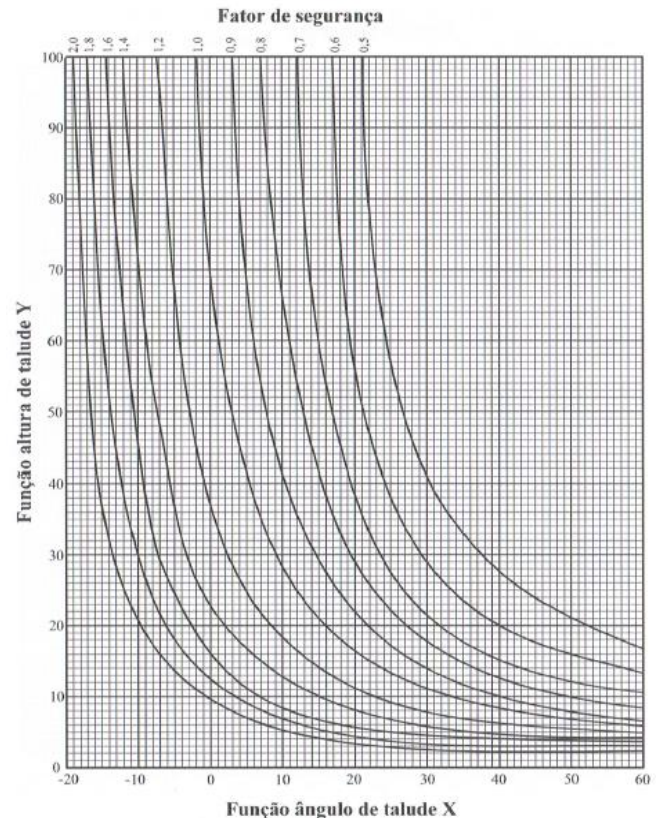


Figura 1: Ábaco de projeto de ruptura circular.

Fonte: Hoek (1972).

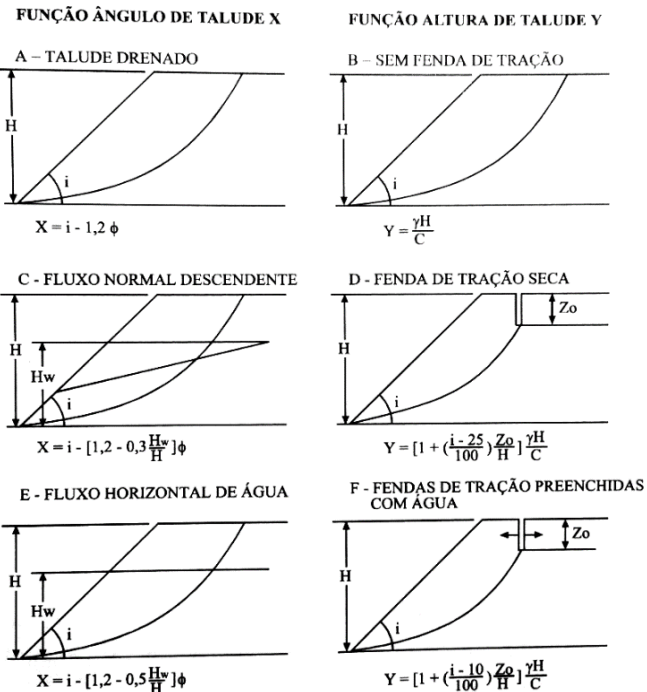


Figura 2: Funções X e Y para o acompanhamento do ábaco de ruptura circular.

Fonte: Hoek (1972).

onde:

X = função que define o ângulo de talude;

Y = função que define a altura de talude;

i = ângulo de inclinação do talude;

ϕ = ângulo de atrito interno do solo;

γ = densidade aparente natural do solo;

H = altura do talude;

H_w = altura do nível d'água;

Z_o = profundidade da fenda de tração; e

C = coesão do solo.

2.2 Método de Lopes

De acordo com Queiroz e Gaioto [17], fundamentado no ábaco de ruptura circular proposto por Hoek [17], Lopes [5] desenvolveu um método de estabilidade de taludes, que se baseia na observação de rupturas em encostas naturais ou taludes artificiais, como ensaio em escala natural.

Seguindo a premissa do raciocínio de Lopes, este afirma que: "a natureza como laboratório é insubstituível, e que os eventuais erros introduzidos pela observação e hipóteses de trabalho não são

maiores do que os costumeiramente introduzidos pela relação de escalas entre os ensaios e a realidade física e entre esta e as abstrações matemáticas." [5].

O método busca a obtenção de parâmetros médios de resistência (c e ϕ), a partir de estudos de regressão em cicatrizes de escorregamentos naturais, de mesma formação geológica baseando-se, nesse estudo, nas premissas estabelecidas por Hoek [17]. Tal método pode ser usado em anteprojeto como sugestão, não substituindo uma completa e rigorosa investigação geotécnica, ou como indicação preliminar para composição de orçamento. A ideia consiste basicamente em estimar taludes artificiais com alturas e ângulos de inclinações tais que apresentem condições de "estabilidade satisfatória", isto é, cujo fatores de segurança sejam no mínimo iguais aos que regem os taludes de escorregamentos naturais [5].

Para a análise de estabilidade dos taludes, o mesmo autor ainda parte de alguns princípios: (i) na assunção de que as superfícies de escorregamento representam uma situação limite entre o estável (que permaneceu) e o instável (que escorregou), ou seja, utilizando-se o linguajar usual da Mecânica dos Solos, elas possuem fator de segurança muito próximo da unidade uma vez que alguma coisa só escorrega, porque está instável e só para de escorregar porque atingiu a estabilidade e (ii) na validade das relações estabelecidas por Hoek [17].

A aplicação do método inicia-se por análises de imagens aéreas do local, com o intuito de detectar-se as cicatrizes de escorregamentos existentes. Uma vez localizadas as cicatrizes, a partir das informações obtidas das curvas de nível oriundas de restituições aerofotográficas ou de levantamentos topográficos, traçam-se os perfis longitudinais principais dessas cicatrizes, invertendo-se-as de tal modo que tenham como origem comum o ponto mais alto de cada uma delas. Na Figura 3 é traçada a envoltória dessas seções, onde podem ser escolhidos os possíveis ângulos de taludes nela inscritos:

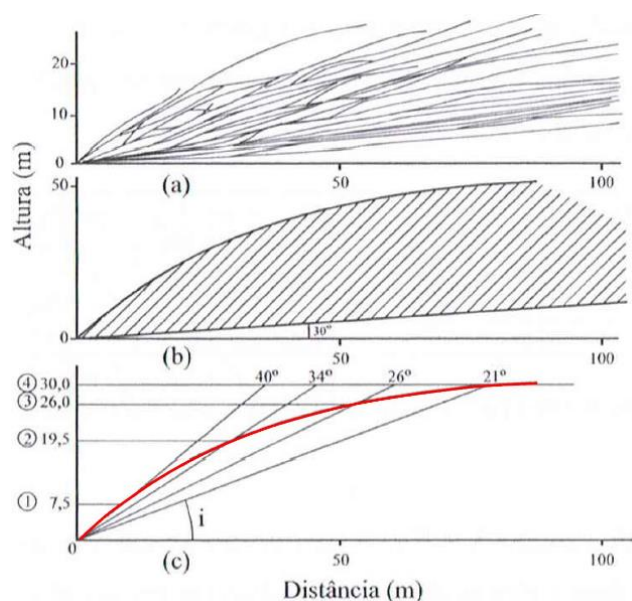


Figura 3: Ângulos de taludes e a curva envoltória.
 Fonte: Lopes (1981).

De acordo com Lopes, a outra fase do estudo se resume a vistoria(s) de campo. Esta(s) visa(m) obter características mais detalhadas dos locais das cicatrizes, o tipo de solo que constitui a vertente, condições hidrogeológicas, entre outros aspectos considerados característicos e importantes do local de estudo [5].

O autor do método ainda se baseia em determinadas observações que estabelecem as hipóteses de como se supõe terem ocorrido as rupturas: o grau de meteorização e pedogenização do material envolvido, a presença ou ausência e a posição do lençol freático e a probabilidade de ocorrência de fendas de tração e de seu preenchimento por água.

Depois do retorno do campo é identificada a hipótese mais provável da ruptura, ou seja, o motivo pelo qual, aparentemente, a vertente escorregou e sua forma: ruptura plana ou circular.

De posse das observações de campo, são estas comparadas às situações representadas na Figura 2, devendo-se então selecionar o par de equações X e Y mais adequado às condições do escorregamento. Escolhidas as duas funções, substitui-se os pares de valores altura/ângulo limite dos taludes escolhidos e estima-se o valor do peso específico do solo (γ_{nat}), que irão permitir o estabelecimento de um certo número de equações numéricas possíveis [5].

Nos parágrafos abaixo está sintetizada a técnica de estimativa por regressão, desenvolvida por Lopes [5]

a partir da metodologia de estimativa de estabilidade proposta por Hoek [17] no formato de tópicos, os quais descrevem as etapas de sua aplicação prática na encosta estudada, produzindo um passo a passo, síntese do artigo original, e possível de reprodução por demais autores que venham a estudar o método. Cabe ainda ressaltar, que as etapas abaixo foram aplicadas desse mesmo modo, pelos técnicos responsáveis pelo projeto de estabilização, no estudo de caso apresentado neste artigo.

1) O projeto de retaludamento da encosta teve início com levantamentos planialtimétricos realizados no local do escorregamento pouco tempo após os eventos. Com os dados dessa topografia foi possível construir um mapa com curvas de nível sobre o qual foram marcadas e analisadas as cicatrizes de escorregamentos existentes e, a seguir, desenhadas as seções principais dessas mesmas cicatrizes (invertidas), tendo como ponto comum, na origem, o seu ápice, conforme ilustrado na Figura 3;

2) Após isto, pôde ser desenhada a curva envoltória de todas as cicatrizes, onde foram escolhidos alguns ângulos de taludes característicos que a interceptavam, dando-se preferência àqueles mais usualmente empregados na fase de construção e considerando-se que valores inteiros facilitam no tabelamento das funções, ao mesmo tempo que era realizado, o registro da inclinação (i) e altura (H) de cada talude estabelecido;

3) Realizado esse procedimento, os técnicos responsáveis pelo projeto retornaram ao local do escorregamento com o intuito de estabelecer as prováveis condições que deflagraram o processo do rompimento;

4) Estabelecidas as hipóteses mais prováveis que causaram as rupturas, o próximo passo consistiu na escolha dos pares de funções X e Y (Figura 2), dentre as estabelecidas por Hoek [17], nas quais foram substituídos os pares de valores (inclinação/altura) encontrados na etapa 2 e o peso específico dos solos (γ_{nat}) obtido por meio dos ensaios laboratoriais;

5) A seguir, variando-se, o valor do ângulo de atrito dentro do intervalo de validade (10° a 40°), estabelecido por Hoek [17] e calculando-se os valores da função X correspondente, pôde-se, sobre a curva: Fator de Segurança (FS) = 1,0 do ábaco de Hoek (Figura 1) determinar os correspondentes valores da função Y e, uma vez de posse dos valores dessa função, calcularam-se os valores da coesão (c) que satisfaziam as condições impostas pelos taludes escolhidos;

- 6) De posse dos diversos pares c/ϕ possíveis, foram então desenhados gráficos que resultaram em curvas que se interceptavam em dois ou mais locais, indicando pares que atendiam simultaneamente a mais de um par, indicando valores próximos dos mobilizados durante a ruptura da encosta;
- 7) Examinaram-se, então, as regiões dos interceptos, substituindo os possíveis pares (c e ϕ) nas funções X e Y que lhes deram origem e, sobre o ábaco de Hoek, fazendo o caminho inverso da etapa 5, buscou-se o FS do talude correspondente, mais próximo da unidade;
- 8) Estabelecido o par de parâmetros representativo do momento da ruptura e, considerando ângulos de inclinação usuais em construção de cortes com fatores de segurança desejados, estabeleceram-se as alturas máximas de construção, a partir das funções X e Y , previstas para taludes drenados, de vez que eram previstos drenos subhorizontais nos taludes.

3. Materiais e métodos

Para auxiliar o desenvolvimento deste trabalho, foram necessários além dos diversos dados fornecidos pela empresa consultora do projeto de estabilização [16], referente ao estudo de caso, alguns ensaios e coletas complementares, para que então fossem possíveis as diversas análises e comparações objetivadas pelos autores deste artigo.

A metodologia do trabalho seguiu as etapas abaixo resumidas:

- 1) Levantamento de dados topográficos, geológicos e geotécnicos dos taludes estudados e históricos das movimentações, contidos em relatórios técnicos cedidos pela empresa consultora;
- 2) Coleta de amostra indeformada em campo para subsidiar os ensaios, e com os resultados obtidos, complementar os parâmetros aplicados na etapa de análises de estabilidade;
- 3) Realização de ensaios de cisalhamento direto para obtenção dos parâmetros de resistência do solo: coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ);
- 4) Estudo e investigação do Método de Lopes [5] e de Hoek [17], na obtenção dos parâmetros de resistência do solo, aplicados no estudo de caso, junto ao próprio autor do método, o MSc. José Antônio Urroz Lopes e suas publicações ([5], [11], [14], [15]), como também em bibliografias consagradas que tratam do tema: p. ex. Deere & Patton [19], Hoek [17], Sir Benjamin Baker (1881), transcrito por Spanger & Hardy [20], Fiori & Carmigiani [12], bem como por outros conhecidos autores da Mecânica dos Solos

como Terzaghi & Peck [21], Taylor [22] e Lambe & Whitman [23].

- 5) Estimativa por retroanálise, utilizando um programa de análise de estabilidade do tipo equilíbrio limite: software Slope/W (Geo-Slope International, 2007, versão 07), dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo, adotando-se o método clássico e rigoroso de Morgenstern e Price [4];
- 6) Simulação paramétrica de estabilidade com o software Slope/W, para a obtenção do fator de segurança dos taludes já dimensionados pela consultora (retaludados), aplicando os parâmetros obtidos no estudo de retroanálise por Morgenstern e Price [4];
- 7) Simulação paramétrica de estabilidade com o software Slope/W, para a obtenção do fator de segurança dos taludes já dimensionados pela consultora (retaludados), aplicando os parâmetros obtidos por meio de ensaios canônicos de laboratório;
- 8) Simulação paramétrica de estabilidade com o software Slope/W, para a obtenção do fator de segurança dos taludes já dimensionados pela consultora (retaludados), aplicando os parâmetros obtidos no estudo de regressão de Lopes [5];
- 9) Comparação e análise crítica dos resultados dos fatores de segurança (FS) obtidos nas etapas anteriores, com ênfase para a metodologia proposta por Lopes [5] e comparações entre esta e as demais metodologias.

4. Apresentação dos resultados

Este item aborda os resultados dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos, o intercepto coesivo (c) e ângulo de atrito (ϕ), obtidos por intermédio das metodologias aplicadas neste trabalho. Os referidos parâmetros foram aplicados comparativamente nas análises determinísticas tradicionais de estabilidade, apresentadas no item 4.5.

4.1. Ensaios laboratoriais

Os ensaios de resistência ao cisalhamento direto obtiveram parâmetros de resistência para as condições de pico (na ruptura). Realizados os ensaios, foi possível definir a envoltória de ruptura em termos de tensões efetivas. Os resultados obtidos para os parâmetros, apresentaram para a coesão o valor de 18,4 kPa, e para o ângulo de atrito: 30° .

4.2. Obtenção dos parâmetros por correlações

Em razão da dificuldade de se escavar o talude a profundidades superiores a 1,5 metros, somente foi feita a coleta de amostras indeformadas na primeira camada, próxima a superfície e, conseqüentemente, só foi possível caracterizar os parâmetros de resistência desse primeiro horizonte de solo. Em razão desse fato, e para suprir esta deficiência, foi adotada neste trabalho, uma estimativa dos parâmetros geotécnicos,

efetuada através de correlações entre o índice de resistência à penetração (NsPT) e os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo, disponíveis na literatura técnica.

O talude do estudo de caso em questão, apresentou na camada inferior, um solo composto por silte muito arenoso e com pouca argila, variando de 4 a 14 metros aproximadamente, conforme ilustrado na sondagem geotécnica da Figura 4 e no perfil geotécnico da Figura 8.

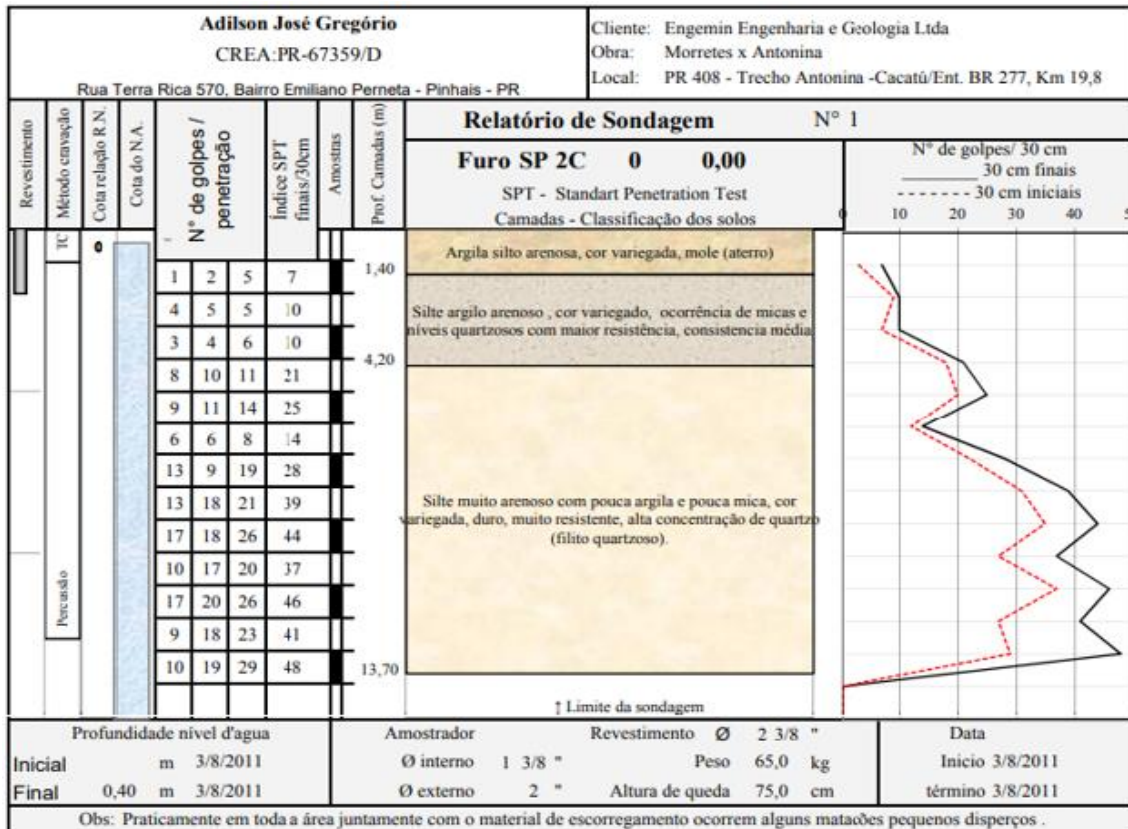


Figura 4: Sondagem geotécnica do estudo de caso, com a descrição dos tipos de solos residuais. Fonte: ENGEMIN (2011).

Para a estimativa do ângulo de atrito na camada do Solo Residual B, foram utilizadas e comparadas duas correlações.

A primeira proposta por TEIXEIRA (1996), apud Cintra [24]:

$$\phi = \sqrt{(20 \cdot N_{spt}) + 15^\circ} \quad (3)$$

A segunda proposta por BOWLES (1996), apud Tonus [25]:

$$\phi = 0,45 (N_{70}) + 20 \quad (4)$$

Onde:

$$N_{70} = ((N_{spt} \cdot \text{Energia aplicada}) / 0,70) \quad (5)$$

Aplicando nas equações, o N_{spt} médio da camada no valor de 34,3 golpes / 0,3 m, e o valor de 0,66 correspondente a 66% da energia teórica de queda livre aplicada durante o ensaio, de acordo com Schnaid [26], obteve-se como resultado um ângulo

de atrito igual à 41° para a correlação de Teixeira (1996) e de 34° para a de Bowles (1996), ambos dentro do intervalo característico para material arenoso. Foi adotado nos estudos de estabilidade desta pesquisa, o menor desses valores, procurando-se dessa forma, trabalhar com um cenário mais pessimista e conservador.

Para a estimativa da coesão (c) e do peso específico natural (γ_{nat}), o autor principal buscou valores na literatura, a qual considera ensaios em solos representativos da mesma região, sendo, por isso, adotados valores ligeiramente superiores aos encontrados nos ensaios da primeira camada (Solo Residual A), procurando manter-se um conservadorismo na estimativa e uma equivalência com dados reais de ensaios. O Quadro 1 resume os parâmetros estimados e adotados para a camada do Solo Residual B referente ao estudo de caso.

Quadro 1: Resumo dos parâmetros obtidos por correlações e na literatura para o solo residual B (Antonina - PR)

PERFIL	c (Kpa)	ϕ (graus)	γ_{nat} (KN/m ³)
Solo Residual B	19	34	18,5

Fonte: Moscateli (2017) [13].

4.3. Retroanálise Morgenstern e Price (1965)

Conforme descrito no item 3 - Materiais e Métodos, foi necessário o levantamento de informações para a entrada de dados no modelo de retroanálise aplicado ao software Slope/W. Estas foram obtidas dos levantamentos topográficos fornecidos pela empresa consultora e de observações diretas feitas nos locais que permitiram reconstituir a geometria inicial das encostas: aquela imediatamente anterior ao escorregamento de Antonina.

No que tange à condição da pressão neutra no interior do maciço, foi adotada uma linha piezométrica localizada a meia altura da encosta, ou seja, considerando esta última numa condição próxima da saturada, em razão do encharcamento do solo causado pelos intensos eventos pluviométricos e pela ausência de dispositivos de drenagem, situação esta, considerada a mais provável, por ocasião da deflagração dos escorregamentos.

Seguindo a metodologia proposta no item 3 (etapa 5), com o objetivo de estimar os parâmetros médios equivalentes de resistência do talude natural que mais próximos representaram a resistência média no

momento da ruptura, partiu-se do trabalho feito por Tonus [25], à qual realizou análises em uma encosta próxima à região de estudo desta pesquisa, com características geológico-geotécnicas da região da Serra do Mar paranaense, e que apresentou sinais de instabilidades passando por obras de estabilização.

Após serem realizadas diversas iterações e ajustes no modelo, fundamentado em Dell'Avanzi et al. [27], o qual produziu um trabalho onde reúne valores de parâmetros de resistência publicados pelo próprio autor e por Suzuki (2004) em conferências e relatórios técnicos, referente a ensaios de cisalhamento direto e triaxial drenado, de solos residuais originados de rochas de Migmatito; pôde-se chegar a um satisfatório ajuste da superfície de ruptura e do fator de segurança unitário ($FS = 1,039$), que representariam a iminência do deslizamento, obtendo-se assim, os menores valores médios dos parâmetros de resistência que levariam ao colapso do maciço: $c = 9,8$ KPa e $\phi = 26^\circ$ para a camada A de solo residual e $c = 10,5$ KPa e $\phi = 28^\circ$ para a camada B de solo residual, valores esses, bastantes próximos e contido no intervalo apresentado por outros autores na literatura e nos ensaios de laboratório desta pesquisa.

4.4. Retroanálise Lopes (1981)

Seguindo as etapas 1 e 2 do passo a passo do método (item 2.2), foram sobrepostos os perfis levantados a partir das cicatrizes do escorregamento, no trecho em estudo, onde foi possível delimitar a envoltória característica dessas cicatrizes (Figura 5) e os possíveis taludes que a interceptam (Figura 6).

Foram determinados cinco segmentos de taludes cujos ângulos escolhidos e alturas máximas correspondentes foram os seguintes:

$i = 43^\circ$	$H = 12,48$ m
$i = 38^\circ$	$H = 15,67$ m
$i = 31^\circ$	$H = 19,47$ m
$i = 27^\circ$	$H = 24,32$ m
$i = 25^\circ$	$H = 27,35$ m

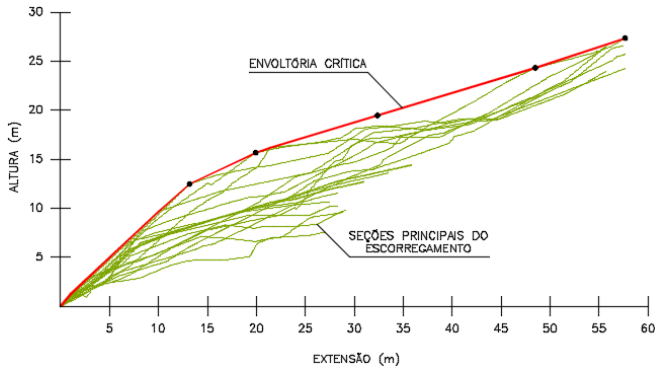


Figura 5: Sobreposição das cicatrizes de escorregamento e delimitação da envoltória característica.

Fonte: Adaptado de ENGEMIN (2011).

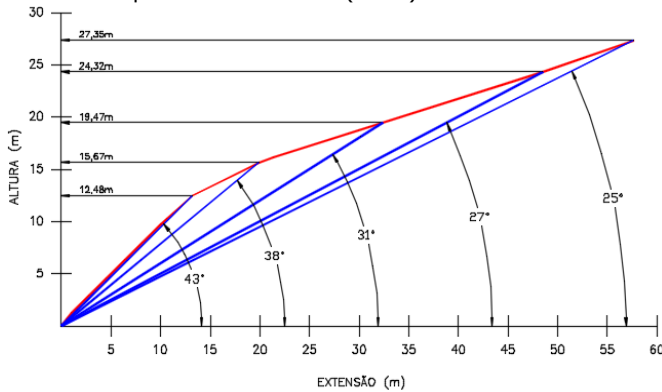


Figura 6: Escolha dos taludes limites e seus respectivos pares de inclinação e altura.

Fonte: Adaptado de ENGEMIN (2011).

Seguindo a etapa 3 e 4 do mesmo item, por se tratar de movimentos recentes, foi relativamente fácil estabelecer as condições em que ocorreram as rupturas.

Dentre os condicionamentos ambientais propostos por Hoek [17] (Figura 2), todas as evidências de campo acerca das condições em que ocorreram as rupturas, indicaram a elevação da pressão neutra pelo excesso de chuva, o que permitiu descartar o cenário com taludes drenados e presumir-se o não desenvolvimento de fendas de tração.

Com base nesses fatos, foram definidas as variáveis para os valores numéricos das funções e o estabelecimento das hipóteses para execução dos cálculos, que foram as seguintes:

- Situação de estabilidade dos taludes resultantes de escorregamentos ($F_s \approx 1$);
- Presença de nível d'água à meia altura dos cortes ($HW/H = 0,5$);
- Validade de utilização de "parâmetros equivalentes médios" ao longo dos cortes;

- Peso específico do solo em estado natural, obtido por estimativa: $\gamma_{nat} = 2,00 \text{ g/cm}^3$.

Substituindo então, nas funções de cada um dos taludes adotados, as variáveis estabelecidas, pelos valores numéricos, foram obtidas duas combinações de equações para cada possibilidade de talude presente no estudo de caso.

Dando continuidade ao processo de cálculo, (etapa 5), foram atribuídos valores na faixa de 10° a 40° para a variável ângulo de atrito, correspondente à função ângulo de talude (X), para cada um dos taludes, onde foi possível determinar seus respectivos valores.

Após obter-se os valores para as funções ângulo de talude (X), pôde-se no ábaco de Hoek [17] (Figura 1), sobre a curva $FS = 1,0$, por estar buscando parâmetros do momento de ruptura, determinar os valores de Y, que, por sua vez, forneceram os valores de coesão.

O passo seguinte consistiu na colocação, em gráfico, dos diversos pares c/ϕ passíveis de atenderem às condições impostas por cada talude-limite e em verificar-se regiões de intersecções entre dois ou mais deles, uma vez que, nessas regiões deveriam situar-se os pares que atendem às condições dos diversos taludes parciais.

A título de exemplo, o Quadro 2 e a Figura 7, demonstram respectivamente: a planilha contendo os diversos pares de parâmetros obtidos por intermédio de iteração do método e, o respectivo gráfico com as curvas correspondentes de cada talude.

Quadro 2: Possíveis pares de parâmetros (c/ϕ) para o cenário: Talude com fluxo normal descendente e sem fenda de tração)

Talude com fluxo normal descendente e sem fenda de tração									
Talude 1		Talude 2		Talude 3		Talude 4		Talude 5	
ϕ (graus)	c (g/cm2)	ϕ (graus)	c (g/cm2)	ϕ (graus)	c (g/cm2)	ϕ (graus)	c (g/cm2)	ϕ (graus)	c (g/cm2)
10,0	247,9	10,0	257,7	10,0	238,3	10,0	242,0	10,0	247,5
15,0	200,6	15,0	203,0	15,0	180,3	15,0	179,5	15,0	176,5
20,0	158,6	20,0	155,9	20,0	129,8	20,0	121,0	20,0	114,0
25,0	121,2	25,0	115,6	25,0	84,7	25,0	70,5	25,0	54,7
30,0	89,5	30,0	78,0	30,0	41,9	30,0	48,6	30,0	54,7
35,0	59,4	35,0	45,4	35,0	38,9	35,0	48,6	35,0	54,7
40,0	33,7	40,0	31,3	40,0	38,9	40,0	48,6	40,0	54,7

Fonte: Moscateli (2017).

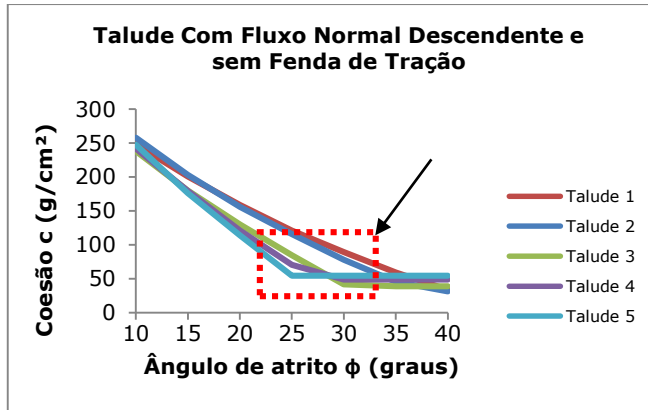


Figura 7: Gráfico: $(c \times \phi)$ para taludes com fluxo normal descendente e sem fenda de tração. Fonte: ENGEMIN (2011).

Com os diversos pares c/ϕ colocados no gráfico, seguindo a instrução da etapa 7 e considerando a região de intercepto das curvas no gráfico, calculou-se o fator de segurança para cada um dos taludes escolhidos, buscando-se chegar ao par que melhor atende às condições impostas por todos os taludes, e que é aquele para o qual todos eles se aproximaram do $FS = 1,0$, valor do qual, também, se aproximou a média geral dos FS individuais de todos os taludes parciais.

O Quadro 3 apresenta alguns dos pares obtidos nos interceptos, cujo exame mostra claramente que o intercepto B é o que melhor satisfaz às condições impostas pelas rupturas totais, sendo portanto, admitida como representativa: a ruptura com fluxo normal descendente e sem fenda de tração, e adotados os valores dela obtidos: $\phi = 25^\circ$ e $c = 85 \text{ g/cm}^2$.

Quadro 3: Cálculo dos coeficientes de segurança para cada talude escolhido nos interceptos

INTERCEPTO	A $c = 54,7 \text{ g/cm}^2$ $\phi = 25^\circ$			B $c = 85,0 \text{ g/cm}^2$ $\phi = 25^\circ$			REGIÃO ANALISADA $c =$ $\phi =$			g/cm^2 $^\circ$		
	X	Y	FS	X	Y	FS	X	Y	FS			
TALUDE 1	16,75	45,6	0,73	16,75	29,4	0,90	11,5	51,4	0,70	11,5	59,6	0,83
TALUDE 2	11,75	57,3	0,78	11,75	36,9	0,94	6,5	64,5	0,85	6,5	74,8	0,82
TALUDE 3	4,75	71,2	0,89	4,75	45,8	0,99	-0,5	80,1	0,94	-0,5	92,9	0,96
TALUDE 4	0,75	88,9	0,95	0,75	57,2	1,00	-4,5	100,1	1,08	-4,5	116,1	1,08
TALUDE 5	-1,25	100,0	0,97	-1,25	64,4	1,07	-6,5	112,6	1,15	-6,5	130,5	1,15
FS médio	0,864			0,980			0,944			0,968		

Fonte: ENGEMIN (2011).

onde:

X = função que define o ângulo de talude;

Y = função que define a altura de talude;

FS = fator de segurança do talude;

ϕ = ângulo de atrito interno do solo;

c = coesão do solo.

Cumprindo a última etapa (8), foram selecionados os parâmetros considerados representativos da ruptura e, utilizando-se ângulos de inclinação usuais em construção de cortes, estabeleceram-se as alturas máximas passíveis de serem construídas e que, trabalhando a seco (isto é, utilizando sistemas de drenagem), mantivessem fatores de segurança de 1,1; 1,2; 1,3; 1,4 e 1,5, respectivamente. A Tabela 1 mostra a determinação das alturas máximas permitidas para cada segmento de talude, a partir da adoção dos parâmetros representativos e das funções estabelecidas para taludes drenados e sem fenda de tração.

Tabela 1: Alturas máximas possíveis de construção de taludes para cada ângulo e fator de segurança determinado

		$X = i - 1,2 \phi$			ÁBACO	$H = Y c / \gamma$		
45 graus (1v:1h)	FS 1,1	X = 45-12 (25)	→	15	Y 18	Hmax (cm) Y (85) / 2	→	765
	FS 1,2	X = 45-12 (25)	→	15	Y 14	Hmax (cm) Y (85) / 2	→	595
	FS 1,3	X = 45-12 (25)	→	15	Y 12	Hmax (cm) Y (85) / 2	→	510
	FS 1,4	X = 45-12 (25)	→	15	Y 10	Hmax (cm) Y (85) / 2	→	425
	FS 1,5	X = 45-12 (25)	→	15	Y 8	Hmax (cm) Y (85) / 2	→	340
34 graus (1v:1,5h)	FS 1,1	X = 34-12 (25)	→	4	Y 35	Hmax (cm) Y (85) / 2	→	1488
	FS 1,2	X = 34-12 (25)	→	4	Y 28	Hmax (cm) Y (85) / 2	→	1190
	FS 1,3	X = 34-12 (25)	→	4	Y 23	Hmax (cm) Y (85) / 2	→	978
	FS 1,4	X = 34-12 (25)	→	4	Y 18	Hmax (cm) Y (85) / 2	→	765
	FS 1,5	X = 34-12 (25)	→	4	Y 15	Hmax (cm) Y (85) / 2	→	638
30 graus (1v:1,75h)	FS 1,1	X = 30-12 (25)	→	0	Y 46	Hmax (cm) Y (85) / 2	→	1955
	FS 1,2	X = 30-12 (25)	→	0	Y 37	Hmax (cm) Y (85) / 2	→	1573
	FS 1,3	X = 30-12 (25)	→	0	Y 30	Hmax (cm) Y (85) / 2	→	1275
	FS 1,4	X = 30-12 (25)	→	0	Y 23	Hmax (cm) Y (85) / 2	→	978
	FS 1,5	X = 30-12 (25)	→	0	Y 20	Hmax (cm) Y (85) / 2	→	850
27 graus (1v:2h)	FS 1,1	X = 27-12 (25)	→	-3	Y 70	Hmax (cm) Y (85) / 2	→	2975
	FS 1,2	X = 27-12 (25)	→	-3	Y 50	Hmax (cm) Y (85) / 2	→	2125
	FS 1,3	X = 27-12 (25)	→	-3	Y 40	Hmax (cm) Y (85) / 2	→	1700
	FS 1,4	X = 27-12 (25)	→	-3	Y 30	Hmax (cm) Y (85) / 2	→	1275
	FS 1,5	X = 27-12 (25)	→	-3	Y 26	Hmax (cm) Y (85) / 2	→	1105
22 graus (1v:2,5h)	FS 1,1	X = 22-12 (25)	→	-8	Y 100	Hmax (cm) Y (85) / 2	→	4250
	FS 1,2	X = 22-12 (25)	→	-8	Y 100	Hmax (cm) Y (85) / 2	→	4250
	FS 1,3	X = 22-12 (25)	→	-8	Y 70	Hmax (cm) Y (85) / 2	→	2975
	FS 1,4	X = 22-12 (25)	→	-8	Y 50	Hmax (cm) Y (85) / 2	→	2125
	FS 1,5	X = 22-12 (25)	→	-8	Y 40	Hmax (cm) Y (85) / 2	→	1700

Fonte: ENGEMIN (2011).

Por outro lado, para atender as determinações da NBR 11682/2009, o projeto impôs um fator de segurança igual à 1,4 para os taludes, uma vez que esse talude ainda que não estivesse localizado em uma região que continha áreas urbanizadas nem

Além disso, por se tratar de um local crítico - a Serra do Mar Paranaense, caracterizada por deslizamentos durante períodos de chuvas intensas e, mais ainda, devido ao grande histórico de instabilidades nas proximidades, a empresa projetista considerou necessário adotar essa segurança de 40 % sobre a condição geral dos taludes que se mantiveram incólumes.

O talude tipo (Figura 8) resultou da combinação conveniente de taludes nominais e banquetas intermediárias, de modo que as alturas de cada segmento, em nenhum ponto ultrapassassem as

edificações nas proximidades (as que existiam foram desapropriadas), a rodovia em questão possui um tráfego intenso devido ao considerável fluxo turístico da região e das cidades de Antonina e Morretes que se ligam por essa rodovia.

alturas máximas calculadas para cada inclinação nominal, mantendo-se um fator de segurança de 1,4.

Assim, o mesmo consta de segmentos com alturas máximas de 7 m e inclinações variáveis: a inferior e intermediária, de 1 v : 1,75 h; e superior, de 1 v : 1,50 h. Entre esses segmentos foram previstas banquetas com largura de 4,00 m, que além de permitirem o tráfego de equipamentos de construção, são necessárias à construção de sarjetas para águas superficiais e de drenos profundos para rebaixamento do lençol freático, além de servirem como anteparos para eventuais instabilidades localizadas.

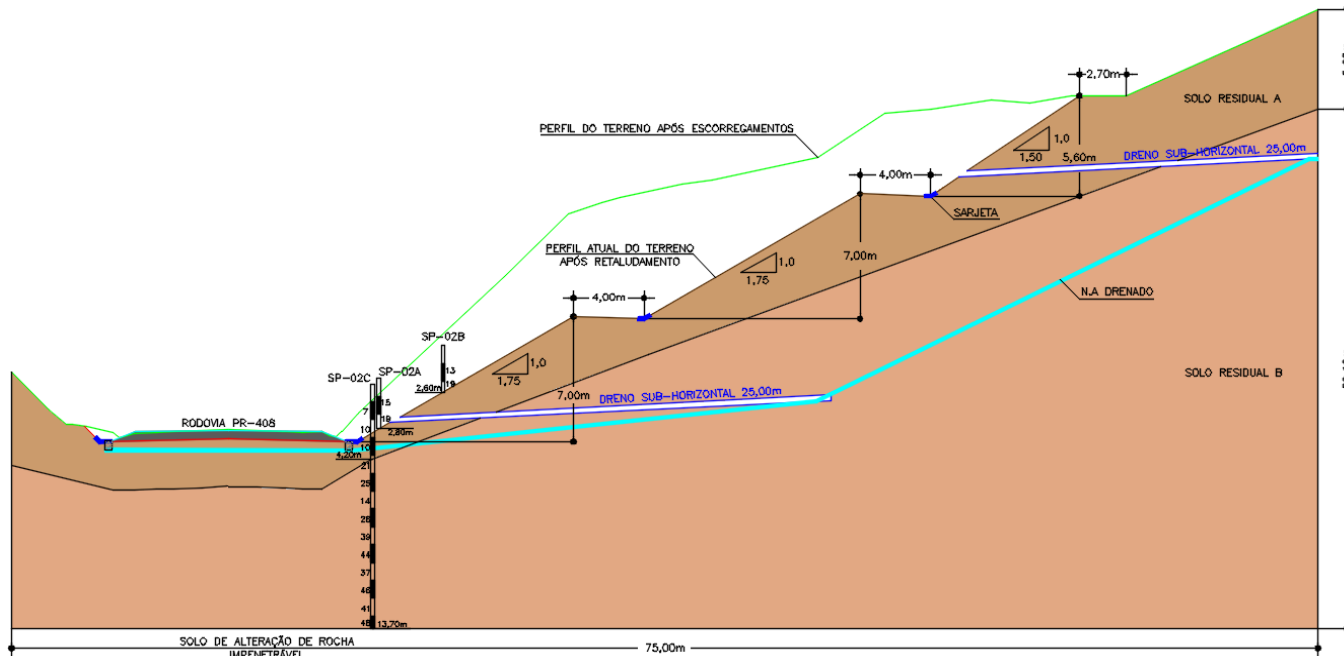


Figura 8: Perfil geotécnico com a solução de retaludamento e drenagem.
Fonte: Adaptado de ENGEMIN (2011).

4.5. Comparação analítica do fator de segurança e dos parâmetros geotécnicos

Foram executadas 36 determinações de FS para o talude constante da Figura 8, variando-se os métodos de análise, a condição do NA e o par de parâmetros adotados em cada caso. O Quadro 4 resume os métodos de obtenção e os pares de valores que foram aplicados nas diferentes análises.

Quadro 4: Resumo dos pares de parâmetros geotécnicos aplicados nas análises de estabilidade

PERFIL	MÉTODO DE OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS								
	ENSAIOS DE LAB./CORRELAÇÃO			RETROANÁLISE MORGENSTERN & PRICE			RETROANÁLISE LOPES		
	c (KPa)	ϕ (graus)	γ_{nat} (KN/m ³)	c (KPa)	ϕ (graus)	γ_{nat} (KN/m ³)	c (KPa)	ϕ (graus)	γ_{nat} (KN/m ³)
Solo Residual A	18,4	30	17,23	9,8	26	17,23	8,5	25	17,23
Solo Residual B	19	34	18,5	10,5	28	18,5	8,5	25	18,5

Fonte: Moscateli (2017).

O Quadro 5 resume os resultados dos fatores de segurança obtidos nas análises determinísticas. Verificou-se, nas análises feitas no Slope/W, que existe uma semelhança evidente entre os métodos clássicos, os quais apresentaram resultados de FS e superfícies de ruptura, muito próximos entre si, com exceção do Método de Fellenius, que registrou valores sensivelmente menores que os demais para as

condições NA no topo e à meia altura do talude. Como o principal objetivo deste trabalho é analisar a eficiência da retroanálise proposta por Lopes [5], por meio do exame dos taludes projetados por esse método, o autor principal achou por efeito prático, analisar a média dos FS obtidos nos métodos clássicos (Quadro 5), em comparação com premissas normativas e também com o FS = 1,1, estipulado pelo próprio Método de Lopes, verificando se tal FS é equivalente àqueles mais tradicionais.

Quadro 5: Resumo dos resultados dos FS obtidos nas análises determinísticas

FS COM O PAR DE PARÂMETROS DETERMINADOS POR ENSAIOS DE LABORATÓRIO			
MÉTODO	N.A TOPO	N.A MEIO	N.A DRENADO
FELLENIUS	1,294	1,828	2,110
BISHOP SIMPLIFICADO	1,306	1,886	2,093
MORGENSTERN & PRICE	1,314	1,891	2,094
SPENCER	1,314	1,889	2,092
FS MÉDIO	1,3	1,9	2,1

FS COM O PAR DE PARÂMETROS DETERMINADOS POR RETROANÁLISE DE M&P (1965)			
MÉTODO	N.A TOPO	N.A MEIO	N.A DRENADO
FELLENIUS	0,893	1,357	1,528
BISHOP SIMPLIFICADO	0,899	1,366	1,525
MORGENSTERN & PRICE	0,909	1,372	1,527
SPENCER	0,909	1,371	1,526
FS MÉDIO	0,9	1,4	1,5

FS COM O PAR DE PARÂMETROS DETERMINADOS POR RETROANÁLISE DE LOPES (1981)			
MÉTODO	N.A TOPO	N.A MEIO	N.A DRENADO
FELLENIUS	0,769	1,178	1,336
BISHOP SIMPLIFICADO	0,774	1,186	1,326
MORGENSTERN & PRICE	0,782	1,192	1,328
SPENCER	0,783	1,192	1,328
FS MÉDIO	0,8	1,2	1,3

Fonte: Moscateli (2017).

Conforme mostra o Quadro 5, o FS = 1,3 obtido utilizando-se os parâmetros estimados pelo Método de Lopes, para o talude drenado, corresponde a um FS =

1,5 utilizando-se os parâmetros obtidos da retroanálise de Morgenstern & Price e 2,1, utilizando-se os parâmetros de laboratório, o que significa que o FS da exigência da NBR 11682/2009 (1,4) está perfeitamente coberto, assegurando, teoricamente, a estabilidade do talude e confirmando novamente o aparente conservadorismo do método em questão.

Analisando a situação intermediária, foi verificado que: com os parâmetros de Lopes, o FS estaria considerando 20 % de segurança, mantendo uma condição de estabilidade. Como já foi descrito anteriormente, por se tratar de um método de estimativas conservadoras, verificou-se nas análises com a aplicação dos parâmetros de laboratório e de Morgenstern e Price, o registro de um FS superior: de 1,9 e 1,4, respectivamente, mostrando que: mesmo em uma situação agressiva, diferentemente da condição normal prevista em projeto, com os sistemas de drenagem mantendo o NA rebaixado, os taludes ainda assim, estariam com um elevado fator de segurança, acima até mesmo do indicado por norma.

Na condição mais crítica considerada para o excesso de pressão neutra agindo nos taludes, a partir da aplicação no modelo de análise, dos parâmetros obtidos por Lopes e Morgenstern e Price, ambos de processo de retroanálise, o valor do FS ficou abaixo da unidade, notando-se que: quanto mais próximo da superfície do talude o nível d'água se encontrar, mais se reduz o FS. Em contrapartida, evidenciando o conservadorismo do método, os parâmetros obtidos por ensaios de laboratório registraram um FS = 1,3 que, apesar de representar uma condição de segurança bastante satisfatória em uma situação extrema de condições impostas ao talude, recai naquela mesma ideia apontada por Lopes, de que nada adiantaria esse FS mantenedor da estabilidade numa condição dessas, se ao entorno as encostas adjacentes já teriam sido desestabilizadas.

5. Conclusões

O método de regressão evidenciado neste trabalho, é bastante válido e aplicável para casos de obras lineares, que compõe uma das dimensões do problema, relativamente maior que as demais, dispondo-se de grande variabilidade geotécnica. A regressão obtém os parâmetros de resistência, a partir de dados reais da encosta (topografia, regime geohidrológico etc.), os quais consideram as condições de contorno em escala natural, presumindo o efeito da heterogeneidade. No entanto, considera-

se imprescindível a execução de investigações geotécnicas e ensaios laboratoriais, bem sucedidos, e em quantidades satisfatórias, calibrando e comparando os modelos de retroanálise com os métodos tradicionais, afinal, a importância da boa estimativa dos parâmetros, é um fator crítico e fundamental nos resultados finais de projetos.

Complementando a ideia do parágrafo anterior, cabe ressaltar, a partir de conclusões já feitas por Lopes [5] em seu artigo, citando e mantendo a linha de raciocínio de Hoek [17] e que os autores desta pesquisa também acompanham, que: o método de estimativa de estabilidade de taludes artificiais, a partir do exame de cicatrizes de escorregamentos naturais "não pretende substituir os métodos de projeto de talude mais sofisticados e mais precisos, os quais deveriam ser aplicados quando a estabilidade de um talude é crítica e quando a exatidão dos dados de entrada justifique a aplicação destes métodos".

O trabalho apresentou o estudo de um só caso, contudo, observou-se que os parâmetros obtidos por retroanálise, utilizando-se o Método de Lopes, foram inferiores àqueles obtidos por ensaios canônicos de laboratório, apresentando resultados relativamente conservadores.

Em relação aos valores obtidos pela retroanálise feita pelo método de Morgenstern e Price, os valores foram bastante próximos e coerentes, sendo, entretanto, os desta última, ainda superiores.

Outro fator relevante analisado, foi a comparação dos resultados em termos de fatores de segurança. Adotando FS nominalmente inferiores aos da Norma, em razão da previsão do conservadorismo dos parâmetros derivados do seu Método, Lopes obteve valor de FS = 1,3, muito próximo dos prescritos por aquela (1,4), quando substituídos os parâmetros obtidos pelo Método das Cicatrizes pelos obtidos pelos métodos tradicionais (que são os considerados pela Norma), considerando-se o mesmo cenário.

Ficou evidenciada, desse modo que, da avaliação de estabilidade, utilizando-se os parâmetros obtidos por ensaios de laboratório e a partir da retroanálise de Morgenstern e Price, resultaram fatores de segurança superiores ao de Lopes e que, uma vez efetuadas as devidas substituições obtiveram-se fatores de segurança que atendem ao preconizado pela NBR 11682/2009, o que pressupõe que o talude estudado deve encontrar-se estável.

Por fim, pôde-se concluir, que a metodologia proposta e comparada nesta pesquisa, apresentou-se promissora na análise de estabilidade de taludes,

sendo aparentemente conservadora e de prática aplicação.

6. Agradecimentos

O primeiro autor deste artigo, Moscateli, agradece honrosamente pelo respeito, a amizade, e ao compartilhamento dos conhecimentos, repassados pelos orientadores do trabalho de dissertação que fundamentou a produção deste artigo, os senhores: José Antônio Urroz Lopes e Vítor Pereira Faro; agradecendo também, a inestimável contribuição de Nelson Henrique Joly no desenvolvimento das análises de estabilidade, e por fim, os autores agradecem a CAPES e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil (PPGECC) da Universidade Federal do Paraná, pelo apoio e viabilização desta pesquisa.

Referências

- [1] FELLENIUS, W., "Calculation of the Stability of Earth Dams.", 2nd International Congress on Large Dams, International Commission on Large Dams, Washington, DC, 445-459, 1936.
- [2] BISHOP, A. W., "The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes", *Geotechnique*, 5(1), 7-17, 1955.
- [3] SPENCER, E. A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces. *Géotechnique*, 17, pp. 11-26, 1967.
- [4] MORGENSTERN, N. R.; PRICE, V. E. *The analysis of the stability of general slip surfaces*. *Geotechnique*, London, v.15, n.1, p.79 – 93, 1965.
- [5] LOPES, J. A. U. Algumas Considerações Sobre a Estabilidade de Taludes em Solos Residuais e Rochas Sedimentares Subhorizontais. In: CBGE (CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA E ENGENHARIA), 3th, 1981, Itapema-SC. Anais do 3^o Congresso Brasileiro de Engenharia e Geologia. Itapema: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, v.3, p. 167-186, 1981.
- [6] CAPPELLESSO, L. Retroanálise do Movimento de Massa do Talude localizado na Rodovia Antônio - Criciúma SC. Artigo Científico do Curso de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2011.
- [7] SESTREM, L. P.; DYMINSKI, A. S; KORMANN, A. C. M.; SANTOS, C. J. A. Retroanálise de estabilidade de talude rodoviário em uma encosta litorânea em Santa Catarina. In: COBRAMSEG 2012 - XVI Congr. Bras. de Mec. dos Solos e Eng. Geotécnica, 2012, Porto de Galinhas. Anais do XVI COBRAMSEG. São Paulo: ABMS, v. 1. p. 1-8, 2012.
- [8] GALEANDRO, A; DOGLIONI, A; SIMEONE. Statistical Analyses of Inherent Variability of Soil Strength and Effects on Engineering Geology Design. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 76 (2): 587-600, 2017.
- [9] CHRISTARAS, B; ARGYRIADIS, M; MORAITI, E. Landslides in the Marly Slope of the Kapsali Area in Kithira Island Greece. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 73 (3): 839-844, 2014.
- [10] QUEIROZ, R.C. Aplicação do Método de Retroanálise no Estudo da Estabilidade de Taludes de Estradas Situadas em Solos Oriundos da Formação Adamantina. M.Sc. tese, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 274 p., 1986.
- [11] LOPES, J. A. U. Os Movimentos Coletivos dos Solos e a Evolução das Encostas Naturais nas Regiões Tropicais e Subtropicais Úmidas. M.Sc. tese, Universidade Federal do Paraná, Curitiba – Paraná, 157 p., 1995.
- [12] FIORI, A. P; CARMIGNAMI, L. Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes. 2.ed. Curitiba: UFPR, 2009.
- [13] MOSCATELI. Taludes estabilizados por retroanálise – Análise crítica e comparação com métodos tradicionais de análise de equilíbrio limite. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.
- [14] LOPES, J. A. U. Encostas Evolução, Equilíbrio e Condições de Ocupação. Porto Alegre: Alcance, 342 p., 2017.
- [15] LOPES, J. A. U. National Symposium on Engineering Geology and Geotechnics ENG'GEO' 2019, 2019.
- [16] ENGEMIN Engenharia e Geologia. Relatório do Projeto: Obra 608 - Ocorrências km 19,8. Pinhais-PR. Relatório técnico, 2011.

[17] HOEK, E. Estimando a Estabilidade de Taludes Escavados em Minas a Céu Aberto. Tradução n. 4, APGA, São Paulo, 58p., 1972.

[18] QUEIROZ, R. C.; GAIOTO, N. Determinação do Fator de Segurança em taludes de cortes ferroviários por retroanálise. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, São Paulo: ABGE, p. 109-119, 1987.

[19] DEERE, D. V.; PATTON, F. D. Slope Stability in Residual Soil. Proceedings 4th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. San Juan, v.1, 87-170, 1970.

[20] SPANGLER, M. G.; HANDY, R. L. Soil Engineering (3rd ed.). New York: Intext International, 748 p., 1973.

[21] TERZAGHI, K; PECK, R. B. Soil Mechanics in Engineering Practice (2nd ed.). New York: John Wiley & Sons, 566 p., 1966.

[22] TAYLOR, D. W. Fundamentals of Soil Mechanics (2nd ed.). New York: John Wiley & Sons, 700 p., 1966.

[23] LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. Soil Mechanics. New York: John Wiley & Sons, 553 p., 1979.

[24] CINTRA, J.; AOKI, N; ALBIERO, J. Fundações diretas: projeto geotécnico. São Paulo: Editora Oficina de textos, 2011.

[25] TONUS, B. P. A. Estabilidade de taludes: avaliação dos métodos de equilíbrio limite aplicados a uma encosta coluvionar e residual da Serra do Mar Paranaense. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

[26] SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. Ensaio de Campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações: 2ª edição. Oficina de Textos, 2012.

[27] DELL'AVANZI, E. e SILVA, D. P. Estabilidade de Encostas - Considerações sobre a acurácia dos modelos de previsão da segurança. In: GeoSul 2013- IX Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul, Criciúma-SC, Brasil, 9p. 2013.