

DETERMINAÇÃO DE FATOR DE SEGURANÇA PARA ESTABILIDADE DE TALUDE CONSIDERANDO A VARIAÇÃO DA SATURAÇÃO

FERNANDEZ, Nadiny Fabiana Weinfortner.¹
DE ALMEIDA, Maycon André.²

RESUMO

O aumento da saturação do solo, que ocorre principalmente em períodos chuvosos, afeta diretamente a resistência ao cisalhamento do mesmo, devido à redução do fator de segurança que é ocasionado pelo aumento da poropressão e consequentemente a redução das tensões efetivas no solo. Com o objetivo de analisar a influência da variação do grau de saturação do solo na estabilidade de taludes, foram realizadas simulações numéricas de taludes hipotéticos através do *software* GeoStudio 2018 R2, afim de estudar o comportamento do mesmo, sendo composto pelo solo da região de Cascavel/PR, com as situações de umidade aparente, solo totalmente saturado e solo parcialmente saturado. Os dados e parâmetros de resistência do solo foram obtidos no Campo Experimental do Centro Universitário Assis Gurgacz, por Zen e Almeida (2018) e Almeida e Oliveira (2018), respectivamente. Foram aplicados métodos de análise de equilíbrio limite, sendo utilizados os métodos de Fellenius, Bishop simplificado e Morgenstern-Price para obtenção dos fatores de segurança do solo, sendo considerado o valor mínimo de 1,5 para o estudo. Os valores de fator de segurança mais críticos encontrados foram de 2,079 para o solo com umidade aparente; 0,893 para o solo totalmente saturado e de 1,619 para o solo parcialmente saturado; nas três situações foram encontrados os valores utilizando o método de Fellenius. Com as simulações, foi possível observar que conforme ocorre o aumento da saturação do solo, o mesmo apresenta um aumento no peso específico e diminuição na coesão e ângulo de atrito, essa combinação de fatores gera a instabilidade do solo e pode causar a ruptura do talude.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de Taludes, Resistência ao cisalhamento, Influência de saturação em solos.

¹Acadêmica do 10º Período de Engenharia Civil do Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz. E-mail: weifortner@hotmail.com

²Mestre em Engenharia de Edificações e Saneamento, Prof. Centro Universitário Assis Gurgacz. E-mail: mayconalmeida@creapr.org.br

1. INTRODUÇÃO

Um talude é qualquer superfície inclinada de um maciço de solo ou rocha, sendo ele natural, no caso das encostas ou artificiais, construídos pelo homem, nos casos de corte e aterros. O objetivo de analisar a estabilidade de taludes é avaliar a possibilidade de ocorrência de escorregamentos de massas presente nos mesmos (GERSCOVICH, 2016).

Para Oliveira (2006), a resistência dos solos é resultante da ação conjunta do ângulo de atrito e da coesão. Dessa forma, a determinação desses parâmetros no estudo de estabilidade de taludes é fundamental para a correta caracterização do solo e a interpretação dos resultados das análises de estabilidade.

Segundo Ventura (2009), a água é o principal fator de instabilidade de taludes, atuando de diferentes maneiras. Entre as principais influências da água intersticial (água que ocupa o espaço entre as partículas de solo) são, segundo Bittencourt (2016), o aumento do peso específico do solo pela retenção parcial das águas de infiltração; desenvolvimento de poropressões no terreno, reduzindo as tensões efetivas; eliminação da coesão aparente nos solos não saturados; perda da cimentação entre as partículas de solo; e aplicação de força de percolação na direção do fluxo, arrastando as partículas do solo.

Menezes e Campos (1992) observaram a possibilidade de ocorrência de ruptura de taludes devido à redução da sucção que pode ser associada à variação do grau de saturação do solo. À medida que o teor de água do solo aumenta, a mesma age como lubrificante entre as partículas do solo, diminuindo o atrito entre eles (LAMBE e WHITMAN, 1969). A redução da coesão aparente, da sucção e do ângulo de atrito causados pelo aumento da saturação no solo, segundo Pinto (2006), representa um conjunto de fatores que influenciam consideravelmente na ruptura de taludes.

Com isso, o problema analisado pela pesquisa foi determinar qual é a real influência do aumento de saturação no fator de segurança para estabilidade de taludes constituídos por solo laterítico e colapsível, característico da região de Cascavel/PR.

Levando em conta as informações apresentadas, o objetivo da pesquisa é determinar os fatores de segurança para a estabilidade de um talude hipotético e como isso influencia na resistência ao cisalhamento, através de modelagem numérica no *software* GeoStudio 2018 R2, com diferentes situações de saturação do solo.

Esta pesquisa justificou-se pelo fato de realizar um estudo para determinar o fator de segurança para estabilidade de um talude e com isso analisar a influência da água na resistência ao

cisalhamento do solo, através dos dados e parâmetros de resistência obtidos em ensaios laboratoriais com o solo do CEEF, com condições de saturação diferentes.

O conhecimento geológico é um requisito essencial para a formação de um conceito claro sobre os processos que podem levar ao colapso do talude. É fundamental realizar uma boa caracterização geológico-geotécnica para a elaboração de projetos de contenção ou recomendações de medidas emergenciais, para evitar a ampliação de acidentes associados a escorregamentos (TERZAGHI, 1967).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SOLO

Os solos são resultado do intemperismo das rochas, por desintegração mecânica ou decomposição química. A desintegração mecânica ocorre devido a fatores como água, temperatura, vegetação e vento, formando areias e pedregulhos, siltes e em condições especiais, argilas. Na decomposição química, ocorre modificação química das rochas de origem, sendo a água a principal responsável, provocando oxidação e carbonatação nas rochas, é mais comum ocorrer em climas quentes e úmidos (CAPUTO, 2000).

De acordo com Chiossi (2013), os solos são divididos em dois grandes grupos, os residuais, em que o solo permanece no mesmo local das decomposições, sendo formado por quase todos os tipos de rocha e alterando a composição do solo conforme os minerais da rocha matriz. E os transportados, que por conta de um agente transportador foram transferidos para um local distinto da sua rocha de origem, esses agentes podem ser a água, o vento, geleiras e gravidade (MUROLO, 2004).

Segundo CAPUTO (2000), entre os residuais, alguns tipos de solo se destacam, entre eles estão os solos lateríticos, os solos expansivos e os solos porosos, que apresentam essas denominações devido a sua porosidade ser extremamente elevada. Esses solos são designados também como “solos colapsíveis”, pois em determinadas condições de saturação sua estrutura se rompe, originando elevados recalques em obras que se apoiam sobre eles.

2.1.1 Solo laterítico

O solo laterítico é muito intemperizado, composto por argila com alto teor de poros, apresentando grande resistência no seu estado natural. Ocorrem em climas quentes, úmidos e invernos secos, encontrados em regiões tropicais. São solos não saturados e com elevados índices de vazios, porém, quando compactados possuem uma elevada capacidade de carga, sendo muito utilizados para aterros em pavimentação (PINTO, 2006).

2.1.2 Solo colapsível

O solo colapsível é um solo não saturado que apresenta uma considerável e rápida compressão quando ocorre um aumento de umidade, sem variação de tensão total a que esteja submetido. O colapso é causado pela destruição dos meniscos capilares, responsáveis pela tensão de sucção, ou a um amolecimento do cimento natural que mantém as partículas unidas (PINTO, 2006).

2.2 RESISTÊNCIA DOS SOLOS

Segundo Pinto (2006), resistência ao cisalhamento do solo é definida como a máxima tensão de cisalhamento que o solo é capaz de suportar sem sofrer ruptura ou no plano em que a ruptura estiver ocorrendo. A ruptura por cisalhamento ocorre quando as partículas deslizam umas sobre às outras devido à tensão a que estão submetidas, a resistência ao cisalhamento depende da interação entre as partículas, sendo essa interação dividida entre ângulo de atrito e a coesão (CAVALCANTE, 2006).

2.2.1 Ângulo de atrito

Ângulo de atrito é a força tangencial necessária para que um plano deslize sobre o outro, o valor é obtido através da força normal e resultante das forças tangencial e normal, sem que ocorra deslizamento (PINTO, 2006).

Segundo Caputo (2000), o atrito interno do solo não abrange apenas o atrito físico das partículas, como também o atrito fictício, que é resultante da interação das partículas, sendo que no solo não existe uma superfície nítida de contato e sim, uma infinidade de contatos pontuais.

2.2.2 Coesão

A coesão é a parcela de resistência do solo que existe independente de qualquer tensão aplicada e se mantém, mesmo que não seja necessário em longo prazo, se todas as tensões aplicadas forem removidas. A cimentação entre as partículas por carbonatação, sílica, óxidos de ferro e outras substâncias, podem gerar altos valores de coesão (MACHADO, 1997).

Segundo Pinto (2006), a coesão real é diferente da coesão aparente. A coesão real é uma parcela de resistência ao cisalhamento de solos úmidos, não saturados, devido à tensão entre partículas geradas pela pressão capilar da água. Já a coesão aparente é um fenômeno de atrito, onde a tensão normal é consequência da pressão capilar, sendo que se o solo for saturado, esta resistência desaparece.

2.3 MOVIMENTO DE TALUDES

De acordo com Caputo (2000), a instabilidade de maciços terrosos não apresenta sempre formas bem definidas e caracterizadas, classificadas em três grandes grupos: desprendimento de terra ou rocha, escorregamento e rastejo.

O desprendimento de terra ou rocha ocorre quando uma fração de solo ou fragmento de rocha se desprende do restante do maciço e cai livre e rapidamente. Ocorre de diferentes formas, sendo elas: deslocamento de rocha, queda de blocos de rocha, rolamento de blocos instáveis e tombamento de blocos por descontinuidades.

Nos escorregamentos ocorre um deslocamento rápido de uma massa de solo ou rocha, que se rompe do maciço e desliza para baixo e para os lados por toda a superfície de deslizamento. Se o movimento estiver acompanhado por uma rotação, no caso de solos coesivos homogêneos, denomina-se escorregamento rotacional, se o movimento apresentar um movimento de translação, no caso de maciços rochosos estratificados, este se denomina de escorregamento translacional.

O rastejo é um deslocamento lento e contínuo das camadas superficiais sobre as camadas profundas, com ou sem limite definido entre a massa de terreno que desloca e a que permanece parada.

2.4 INFLUÊNCIA DA ÁGUA NA ESTABILIDADE DE TALUDES

A instabilidade pode ser causada pelo aumento de peso do talude, incluindo as cargas aplicadas e a diminuição da resistência ao cisalhamento. A ocorrência, ao mesmo tempo, desses fatores em estações chuvosas ou pouco depois, causa a maioria dos escorregamentos nesses períodos de grande precipitação pluviométrica (CAPUTO, 2000).

De acordo com a ABGE (1998), a ação do deslocamento da água subsuperficial pode desencadear os escorregamentos segundo: a diminuição da coesão aparente - pois a permeabilidade aumenta com a profundidade, formando linhas de fluxo subverticais, que aumentam o grau de saturação e diminuem os efeitos da coesão aparente, mesmo sem a formação ou elevação do nível d'água, este processo pode causar a ruptura de taludes; a variação do nível piezométrico em massas homogêneas - com a elevação do nível d'água, ocorre o aumento das pressões neutras, reduzindo as tensões normais efetivas e a resistência ao cisalhamento, levando a ruptura do talude; a elevação da coluna d'água em descontinuidade - o nível d'água aumenta com mais intensidade em taludes rochosos pouco fraturados, comparados com os maciços terrosos, devido sua porosidade relativas inferiores. As elevações do nível d'água nas descontinuidades diminuem as tensões normais efetivas e podem gerar esforços laterais cisalhantes, causando nos dois casos, a deflagração de escorregamentos de encostas e taludes.

2.5 ANÁLISES DE ESTABILIDADE DE TALUDES

Na análise de estabilidade de taludes, normalmente são utilizados os métodos de equilíbrio limite, pois é considerado que as forças que tendem a induzir a ruptura são exatamente balanceadas pelos esforços resistentes. A estabilidade de taludes pode ser comparada através de condições diferentes de equilíbrio limite, para isso é definido o fator de segurança como a relação entre a resultante das forças solicitantes e resistentes ao escorregamento (GUIDICINI e NIEBLE, 1983).

Segundo Silva (2011), é importante comparar os fatores de segurança, pois existem vários métodos de equilíbrio. A diferença entre esses métodos são as direções em que são aplicados os equilíbrios, podendo ser vertical, horizontal e normal-tangente à base da fatia, e as hipóteses adotadas em relação às forças entre as fatias. A maioria desses métodos de análise de equilíbrio limite tem em comum a comparação de forças ou momentos.

Para Thomaz (1984), a análise de estabilidade por equilíbrio limite tem grande aceitação devido a três motivos: a simplicidade do método, ao nível satisfatório de exatidão dos seus resultados e a relativa facilidade e baixo custo para se estimar ou obter os parâmetros de resistência do solo com a precisão necessária para o bom funcionamento do método.

O método de Fellenius, também chamado de método Ordinário, método Sueco e método das Fatias, foi o primeiro a ser desenvolvido, considera a superfície de ruptura como sendo circular e divide a massa deslizante em fatias. É o mais simples dos métodos, pois despreza todas as forças de interação entre as fatias, permite o cálculo de fator de segurança à mão, já que não necessita de iterações. O peso em cada fatia é decomposto nas direções normal e tangencial à superfície de ruptura e o fator de segurança é calculado pelo equilíbrio de momentos. É um método conservativo, fornecendo baixos valores do fator de segurança (VILHETE, 2017).

O método de Bishop simplificado foi desenvolvido em 1955 e considera uma superfície de ruptura circular e divide a massa deslizante em fatias. O método considera os esforços de interação, mas ignora os esforços cisalhantes entre as fatias. A solução se dá de forma iterativa, normalmente é feito uma estimativa inicial do valor de segurança, que é utilizado para calcular o novo fator de segurança. O processo é relativamente rápido e ocorre quando o valor do último fator de segurança calculado é aproximadamente igual ao valor anterior de acordo com a tolerância especificada. Em geral, o valor de fator de segurança utilizado como estimativa inicial é o valor obtido pelo método de Fellenius (VILHETE, 2017).

O método de Morgenstern-Price considera os esforços normal e cisalhante entre as fatias. É o método de equilíbrio limite mais completo para uma superfície de ruptura qualquer. As forças de interação são controladas por uma função $f(x)$ multiplicada por um fator λ , que deve ser especificado previamente. Essa função determina a inclinação das forças entre fatias. O fator de segurança é obtido através do equilíbrio de forças e de momentos. O método é solucionado iterativamente adotando valores para o fator de segurança e λ . O processo é repetido até que as condições nos contornos sejam satisfeitas (NOGUEIRA, 2016).

2.6 FATOR DE SEGURANÇA

Segundo Maragon (2009), o fator de segurança é o valor da relação entre a resistência ao cisalhamento disponível do solo para garantir o equilíbrio do corpo deslizante e a tensão de cisalhamento mobilizada. Outros processos o definem como a razão entre os momentos devido às

forças que atuando sobre as cunhas, tendem a mantê-las em equilíbrio e os momentos das forças que tendem a instabilizá-las. Esses momentos são tomados em relação a um ponto situado fora do talude.

O autor ainda aponta que o fator de segurança pode variar com o tempo, como pode ser verificado na prática, pois um talude pode passar anos sem se deslizar e em um determinado momento ou situação ter suas condições de estabilidade alteradas. O conceito teria um significado mais amplo e adequado se fosse definido em termos probabilísticos, pois teria condições de prever períodos de recorrência e um intervalo de confiança para o cálculo.

Conforme a ABNT NBR 11682 (2009), os fatores de segurança são determinados levando em consideração os níveis de segurança contra perdas de vidas humanas e danos materiais e ambientais, a Tabela 01 apresenta os valores mínimos para deslizamentos.

Tabela 01 - Fatores de segurança mínimos para deslizamentos.

Nível de segurança contra danos materiais e ambientais	Nível de segurança contra danos a vida humana		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

Fonte: ABNT NBR 11682 (2009).

2.7 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO DE CASCAVEL/PR

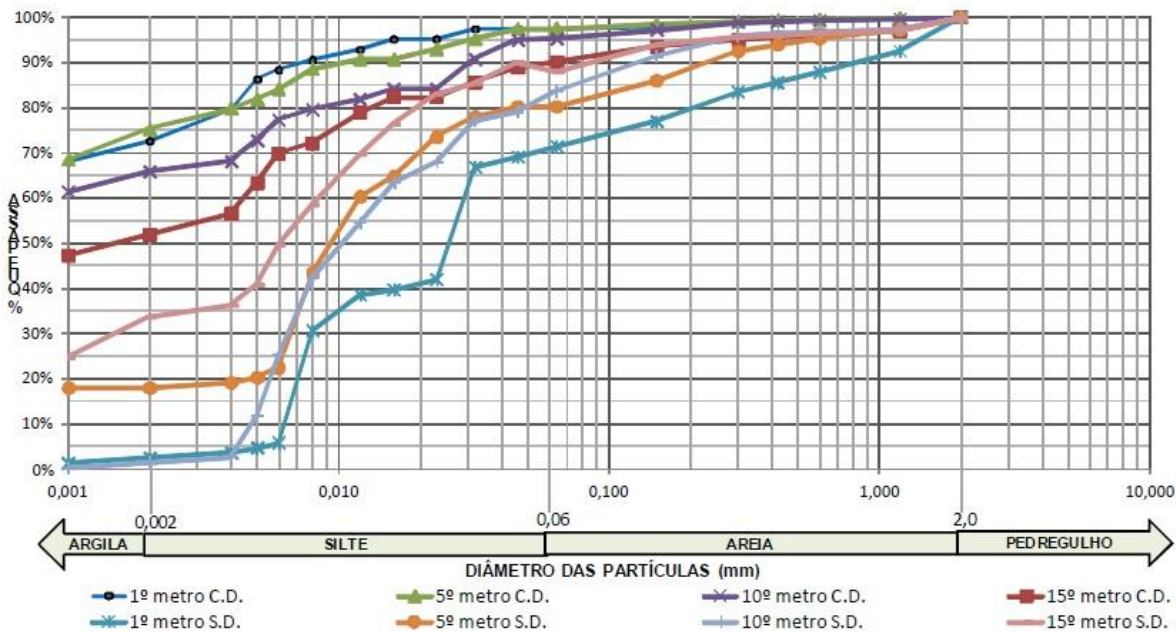
A cidade de Cascavel está localizada na região oeste do estado do Paraná e tem uma população de aproximadamente 325 mil habitantes. A economia é predominantemente agrícola, tendo também grande potencial de comércio e estrutura industrial. A região é constituída por solo laterítico, muito poroso e permeável, sendo o principal solo encontrado no estado. Apresenta alta estabilidade, baixo risco de erosão e grande capacidade para pavimentação, além de ser favorável para aterros sanitários.

Cascavel possui um solo característico de regiões tropicais, tendo um perfil argiloso residual, latossolo roxo, terra roxa estruturada, com propriedades lateríticas e colapsíveis, tendo uma grande porosidade e devido a sua baixa resistência, suscetível a adensar e gerar recalques em suas edificações (CARDOSO et al, 2003).

Zen e Almeida (2018) realizaram ensaios de caracterização com o solo do Campo Experimental do Centro Universitário Assis Gurgacz (CEEF), com a finalidade de classificar o solo

de Cascavel. Segundo os autores, o solo é composto, ao longo da profundidade, de argila silto arenosa, sendo 64,63% de argila, 29,01% de silte e 6,36% de areia, conforme é possível observar na Figura 01. Os ensaios para a obtenção dos dados foram realizados de acordo com a norma da ABNT NBR 7181 (2016).

Figura 01 - Curvas granulométricas determinadas para solo do CEEF.



Fonte: Zen e Almeida (2018).

O solo de Cascavel também pode ser classificado como residual, devido a sua variação de resistência ao longo da profundidade. Através dos ensaios realizados para a caracterização, pode-se afirmar que o mesmo é laterítico, comprovando que há coesão entre as partículas (ZEN e ALMEIDA, 2018).

Através da realização de ensaios de sondagem SPT em campo e coleta de amostras deformadas de solo para ensaios laboratoriais de caracterização realizados por Zen e Almeida (2018), pode-se sugerir que no geral o subsolo do CEEF é constituído por duas camadas de solo distintas, até a profundidade amostrada. A primeira camada é formada por argila siltosa, porosa, marrom avermelhada, de consistência muito mole à média, com uma profundidade de aproximadamente 9 metros. A segunda camada é composta por argila silto arenosa, residual, de coloração marrom claro e consistência rija a dura, a profundidade amostrada foi entre 9 a 15 metros.

Após os ensaios laboratoriais realizados por Zen e Almeida (2018), foram determinados os índices físicos para o solo de CEEF, de acordo com a Tabela 02. Com a realização da sondagem SPT, foi encontrado o nível d'água a uma profundidade de 12 metros.

Tabela 02 - Resumo das camadas de solo do CEEF.

VALORES MÉDIOS	CAMADA 1 1 a 9 metros	CAMADA 2 10 a 15 metros
w (%)	34	53
LL (%)	53	59
LP (%)	38	42
IP (%)	15	17
γ_d (kN/m ³)	12	12
γ_s (kN/m ³)	27	27
γ_{sat} (kN/m ³)	17	16
Sr (%)	55	60
Argila (%)	70	56
Silte (%)	25	35
Areia (%)	5	9
Consistência	Muito mole à média	Rija a dura
Índice de vazios (e)	1,22	1,55

Fonte: Zen e Almeida (2018).

Para determinar os parâmetros de resistência do solo, Almeida e Oliveira (2018) realizaram ensaios de compressão triaxial com amostras indeformadas, que foram extraídas a cada metro até a profundidade de 14 metros. Por meio deste ensaio foi possível encontrar as envoltórias de resistência e com elas definir os valores do intercepto de coesão (c) e do ângulo de atrito (ϕ) das amostras ensaiadas para cada cota analisada, conforme Tabela 03. É possível observar um comportamento linear, com aumento dos valores ao longo da profundidade.

Tabela 03 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento, ao longo da profundidade, para o subsolo do CEEF.

COTA	TENSÕES TOTAIS		TENSÕES EFETIVAS	
	Intercepto coesivo	Ângulo de atrito	Intercepto coesivo	Ângulo de atrito
1 m	2 kPa	14,2°	7 kPa	25,38°
2 m	2 kPa	15,5°	8 kPa	22,34°
3 m	13 kPa	17,4°	32 kPa	19,94°
4 m	12 kPa	16,4°	59 kPa	24°
5 m	22 kPa	14,1°	43 kPa	15,34°
6 m	56 kPa	13,4°	62 kPa	10,37°
7 m	17 kPa	19,2°	33 kPa	12,82°
8 m	12 kPa	26,6°	47 kPa	17,26°
9 m	31 kPa	26,2°	12 kPa	24,77°
10 m	49 kPa	24,8°	56 kPa	17,82°
11 m	24 kPa	30,4°	48 kPa	22,89°
12 m	27 kPa	22,5°	12 kPa	20,74°
13 m	64 kPa	19,7°	94 kPa	11,6°
14 m	32 kPa	26,4°	31 kPa	23,24°

Fonte: Almeida e Oliveira (2018).

3. METODOLOGIA

3.1.1 Tipo de estudo e local da pesquisa

Trata-se de uma determinação de fatores de segurança para a estabilidade de taludes em diferentes situações de saturação do solo. O estudo foi elaborado a partir de revisões bibliográficas e com a utilização dos dados de caracterização do solo de Cascavel/PR por Zen e Almeida (2018) e parâmetros de resistência ao cisalhamento, obtidos por Almeida e Oliveira (2018), aplicando-os no *software* Geoslope 2018 R2 para avaliar o potencial de ruptura do talude com a variação da saturação.

De acordo com Günther (2006), a pesquisa realizada foi através do método qualitativo, sendo fundamentada em revisões bibliográficas com o objetivo de explicar os dados coletados, e também com o método quantitativo, onde o comportamento do solo analisado foi compreendido por meio de dados numéricos.

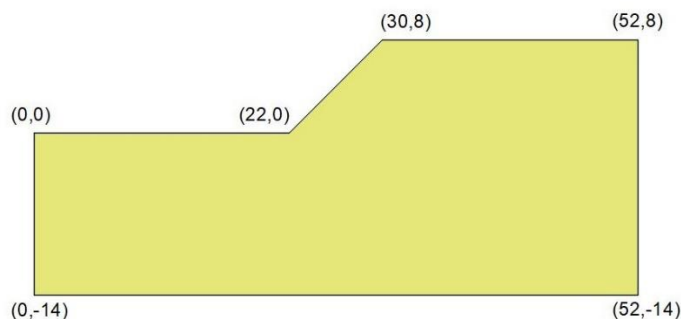
A cidade de Cascavel está localizada na região oeste do estado do Paraná e tem uma população de aproximadamente 325 mil habitantes. A economia é predominantemente agrícola, tendo também grande potencial de comércio e estrutura industrial. A região é constituída por solo laterítico, muito poroso e permeável, sendo o principal solo encontrado no estado. Apresenta alta

estabilidade, baixo risco de erosão e grande capacidade para pavimentação, além de ser favorável para aterros sanitários.

3.1.3 Modelagem numérica

Para realizar as simulações, foi considerado um talude hipotético para analisar a estabilidade de acordo com o fator de segurança obtido e o potencial de ruptura do solo quando ocorre o aumento da saturação natural, conforme a ABNT NBR 11682 (2009), o fator de segurança deve ser de no mínimo 1,5 para que o talude seja considerado estável. De acordo com Maragon (2009), os escorregamentos devido à inclinação ocorrem sempre que a inclinação do talude excede aquela imposta pela resistência ao cisalhamento do maciço e nas condições de presença de água. A prática tem indicado para taludes de corte de até 8 metros de altura, constituídos por solo, a inclinação de 45°, com a proporção de 1m na vertical para 1m na horizontal, como a mais generalizada, conforme a Figura 02.

Figura 02 - Geometria do talude (dimensões em metros).



Fonte: Autor (2019).

As simulações levaram em conta os dados do solo do CEEF, que foram obtidos através de ensaios laboratoriais feitos por Zen e Almeida (2018) e Almeida e Oliveira (2018), considerando as diferentes condições de saturação, sendo elas: solo com umidade aparente, solo totalmente saturado e solo parcialmente saturado.

Os dados utilizados para as análises dos fatores de segurança foram as médias dos primeiros 5 metros dos ensaios já citados, considerando para a cada situação de umidade a média das tensões efetivas e do peso específico natural, conforme consta na Tabelas 04. A situação de solo com umidade parcialmente saturado será analisada com os mesmos dados.

Tabela 04 - Parâmetros de solo

Umidade do Solo	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)	Peso Específico (kN/m ³)
Umidade Aparente	28,60	21,40	16,20
Totalmente Saturado	10,20	15,50	18,30

Fonte: Autor (2019).

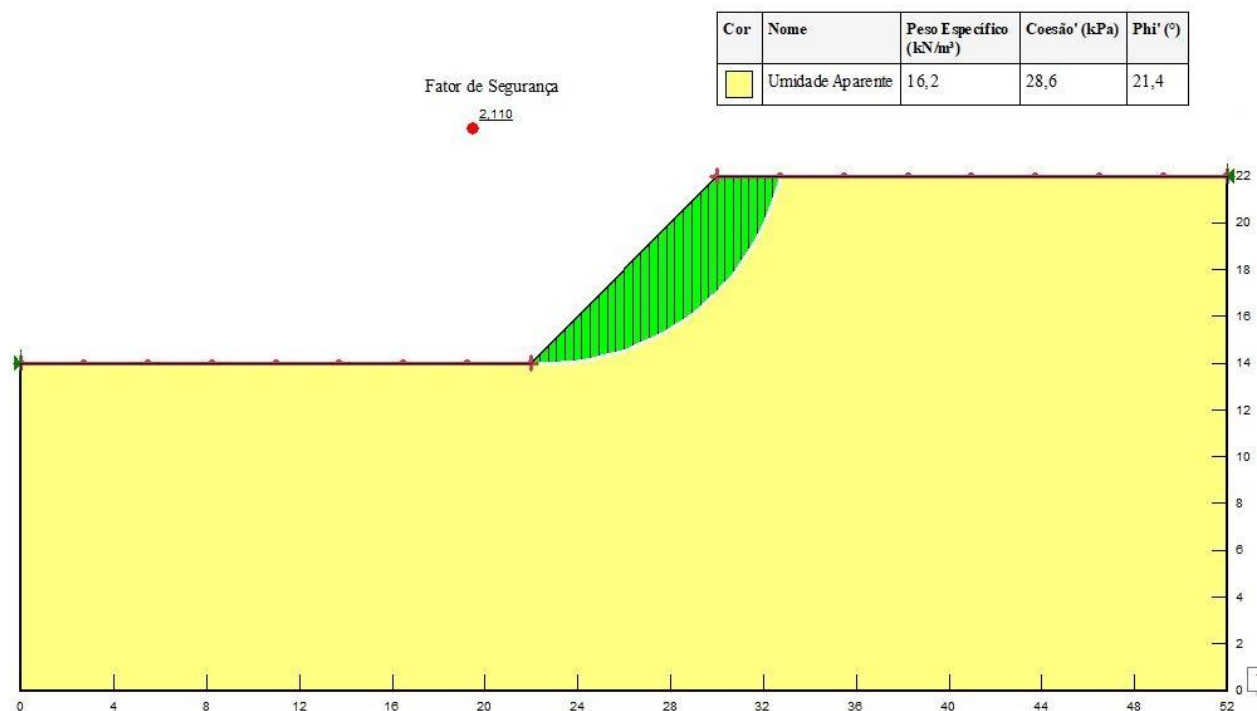
4. ANÁLISES E DISCUSSÕES

4.1 DETERMINAÇÃO DOS FATORES DE SEGURANÇA

Através da caracterização do solo, determinado por Zen e Almeida (2018) e os parâmetros de resistência por Almeida e Oliveira (2018), foram feitas as simulações no *software* e para cada situação de umidade do solo foi encontrada a situação mais crítica de estabilidade.

Os fatores de segurança encontrados para a condição de solo com umidade aparente apresentaram valores superiores a 2. Para os métodos de Bishop Simplificado e de Morgenstern-Price o fator de segurança foi de 2,11, como apresenta a Figura 03 e para Fellenius foi de 2,079, estando todos os valores acima do mínimo de 1,5 exigido pela NBR 11682 (2009).

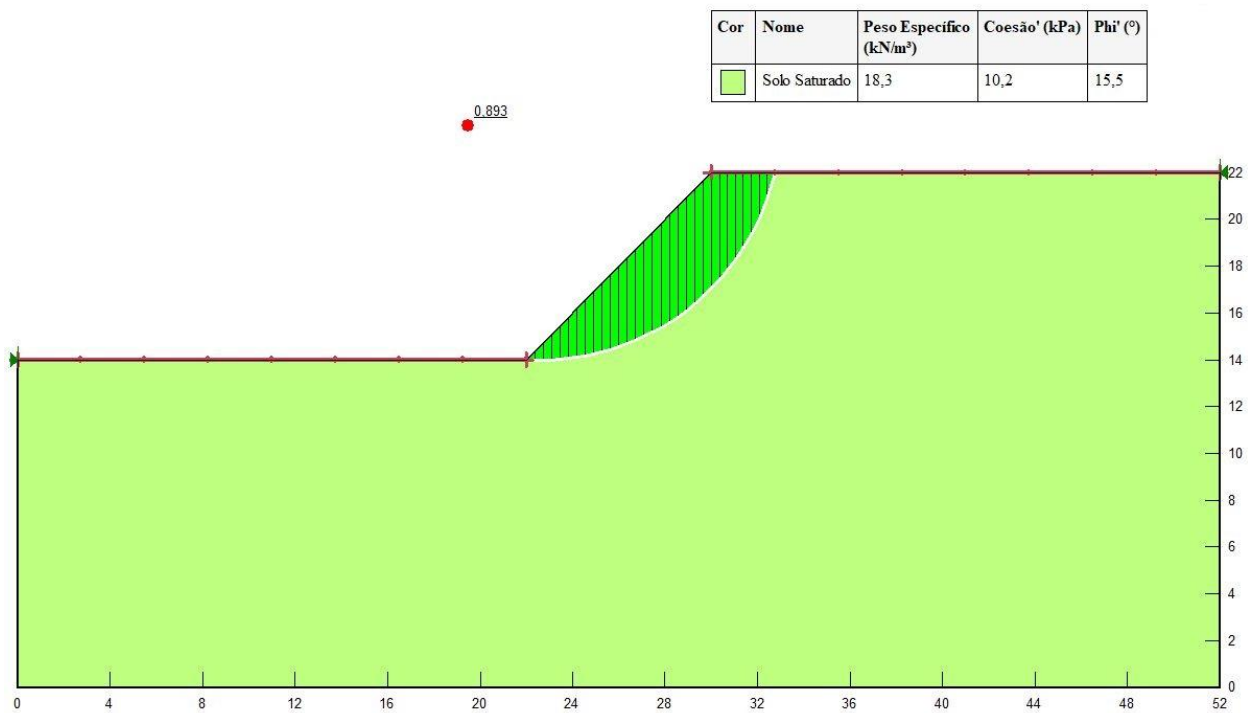
Figura 03 - Fator de segurança obtido pelo método de Morgenstern-Price.



Fonte: Autor (2019).

Já na situação de solo totalmente saturado, sendo também a situação mais extrema, os fatores de segurança encontrados foram menores que 1, sendo valores inferiores ao mínimo exigido pela norma. O método de Bishop simplificado apresentou o fator de segurança mais alto, com o valor de 0,929, com o método de Morgenstern-Price o valor foi de 0,927 e para o método de Fellenius obteve-se o menor fator de segurança das simulações, com o valor de 0,893, como mostra a Figura 04.

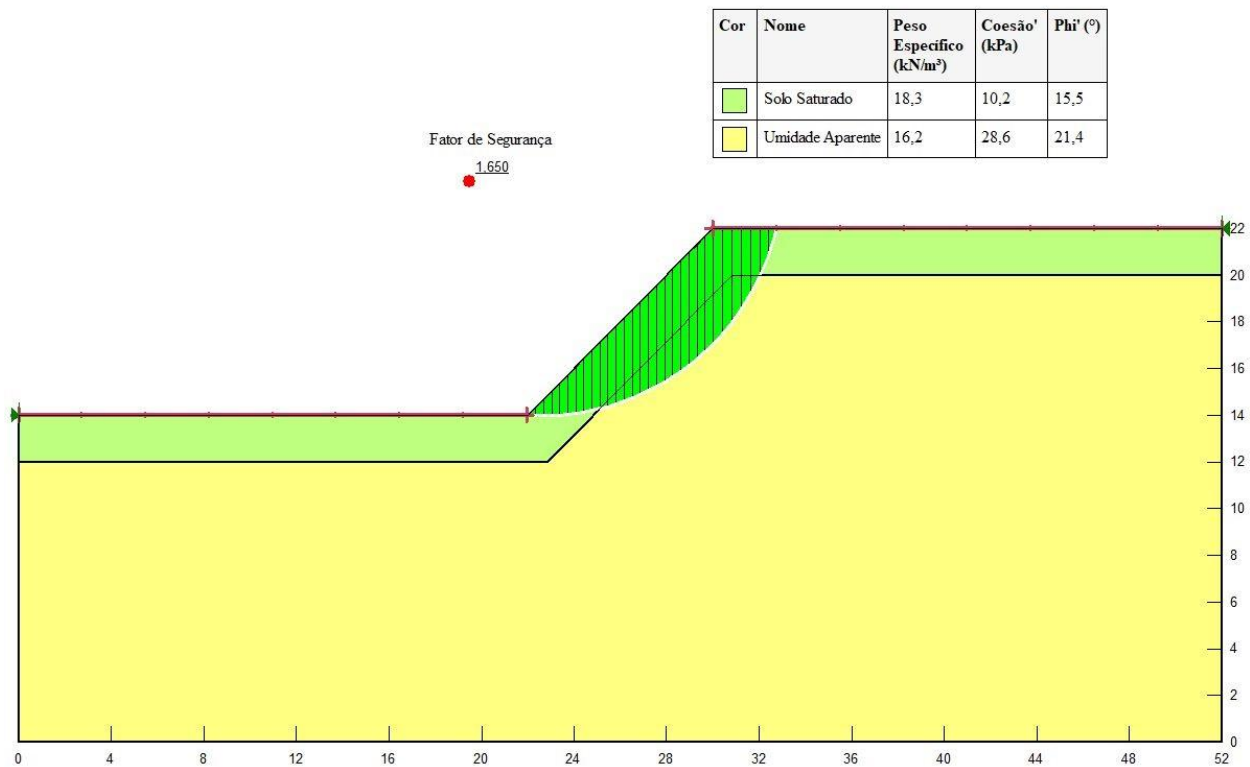
Figura 04 - Fator de segurança obtido pelo método de Fellenius.



Fonte: Autor (2019).

Para analisar o solo com umidade parcialmente saturado, foi levada em consideração uma frente de saturação causada por dias chuvosos, onde ocorre o aumento do peso específico nos primeiros metros de profundidade do solo, causando sobrecarga e podendo gerar maior instabilidade no talude. Para a simulação desta situação foi considerada uma camada superficial de solo saturado de 2 metros de profundidade e o restante do solo com umidade aparente. Os fatores de segurança encontrados foram de 1,65 para os métodos de Bishop simplificado e de Morgenstern-Price, conforme a Figura 05, e para o método de Fellenius o valor foi de 1,619.

Figura 05 - Fator de segurança obtido pelo método de Bishop simplificado.



Fonte: Autor (2019).

Pode-se observar que os fatores de segurança encontrados foram em média 2,1 para a situação de solo com umidade aparente, de 0,916 para o solo totalmente saturado e de 1,64 para o solo parcialmente saturado. O solo totalmente saturado apresentou valores de segurança abaixo de valor mínimo de 1,5 exigido por norma, sendo o caso mais crítico entre os simulados. Os valores para cada método encontram-se na Tabela 08.

Tabela 08 – Valor dos fatores de segurança encontrados.

Método	Bishop Simplificado	Fellenius	Morgenstern-Price
Umidade Aparente	2,11	2,079	2,11
Saturado	0,929	0,893	0,927
Parcialmente Saturado	1,65	1,619	1,65

Fonte: Autor (2019).

As reduções dos fatores de segurança foram de 56% quando o solo se encontra na condição totalmente saturado e de 22% para o solo parcialmente saturado, mostrando que com o aumento da saturação ocorre uma diminuição do fator de segurança do solo, devido ao aumento do peso específico do solo e redução dos parâmetros de resistência, gerando a instabilidade do talude.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo analisou a influência do aumento de saturação no fator de segurança para a estabilidade de taludes compostos pelo solo da região de Cascavel/PR, através dos dados de caracterização obtidos por Zen e Almeida (2018) e dos parâmetros de resistência do solo obtidos por Almeida e Oliveira (2018). Para obter os valores do fator de segurança foram realizadas simulações no *software* GeoStudio 2018 R2, usando análises de equilíbrio limite através dos métodos de Bishop simplificado, de Morgenstern-Price e de Fellenius.

Com as simulações para as situações de solo com umidade aparente, solo totalmente saturado e solo parcialmente saturado, foi possível observar que o solo perde gradativamente sua estabilidade conforme vai absorvendo água. Em seu estado natural, o mesmo apresentou fatores de segurança superiores a 2, o que garante a estabilidade do talude. Já com o solo totalmente saturado, o mesmo apresentou fatores de segurança inferiores a 1, sendo 1,5 o valor mínimo exigido pela ABNT NBR 11682 (2009), deixando o talude em uma condição insegura, na qual é preciso prever sistemas de contenções.

Com o estudo, pode-se concluir que o solo não apresenta riscos de ruptura em seu estado natural, porém com o aumento na saturação que ocorre principalmente em épocas de chuvas, o mesmo tem seu fator de segurança reduzido, o que pode causar condições instáveis para taludes. Isso ocorre devido ao aumento do peso específico do solo causado pela retenção das águas, desenvolvendo a poropressão e a redução das tensões efetivas, fazendo com que diminua a coesão entre as partículas de solo e assim, a percolação da água na direção do fluxo tende a arrastar as mesmas. Sempre é necessário prever situações extremas de saturação para as análises de dimensionamento de projetos de contenção, sendo que o solo reduz mais da metade seu fator de segurança, nesses casos, e essas condições podem gerar riscos para as áreas próximas a taludes.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. A.; OLIVEIRA, R. M. M.; **Estimativa do Ângulo de Atrito e Coesão Através de Índices de Resistência Obtidos pela Sondagem SPT em Solo Laterítico e Colapsível Característico da Cidade de Cascavel no Estado do Paraná.** Artigo XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Salvador, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. **Geologia de Engenharia.** Editores Antonio Manoel dos Santos Oliveira, Sérgio Nertan Alves Brito. São Paulo, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682. Estabilidade de Encostas.** Rio de Janeiro, 2009.
- _____. **NBR 7181: Análise granulométrica - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 1984.
- BITTENCOURT, D. M. A. **Estabilidade de Taludes - Geotecnia II.** Goiás, 2016.
- CAPUTO, P. H. **Mecânica dos solos e suas aplicações: Fundamentos.** 6.ed. Rio de Janeiro, 2000.
- CARDOSO, D. L.; MEDEIROS, J. A. **Propriedades geotécnicas da região de Cascavel-PR.** In: Anais do I ENGEOPAR – Encontro Geotécnico do Terceiro Planalto Paranaense. Maringá, 2003.
- CAVALCANTE, E. H. **Mecânica dos solos II.** Aracaju, 2006.
- CHIOSSI, N. J. **Geologia de Engenharia.** São Paulo, 2013.
- GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de Taludes.** 2. ed. 1ª reimpressão. São Paulo, 2016.
- GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação.** 2ª ed. São Paulo, 1983.
- GÜNTHER, H. **Pesquisa Qualitativa Versus Pesquisa Quantitativa: Esta É a Questão?** Brasília, 2006.
- KRAHN, J. **Stability Modeling with SLOPE/W. An Engineering Methodology.** Geo Slope International Ltd. Canadá, 2003.
- LAMBE, T. W.; WHITMAN, R.V. **Soil Mechanics, SI version.** Singapura, 1969.
- MACHADO, S. L.; MACHADO, M. F. C. **Mecânica dos solos II: conceitos introdutórios.** Salvador, 1997.
- MARANGON, M. **Resistência ao Cisalhamento dos Solos.** Juiz de Fora, 2009.
- MELLO, T. T. S. **Mecânica dos Solos I.** Campo Grande, 2018.
- MENEZES, M. S. S.; CAMPOS, L. E. P., **Estabilização de taludes em solos residuais tropicais.** Iin: 1º COBRAE. Rio de Janeiro, 1992.

MUROLO, M. L. **Análise comparativa de um perfil geotécnico de sondagem de simples reconhecimento com as classificações obtidas em ensaios de limites de Atterberg e granulometria de um solo de Itatiba - SP.** Monografia de conclusão do curso de Engenharia Civil – Universidade São Francisco. Itatiba, 2004.

NOGUEIRA, R. T. **Simulação numérica e equilíbrio limite aplicado a retroanálise de taludes em mineração de carvão.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016.

OLIVEIRA, V. S. **Análise de estabilidade bi e tridimensional de taludes estabilizados em solo grampeado.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos.** 3.ed. São Paulo, 2006.

SILVA, J. P. M. **Os métodos de equilíbrio limite e dos elementos finitos na análise de estabilidade de talude.** Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia e Universidade do Porto. Porto, 2011.

TERZAGHI, K. **Mecanismos de escorregamentos de terra.** Trad. de Ernesto Pichler. São Paulo, 1967.

THOMAZ, J. E. S. **Rotina de Geração Randômica de Superfícies Críticas na Análise da Estabilidade de Taludes.** Rio de Janeiro, 1984.

VENTURA, L. C. **Análise da influência de barreiras hidráulicas no padrão do fluxo e na estabilidade de taludes de cavas a céu aberto de minas de ferro do quadrilátero ferrífero.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2009.

VILHETE, D. F. **Retroanálise da ruptura do talude de montante da barragem do Açú no final do período construtivo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2017.

ZEN, B. A. B.; ALMEIDA, M. A. **Implantação e Caracterização Geotécnica do Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz em Cascavel/Pr.** Artigo XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Salvador, 2018.