

Retroanálise de um Escorregamento de Talude na Estrada Lourenço Velho na Cidade de Itajubá/MG

Ozrael Teodósio de Melo Junior

Graduado Engenharia Civil, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil, ozael.teodosio@outlook.com

Régis Shiota Ottoni

Graduado Engenharia Civil, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil, regis_sottoni@hotmail.com

Nivea Adriana Dias Pons

Professora Titular, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil, npons@unifei.edu.br

Adinele Gomes Guimarães

Professora Associada, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil, adinele@unifei.edu.br

RESUMO: Taludes estão sujeitos constantemente a movimentos de massas, como escorregamentos, erosões e recalques, os quais, quando próximo de estradas, podem provocar danos e interrupções ao tráfego. Este trabalho teve como objetivo analisar a estabilidade do talude localizado na estrada Lourenço Velho em Itajubá/MG. Inicialmente realizou-se a análise de estabilidade na condição original do talude, a partir de levantamento topográfico feito com drone, inspeção visual e coleta de amostras para os ensaios de densidade e cisalhamento direto. Depois realizou-se a retroanálise para a superfície de ruptura levantada, impondo-se o fator de segurança unitário. Por fim, realizou-se a análise de estabilidade para o talude atual com os parâmetros retroanalizados. Os resultados mostraram que a condição original do talude já se mostrava em situação de instabilidade, fato que culminou na ruptura existente. Os ensaios indicaram, respectivamente, para os solos argiloso e arenoso, coesões de 15,4 kPa e 4,2 kPa e ângulos de atrito de 40,1° e 38,6°. Pela retroanálise, obteve-se redução destes valores. Dessa forma, constatou-se que a encosta após o escorregamento continua não apresentando fatores de segurança mínimos, considerando o nível de segurança desejável contra perdas humanas e danos materiais e ambientais.

PALAVRAS-CHAVE: estabilidade de encostas, fator de segurança, parâmetros de resistência, resistência ao cisalhamento.

ABSTRACT: Slopes are constantly subject to mass movements, such as landslides, erosion and settlement, which, when close to roads, can cause damage and interruptions to traffic. This work aimed to analyze the stability of the slope located on the Lourenço Velho Road in Itajubá/MG. Initially, a stability analysis was carried out in the original condition of the slope, based on a topographic survey carried out with a drone, visual inspection and collection of samples for density and direct shear tests. Then, the retroanalysis was carried out for the rupture surface surveyed, imposing a unitary safety factor. Finally, a stability analysis was carried out for the current slope with the retro-analyzed parameters. The results showed that the original condition of the slope was already unstable, a fact that culminated in the existing failure. The tests indicated, respectively, for clayey and sandy soils, cohesion of 15.4 kPa and 4.2 kPa and friction angles of 40.1° and 38.6°. Through retroanalysis, a reduction in these values was obtained. Therefore, it was found that the slope after the landslide still does not present minimum safety factors, considering the desirable level of safety against human loss and material and environmental damage.

KEYWORDS: slope stability, safety factor, resistance parameters, shear resistance.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Gerscovich (2016, p.11), talude é “a denominação que se dá a qualquer superfície inclinada de um maciço de solo ou rocha”. Os taludes podem ser naturais (também chamados de encostas) ou construídos pela ação humana, resultados de cortes em encostas, de escavações ou de lançamentos de aterros.

Taludes estão sujeitos constantemente a problemas geotécnicos associados a processos de instabilização de massas, como escorregamentos, erosões e recalques. Quando se trata de taludes rodoviários em cortes ou aterros, assim como no caso de encostas naturais adjacentes às rodovias, tais ocorrências colocam em risco os usuários, provocam danos e interrupções ao tráfego e geram graves prejuízos aos usuários e ao Estado. Os problemas de instabilidade de taludes, quando identificados em estágio inicial, podem ser resolvidos com soluções simples, econômicas e que contribuem para a segurança dos usuários em nossas estradas. De fato, é importante evitar que os pequenos problemas de hoje, por não terem sido tratados adequadamente, venham a evoluir, tornando-se problemas que no futuro demandarão soluções custosas que tanto oneram o setor rodoviário do nosso país (CARVALHO, 1991).

Segundo Das (2007), é de suma importância que a fiscalização da segurança dos taludes seja realizada frequentemente pelos engenheiros civis. Essa verificação é feita com a determinação da tensão de cisalhamento desenvolvida ao longo da superfície de ruptura mais provável (superfície que possui fator de segurança mínimo) e sua comparação com a resistência do solo ao cisalhamento. A esse processo é denominado análise de estabilidade de taludes.

A estabilidade dos taludes é regulada por diversas variáveis geológicas, topográficas e climáticas, que definem a força de cisalhamento e a resistência ao cisalhamento do talude. Quaisquer ações dessas variáveis que alterem os valores das forças de cisalhamento ou da resistência do solo levarão à instabilização da encosta e conseqüentemente ao seu deslizamento. Algumas ações que aumentam a tensão de cisalhamento são: remoção do apoio lateral, mudanças rápidas no nível d'água adjacente à encosta, aumento na tensão lateral devido a rachaduras e fissuras preenchidas pela água, encosta sobrecarregada e sismos. Já ações que diminuem a resistência ao cisalhamento do solo são: Intemperismo e degradação físico-química, presença de argilas dilatadas e aumento na poropressão devido à infiltração das águas pluviais na encosta e vazão descontrolada da água dos drenos, que reduz a tensão efetiva (ALMEIDA, ARAUJO e GUERRA, 2005).

Neste contexto verifica-se a importância de se realizar análises de estabilidade de taludes e determinar sua segurança, para garantir a proteção dos usuários e evitar perdas econômicas. O presente trabalho tem como objetivo geral analisar a estabilidade de um talude na estrada Lourenço Velho, na cidade de Itajubá/MG, onde houve um escorregamento de parte do terreno.

Para atingir este objetivo realizar-se-á uma análise de estabilidade na condição original do talude por meio de software e manualmente para efeitos de comparação, após se determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos materiais constituintes deste talude a partir de ensaios laboratoriais. Posteriormente será realizada a retroanálise manualmente e pelo software, para verificação das condições do talude na ocasião da ruptura e comparação com resultados estimados pelos ensaios laboratoriais. Por fim será realizada a análise de estabilidade na condição atual do talude por meio de software com os resultados obtidos na retroanálise.

Com a execução deste trabalho, mostrando os resultados das análises nas condições original e atual, espera-se demonstrar os problemas na concepção do talude e se ainda há o risco de que outras partes do talude sofram novos escorregamentos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Escorregamentos

Para Guidicini & Nieble (1984), escorregamentos são movimentos rápidos e de curta duração, de massas de terreno com volume geralmente bem definidas, cujo centro de gravidade se desloca para baixo e para fora de um talude. Este tipo de movimento de massa apresenta como mecanismo de deformação o aumento das tensões atuantes ou queda da resistência ou uma combinação desses mecanismos, que levam o terreno à ruptura por cisalhamento. Segundo Sawaya (1991), este movimento ocorre por diversos fatores, sendo a água o principal agente deflagrador. Por isso, é possível de se observar esse fenômeno com mais frequência em períodos chuvosos, sendo que uma das condições mais críticas é caracterizada por um período contínuo de alguns dias de chuvas, seguido de uma precipitação mais intensa.

Existem diversos tipos de movimentos de massa e dentre os escorregamentos, os mais vistos no Brasil são os escorregamentos planares (ou transacionais), em cunha e os circulares (ou rotacionais). De acordo com Infanti Jr. & Fornasari Filho (1998), escorregamentos rotacionais possuem superfícies de deslizamento curvas,

sendo comum a ocorrência de uma série de rupturas combinadas sucessivas. Geralmente ocorre em aterros, pacotes de solo ou depósitos mais espessos, rochas sedimentares ou cristalinas intensamente fraturadas.

Tratando-se de escorregamentos em cunha, também de acordo com Infanti Jr. & Fornasari Filho (1998), eles estão associados a saprólitos e maciços rochosos, nos quais a existência de duas estruturas planares, desfavoráveis à estabilidade, condicionam o deslocamento de um prisma ao longo do eixo de intersecção destes planos. São comuns em taludes de corte ou encostas que sofram algum tipo de desconfinamento, natural ou antrópico.

2.2 Análise de Estabilidade

Talude é a denominação de uma superfície de solo ou rocha exposta que forma um ângulo com a superfície horizontal (DAS, 2007). Segundo Cunha (1991), os taludes podem ser classificados em taludes naturais ou artificiais, sendo os naturais encostas originados por agentes naturais, mesmo que tenham sofrido alguma ação antrópica como desmatamento e introdução de carga, enquanto os artificiais, segundo Gerscovich (2016), são declives construídos a partir da ação humana, resultado de cortes em encostas, escavações ou lançamento de aterros.

Como a superfície de um talude não é horizontal, uma componente da gravidade tenderá a movimentar o solo para baixo. Se essa componente da gravidade for grande o suficiente, pode ocorrer a ruptura do talude, onde a força motriz supera a resistência ao cisalhamento do solo ao longo da superfície de ruptura. Dessa forma, a segurança dos taludes deve ser frequentemente verificada pelos engenheiros responsáveis. Essa verificação envolve a determinação da tensão de cisalhamento desenvolvida ao longo da superfície de ruptura e a comparação dela com a resistência do solo ao cisalhamento, para determinar seu fator de segurança. A esse processo é denominado análise de estabilidade de taludes determinística. A superfície de ruptura mais provável é a superfície crítica que possui fator de segurança mínimo (DAS, 2007).

O engenheiro responsável pela análise da estabilidade do talude tem como objetivo determinar seu fator de segurança. Geralmente, o fator de segurança é definido pela Equação 1:

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad (1)$$

Onde FS = fator de segurança em relação à resistência; τ_f = resistência média ao cisalhamento do solo e τ_d = resistência média ao cisalhamento desenvolvida ao longo da superfície potencial de ruptura.

Quando FS é igual a 1, o talude está em um estado de ruptura iminente. Geralmente, um valor de 1,5 para o fator de segurança em relação à resistência é aceitável para o projeto de um talude estável (DAS, 2007). Conforme a NBR 11682 (ABNT, 2009), os fatores de segurança têm a finalidade de cobrir as incertezas naturais das diversas etapas de projeto e construção. Dependendo dos riscos envolvidos, deve-se inicialmente enquadrar o projeto em umas das seguintes classificações de nível de segurança, definidas a partir da possibilidade de perdas de vidas humanas, conforme a Tabela 1, e de danos materiais e ambientais, conforme a Tabela 2.

O enquadramento nos casos previstos nas Tabelas 1 e 2 deve ser justificado pelo engenheiro geotécnico, em comum acordo com o contratante do projeto e atendendo às exigências dos órgãos públicos competentes. O fator de segurança mínimo a ser adotado no projeto, levando-se em conta os níveis de segurança preconizados nas Tabelas 1 e 2, deve ser estipulado de acordo com a Tabela 3.

Quando as análises de estabilidade são realizadas para diferentes seções transversais, pôde-se determinar um fator de segurança para o conjunto (FS_{global}), pela Equação 2 como sugerido por Lambe e Whitman (1969):

$$FS_{global} = \frac{\sum(FS_i \cdot A_i)}{\sum A_i} \quad (2)$$

Onde FS_i é o fator de segurança da seção e A_i é a área da seção.

Tabela 1. Nível de segurança desejado contra a perda de vidas humanas. Fonte: ABNT, 2009.

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

Tabela 2. Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais. Fonte: ABNT, 2009.

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

Tabela 3. Fatores de segurança mínimo para deslizamentos. Fonte: ABNT, 2009.

Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais	Nível de segurança desejado contra a perda de vidas humanas		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

NOTA 1: No caso de grande variabilidade dos resultados dos ensaios geotécnicos, os fatores de segurança da tabela acima devem ser majorados em 10%. Alternativamente, pode ser usado o enfoque semiprobabilístico constante no Anexo D da norma.

NOTA 2: No caso de instabilidades de lascas/blocos rochosos, podem ser utilizados fatores de segurança parciais, incidindo sobre os parâmetros de peso específico, ângulo de atrito e coesão em função das incertezas sobre estes parâmetros. O método de cálculo deve ainda considerar um fator de segurança mínimo de 1,1. Este caso deve ser julgado pelo engenheiro civil geotécnico.

NOTA 3: Esta tabela não se aplica aos casos de rastejo, voçorocas, quedas, ravinas ou rolamento de blocos.

2.3 Retroanálise

A retroanálise, de acordo com a NBR 11682 (ABNT, 2009), é a análise de estabilidade elaborada com o conhecimento da geometria da superfície de ruptura ocorrida e outros fatores que estavam presentes no momento da ruptura, como sobrecargas, posição do nível de água, sismos e outros, visando determinar os parâmetros de resistência e poropressão coerentes com o problema.

De acordo com Gomes (2003), diferentes autores citam que a aplicação das técnicas de retroanálise é um dos meios mais práticos e confiáveis para se obter uma estimativa rápida e a baixo custo dos parâmetros de resistência médios equivalentes de um talude ou encosta. Essa técnica apoia-se basicamente na consideração de que, quando um talude rompe, seu fator de segurança atingiu um valor inferior à unidade. Em uma análise em termos determinísticos, essa consideração permite que se calcule os parâmetros de resistência que levariam ao limite do equilíbrio, ou seja, ao fator de segurança unitário.

Ainda segundo o mesmo autor, ao empregar as técnicas de retroanálise para determinar os parâmetros de resistência médios equivalentes de um talude instabilizado, os quais serão utilizados no seu projeto de estabilização, a escolha de um dos vários pares de parâmetros de resistência, que satisfazem a condição de fator de segurança unitário, é realizada de forma empírica, baseada normalmente na estimativa do ângulo de atrito dos materiais envolvidos, sendo a coesão obtida em decorrência.

3 METODOLOGIA

O talude, que sofreu escorregamento de parte de sua massa, estudada neste trabalho situa-se na estrada Lourenço Velho, dentro da área urbana da cidade de Itajubá/MG, no encontro entre o meridiano $45^{\circ}25'56.71''\text{O}$ e o paralelo $22^{\circ}25'5.07''\text{S}$ e dista, em linha reta, 1890 metros da entrada principal da Universidade Federal de Itajubá e 720 metros da Prefeitura Municipal. Essas informações estão ilustradas na Figura 1, e o escorregamento pode ser visto na Figura 2.



Figura 1. Localização do talude em estudo na cidade de Itajubá.



Figura 2. Visão geral do talude em estudo.

Primeiramente obteve-se os dados topográficos do talude a partir de levantamento feito com drone, para então determinar, com o auxílio dos softwares AutoCAD 2020 e CorelDRAW, o perfil de três seções do talude, uma no eixo do escorregamento e outras duas nos entornos. Em seguida, realizou-se uma inspeção visual para identificar as camadas do talude e coletou-se as amostras de solo indeformadas, em conformidade com a NBR 9604 (ABNT, 1996) para realização dos ensaios laboratoriais de densidade e cisalhamento direto. Foram retiradas três amostras indeformadas de cada tipo de solo, sendo realizados para cada um, três medições para a determinação da massa específica e três ensaios de cisalhamento para determinação dos parâmetros de resistência, aplicando-se cargas normais de 50, 100 e 150 kPa, respectivamente.

Com os parâmetros de coesão e ângulo de atrito dos solos determinados pelo ensaio de cisalhamento direto, analisou-se primeiramente a estabilidade do talude antes da ruptura (aqui denominada condição original) com uso do software GeoStudio 2020 - SLOPE/W (*Student Edition*) pelos métodos de Fellenius e Bishop, adotando-se as mesmas condicionantes. Para estimar a condição original do talude no local do escorregamento foram selecionadas duas seções do talude ao lado da seção rompida, para em seguida interpolar os valores para a seção intermediária.

Depois, realizou-se um procedimento de retroanálise manual, variando-se os parâmetros de resistência para alcançar o fator de segurança mínimo pelo método de Bishop, de forma a simular o momento de ruptura e então identificar os parâmetros do talude instabilizado e compará-los com os parâmetros estimados pelos

ensaios de laboratório. Para isso, variou-se os valores de coesão dos diferentes tipos de solos identificados nas seções a fim de alcançar o fator de segurança unitário, valendo-se da superfície de ruptura real estimada no levantamento topográfico.

Por fim, realizou-se a análise do talude na condição atual também com o emprego do software supracitado, pelo método de Bishop, adotando-se os parâmetros obtidos tanto pelos ensaios de laboratório quanto na retroanálise.

4 RESULTADOS

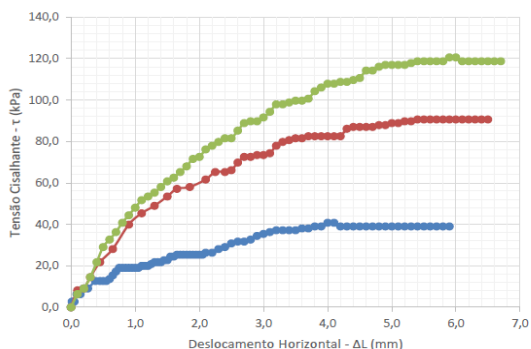
4.1 Ensaios de laboratório

Pela análise tátil visual dos solos coletados no talude, identificou-se que havia dois tipos distintos, um, de cor amarelado/acinzentado, posicionado na parte de baixo do talude. O outro, de cor mais avermelhada, posicionado mais próximo do topo, com aproximadamente cinco metros de espessura. O primeiro tipo de solo apresentava uma sensação áspera ao tato, apresentava pouquíssimos torrões e, quando havia, estes apresentavam pouca resistência e esfarelavam-se facilmente, e em dispersão em água sedimentou rapidamente, o que demonstrou que este se tratava de um solo grosso arenoso. Já o segundo apresentava uma sensação farinhosa ao tato, com uma superfície lisa e lustrosa, com torrões resistentes que não desagregavam quando submersos, e com uma sedimentação lenta em água, características de um solo fino argiloso. Ambos os solos estão apresentados na Figura 3.

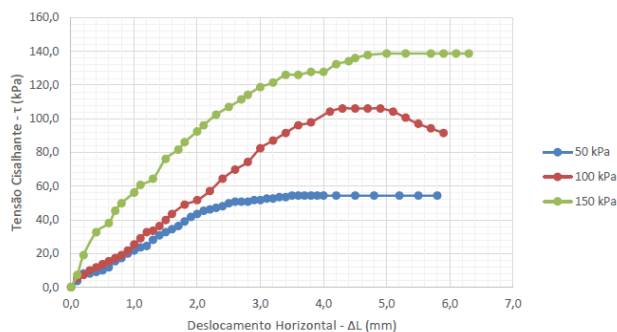


Figura 3. Seções adotadas a partir do levantamento topográfico.

Das amostras indeformadas coletadas de cada tipo de solo, determinou-se os pesos específicos naturais e seus teores de umidade, resultados em $17,17 \text{ kN/m}^3$ e $5,96\%$ para o solo arenoso e $17,84 \text{ kN/m}^3$ e $11,63\%$ para o solo argiloso. As curvas tensão cisalhante *versus* deformação horizontal dos ensaios de cisalhamento direto realizados nas amostras de ambos os solos são apresentadas na Figura 4.



(a) Solo Arenoso



(b) Solo Argiloso

Figura 4. Curvas dos ensaios de cisalhamento direto.

Com as tensões de ruptura encontradas nas curvas dos ensaios de cisalhamento, realizou-se a regressão linear para obtenção das envoltórias de ruptura e determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos, cujos resultados são mostrados na Tabela 4. Pode-se verificar que o valor do ângulo de atrito para o solo arenoso obtido pelos ensaios se encontra dentro da faixa de valores típicos de uma areia densa, porém a coesão não está em conformidade, visto que os valores típicos de coesão para as areias registrados na literatura são iguais a zero. Já para o solo argiloso, o valor de coesão ficou dentro da faixa de valores típicos de um solo residual maduro, enquanto o ângulo de atrito ultrapassou um pouco a faixa de valores geralmente encontrados para esse tipo de solo.

Tabela 4. Parâmetros de resistência obtidos pelos ensaios de cisalhamento direto.

Solo Arenoso		Solo Argiloso	
Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)
4,2	38,6	15,4	40,1

4.2 Análises de estabilidade condição original (antes da ruptura)

Na Figura 5 são mostradas as seções escolhidas para as análises de estabilidade, a partir do levantamento topográfico. As cotas do topo e do pé de cada sessão estão indicadas na imagem e os ângulos de inclinação estimados para as seções 1, 2 e 3 foram, respectivamente, de 43,26°, 45,45° e 44,40°.

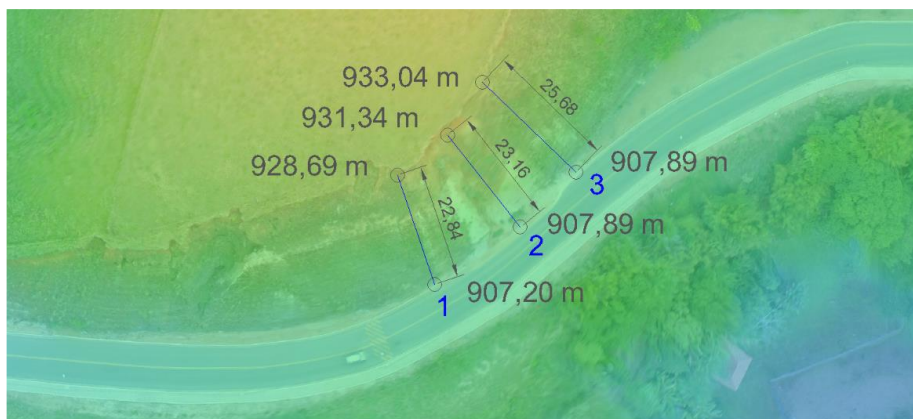


Figura 5. Seções adotadas a partir do levantamento topográfico.

Com os parâmetros de coesão e ângulo de atrito de ambos os solos determinados pelo ensaio de cisalhamento direto (Tabela 4), analisou-se a estabilidade do talude com o apoio do software pelos métodos de Fellenius e Bishop, para cada uma das seções considerando a condição original da encosta (antes da ruptura) e calculou-se, por ponderação das áreas (Equação 2) o fator de segurança do conjunto (FS_{global}). Os valores dos fatores de segurança críticos de cada seção, suas áreas e o fator de segurança global são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Fatores de segurança críticos para o talude na condição original e parâmetros do ensaio.

Seção	Método			
	Fellenius		Bishop	
	Área (m ²)	FS	Área (m ²)	FS
1	96,286	1,132	81,688	1,169
2	102,73	1,050	87,457	1,083
3	123,59	1,062	104,94	1,096
FS_{global}		1,079		1,114

Considerando o valor de fator de segurança mínimo de 1,5, recomendado pela NBR 11682 (ABNT, 2009) para alto nível de segurança contra danos materiais, ambientais e às vidas humanas, é possível observar

que o talude na condição original não se estava em conformidade. Além disso, com o valor muito próximo do unitário, ou seja, quaisquer alterações nos estados de tensão do maciço devido por exemplo a processos erosivos e/ou a acréscimo de poropressões pela elevação da superfície freática nas proximidades da superfície do talude, o levariam a sofrer rupturas.

4.3 Retroanálise

A retroanálise foi realizada variando-se os valores de coesão e ângulo de atrito dos dois solos para alcançar o fator de segurança unitário no método de Bishop, considerando a superfície de ruptura real identificada no levantamento topográfico e nas observações em campo, como mostrado na Figura 6.

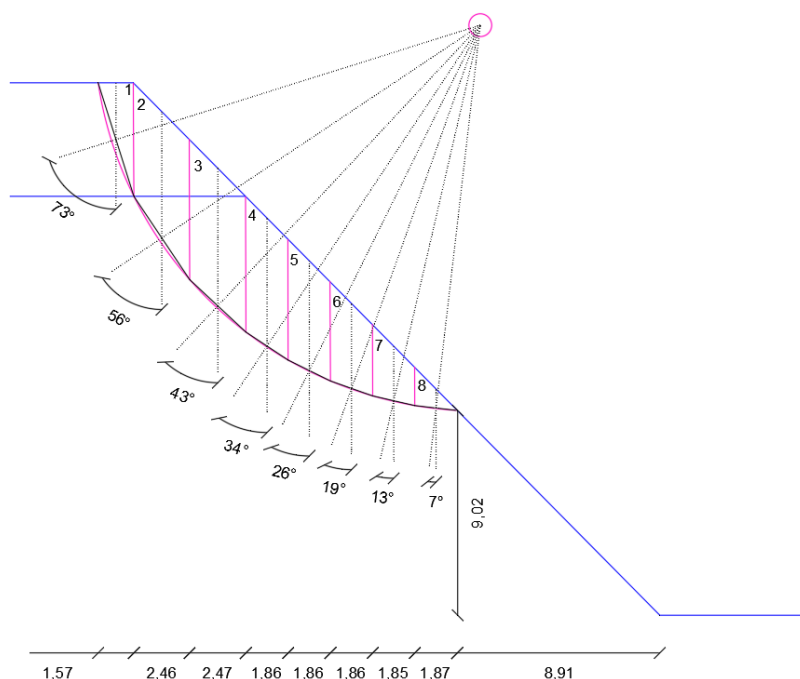


Figura 6. Desenho da seção 2 empregada na retroanálise pelo método de Bishop.

Após algumas interações, chegou-se ao FS unitário reduzindo-se para o solo arenoso a coesão à 0 e o ângulo de atrito à 33 °, e para o solo argiloso a coesão para 14,6 kPa e o ângulo de atrito para 35 °. Como a camada de solo arenoso é bem maior no talude, as alterações em seus parâmetros geram variações mais significativas no fator de segurança, enquanto mudanças nos parâmetros do solo argiloso pouco o alteram.

4.4 Análises de estabilidade condição atual (pós-ruptura)

Utilizando-se os parâmetros obtidos pelos ensaios de cisalhamento e pela retroanálise, foram realizadas as análises de estabilidade somente da seção 2, definida como condição atual e considerada crítica por se tratar da seção rompida.

Adotando-se os parâmetros do solo encontrados no ensaio de laboratório obteve-se um FS crítico de 1,314, como mostra a Figura 7. E na análise com os parâmetros retroanalizado, teve-se um fator de segurança crítico muito próximo do unitário, como mostrado na Figura 8. Já era esperado uma redução no valor do fator de segurança, visto que os parâmetros de resistência da retroanálise são menores do que os do laboratório.

De acordo com o resultado das análises e considerando o valor de fator de segurança mínimo de 1,5 recomendado pela NBR 11682 (ABNT, 2009), confirma-se que a condição atual do talude ainda é imprópria para o nível de segurança mínimo desejável, tendo em vista sua localização em perímetro urbano.

Entretanto, ressalta-se que se o estudo fosse realizado de forma falha, levando em consideração somente com os parâmetros dos ensaios de cisalhamento, baixo nível de segurança contra a perda de vidas humanas e nível médio de segurança contra danos materiais e ambientais, poder-se-ia ratificar a estabilidade do talude.

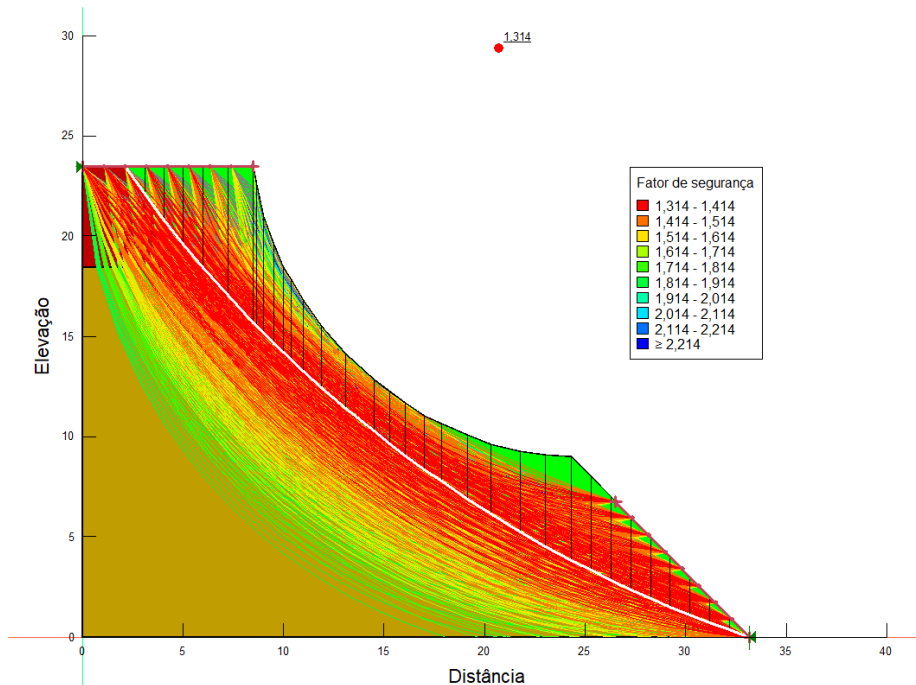


Figura 7. Resultado da análise de estabilidade da seção 2 na condição atual com os parâmetros dos ensaios de cisalhamento pelo método de Bishop.

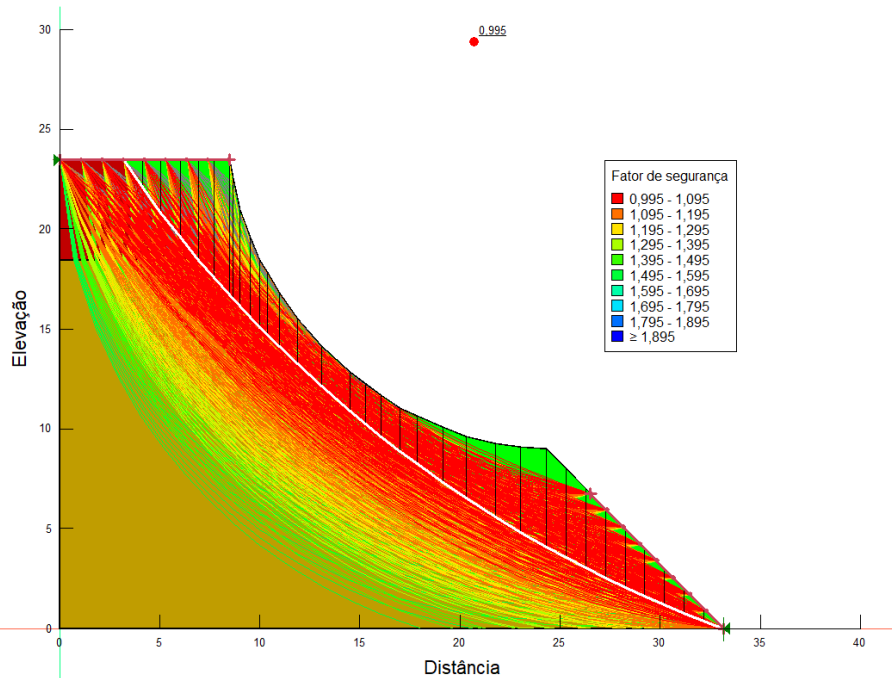


Figura 8. Resultado da análise de estabilidade da seção 2 na condição atual com os parâmetros retroanalizados pelo método de Bishop.

5 CONCLUSÃO

Os valores dos fatores de segurança do talude estudado neste trabalho para sua condição original (antes da ruptura), obtidos nas análises de estabilidade, foram próximos de 1,1. Tendo em vista o risco de vida e econômico elevados, devido ao talude se localizar às margens de uma rodovia e dentro de área urbana, o valor mínimo para esse parâmetro deveria ser de 1,5 de acordo com a NBR 11682 (ABNT, 2009). Desta forma, a condição original do talude já se mostrava instável, fato que culminou na ruptura existente.

Essa condição de instabilidade continua ocorrendo mesmo após a ruptura. A análise de estabilidade da seção crítica, onde ocorreu o escorregamento, na condição atual mostra que o talude continua com valores de fatores de segurança abaixo do mínimo requerido, podendo ser ainda menor caso fossem pesquisados e considerados os parâmetros de poropressão.

A retroanálise permitiu que se determinasse os parâmetros do talude no momento de ruptura, quando o fator de segurança é igual a 1. Enquanto os ensaios de cisalhamento direto forneciam para o solo argiloso uma coesão de 15,4 kPa e ângulo de atrito de 40,1° e para o solo arenoso uma coesão de 4,2 kPa e ângulo de atrito de 38,6°, a retroanálise indicou para o solo argiloso uma coesão de 14,6 kPa e ângulo de atrito de 35° e para o solo arenoso uma coesão de 0 kPa e ângulo de atrito de 33°.

Dado que o aumento da quantidade de água no solo, pelas chuvas ou elevações dos rios, interfere na estabilidade de encostas, aumentando seu peso específico, originando processos erosivos e diminuindo sua resistência, é possível que venha a ocorrer situações que agravem a instabilidade do talude.

Diante da preocupante situação de instabilidade desse talude, é fundamental que sejam tomadas medidas de remediação, como por exemplo o retaludamento da encosta, com mudança de inclinação e/ou altura, até que se atinja o fator de segurança mínimo desejado; a instalação de drenos e canaletas para reduzir os efeitos da água de infiltração e a recuperação da cobertura vegetal que protege principalmente contra a erosão.

Por último, salienta-se a importância de que este estudo valha de base para trabalhos futuros, que busquem por exemplo projetar a remediação do talude, ou também seguir a perspectiva desse trabalho, realizando-se outros métodos de cálculos mais precisos, como Morgenstern-Price, além da realização de uma sondagem do solo em busca de informações sobre o lençol freático, que forneceria mais informações para gerar resultados ainda mais confiáveis e próximos da realidade.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Instituto de Recursos Naturais (IRN) e a Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) pelo apoio ao desenvolvimento do trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682 – *Estabilidade de Encostas*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1986). NBR 9604 – *Abertura de Poço e Trincheira de Inspeção em Solo, com Retirada de Amostras Deformadas e Indeformadas*. Rio de Janeiro.
- Almeida, J. R. de; Araújo, G. H. de S.; Guerra, A. J. T. (2005) *Gestão Ambiental de Áreas Degradadas*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil.
- Carvalho, P. A. S. de (coord). (1991) *Manual de Geotecnia: Taludes de Rodovias: Orientação para Diagnóstico e Soluções de seus Problemas*. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas.
- Cunha, M. A (coord). (1991) *Manual de Ocupação de Encostas*. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1991.
- Das, B. M. (2007) *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*. São Paulo: Thomson Learning, 2007.
- Gomes, C. L. R. (2003). *Retroanálise em estabilidade de taludes em solo: metodologia para obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento*. Campinas, SP: Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Civil.
- Infanti Junior, N. & Fornasari Filho, N. (1998) *Processos de Dinâmica Superficial*. In: Oliveira, A.M.S. & Brito, S.N.A. (Eds.). *Geologia de Engenharia*. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), cap. 9, p.131-152.
- Gerscovich, D. M. S. (2016) *Estabilidade de taludes*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Guidicini, G.; Nieble, C. M. (1984) *Estabilidade de taludes naturais e de escavação*. São Paulo: Edgard Blücher.
- Lambe, T. W.; Whitman, R. V. (1969) *Soil Mechanics*. New York: J. Wile.