

Influência do Perfil de Sucção no Dimensionamento de Solo Grampeado em Solo Não Saturado

Emilly Dias da Silva

Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, dias.emilly@gmail.com

Carlos Alberto Lauro Vargas

Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, carloslauro@hotmail.com

Gilson F.N. Gitirana Jr.

Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, gilsongitirana@gmail.com

RESUMO: A utilização da técnica de solo grampeado pode ser uma importante alternativa para a estabilização de um talude ou de uma escavação. Os grampos ou tirantes passivos são elementos de contenção ou de reforço de massas de solo que agem passivamente, requerendo deformações para mobilizar sua resistência. A análise do comportamento mecânico de tais estruturas pode ser feito através de métodos de equilíbrio limite, onde o grampo pode ser representado por cargas de reforço aplicadas a camadas ou fatias sub-horizontais de um talude. A fatia tem a sua base atravessada por uma linha de ação de reforço e a carga de reforço é tratada como uma carga pontual concentrada agindo no ponto de intersecção da base de uma fatia com a linha de ação. Assim, através de cálculos por ferramentas analíticas e numéricas, o presente trabalho estuda o dimensionamento da estrutura de solo grampeado considerando a variação de sucção, que influencia a resistência do solo, previamente simulando perfis de sucção de um solo típico da região do centro oeste brasileiro. Esse estudo é realizado determinando parâmetros de resistência na interface grampo-solo através de ensaios realizados em campo (i.e. ensaios de arrancamento de grampo), e parâmetros de resistência e hidromecânicos do solo não saturado determinados em laboratório. Para isso, foram estudados dois perfis de sucção distintos que representam situações climáticas críticas da região e, para cada caso, analisou-se numericamente a estrutura de contenção em solo grampeado, obtendo-se parametricamente o fator de segurança da contenção utilizando programação computacional por meio do Método de Equilíbrio Limite. Com os resultados desta pesquisa, foi possível compreender os efeitos da sucção na no dimensionamento e no comportamento hidromecânico de estruturas de contenção em solo grampeado típico da região de Goiânia.

PALAVRAS-CHAVE: Solo grampeado, Solo não saturado, Estabilidade de taludes, Tirantes passivos.

1 INTRODUÇÃO

Os métodos para estabilidade de taludes usualmente empregados para o dimensionamento de solo grampeado são chamados “Métodos de Equilíbrio Limite”, que admitem o solo como um material rígido. A forma da superfície de deslizamento admitida pode ser plana circular ou qualquer. Esses métodos fornecem valores de fator de segurança para o talude em função de forças resistentes (resistência do solo e do grampo) e forças

mobilizadoras, relação entre momentos resistentes e mobilizadores ou ainda entre parâmetros de resistência do solo.

O método de equilíbrio limite, comumente utilizado no dimensionamento de estruturas de solo grampeado, não oferece informação sobre as tensões e deformações na estrutura. No entanto, o êxito da técnica pressupõe deslocamentos para que a resistência dos grampos seja mobilizada. Portanto, seria desejável conhecer os deslocamentos que a estrutura sofre durante e depois de realizado o

processo da escavação, os esforços mobilizados nos grampos e a distribuição de tensões atrás da parede da escavação. A importância deste estudo é maior em situações em que a previsão do comportamento é a responsável por garantir a segurança de construções e de instalações de serviço público próximas às escavações grampeadas.

A análise do solo na condição não saturada pode alterar o dimensionamento de uma contenção, tanto na época seca quanto chuvosa, já que, a utilização de duas variáveis de tensão ao invés da análise baseada em tensões efetivas ou totais do solo saturado altera os parâmetros de resistência do solo. Como a maioria das obras em solo grampeado são executadas acima do lençol freático, a análise da contenção sob a ótica da mecânica dos solos não saturados é de extrema importância.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em 1972 a técnica do solo grampeado foi empregada pela primeira vez na França. Suas origens são simultâneas ao NATM (*New Australian Tunneling Method*) para a construção de túneis. Consistiu na aplicação de um suporte flexível para permitir que o terreno se deformasse ocorrendo uma região plastificada no entorno da escavação, que podia ser reforçada por grampos. No Brasil, começou a ser aplicada de maneira intuitiva por construtores de túneis a partir de 1970, no entanto, as experiências bem sucedidas não foram devidamente divulgadas. (ORTIGÃO, et al., 1993)

Este conceito de combinação de reforço passivo (e ativo, como o caso do modelo de Lang para tirantes) em aço e concreto projetado também foi aplicado para a estabilização de taludes rochosos desde o início da década de 1960. Uma das primeiras aplicações de solo grampeado foi em 1972 para um projeto de ampliação da estrada de ferro perto Versalhes, França, onde um talude de 18m de altura de corte em uma encosta de areia foi estabilizado usando grampos. Como o método possui vantagens como o custo-benefício e a construção mais rápida do que outros métodos de suporte convencionais, o uso de solo grampeado aumentou na França e em outros

países da Europa. (BYRNE, et al., 1998)

O processo construtivo de uma contenção em solo grampeado inicia-se com o corte descendente do solo na geometria do projeto, exceto os casos de taludes pré-existentes. A altura de escavação em cada etapa depende do tipo de solo. Segue-se com execução da primeira linha de grampos horizontais, aplicação de tela metálica e concreto projetado. Caso o talude já esteja cortado pode-se trabalhar de forma descendente ou ascendente, conforme a conveniência. Simultaneamente ao avanço dos trabalhos, são executados os drenos profundos e os da superfície do talude, assim como canaletas ou descidas d'água, conforme especificado em projeto. A Figura 1 ilustra esse processo, que pode ocorrer de forma manual ou por meio de equipamentos pesados. (SOLOTRAT, 2009)

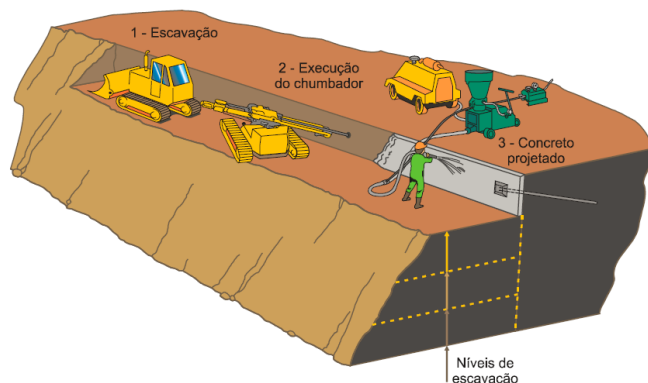


Figura 1. Etapas do processo executivo do solo grampeado.

Os métodos mais utilizados nas análises de equilíbrio limite dividem a massa de solo acima da superfície potencial de deslizamento em fatias segundo planos verticais. Essas fatias podem ser definidas em diferentes larguras. No caso de taludes heterogêneos deve-se ter o cuidado de atribuir à base de cada fatia um só conjunto de parâmetros de resistência, o que condiciona a largura das fatias.

A base de cada fatia é representada por um segmento de reta ao invés de uma curva. Tal modificação permite simplificar a quantificação do peso próprio e as direções das forças atuantes. Quanto menor for a largura das fatias, menor será o erro introduzido no resultado.

O comportamento mecânico do solo pode ser descrito em termo das variáveis do estado tensões do solo. Essas variáveis consistem em

certas combinações de tensões que são independentes das propriedades físicas do solo. O número de variáveis de tensões necessárias para descrever o estado de tensões do solo depende do número de fases do solo envolvidas.

Uma análise de equilíbrio de tensões pode ser realizada para o solo não saturado e utilizada para a definição do estado de tensões em um ponto no solo. Esse estado de tensões em um ponto pode ser analisado considerando-se que todas as tensões que atuam sobre os planos que formam em elemento infinitesimal cúbico. (FREDLUND, et al., 1993)

A resistência ao cisalhamento de um solo não saturado também pode ser formulada em termos de variáveis de estado de tensões independentes, como mostra a Equação 1:

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_f - u_a)_f \cdot \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \cdot \tan \phi^b \quad (1)$$

Esta equação é definida como envoltória de Mohr-Coulomb estendida para solos não saturados. A resistência ao cisalhamento de um solo não saturado é, então, expressa como uma função dos parâmetros de resistência do solo, c' , ϕ' , e ϕ^b , e as duas variáveis de estado de tensão independentes. Desta forma, o conceito de "coesão total pode ser definida como uma função dos parâmetros de resistência ao cisalhamento c' e ϕ^b e da sucção matricial aplicada:

$$c = c' + (u_a - u_w)_f \cdot \tan \phi^b \quad (2)$$

3 METODOLOGIA

O dimensionamento da contenção em solo grampeado estudada é apresentada através do método tradicional de equilíbrio limite com o método das fatias. A estabilidade da contenção foi calculada com o software *Slope/W* considerando os efeitos do solo não saturado, do perfil de sucção, da coesão aparente do solo e da interação solo grampo. Finalmente, a mesma estrutura de contenção foi calculada considerando o solo saturado e os resultados obtidos comparados com o método de dimensionamento aqui proposto para solo não saturados.

Para desenvolvimento da pesquisa foram

coletados dois solos com comportamentos e características distintas em campo. Ambos foram obtidos durante o processo executivo da contenção de uma obra no município de Goiânia. A Figura 2 mostra a fotografia aérea do local da obra durante o início das escavações.



Figura 2. Fotografia aérea do local de retirada das amostras de solo.

Para o projeto de contenções, dividiu-se a obra em trechos, de acordo com as alturas de cortes. A Figura 3 mostra essa divisão, bem como os locais onde foram retiradas as amostras do solo estudado e os locais onde foram realizados ensaios de arrancamento e sondagem. As amostras foram retiradas nas profundidades de 2,70m e 7,50m e foram denominadas de “Amostra 1” e “Amostra 2”, respectivamente.

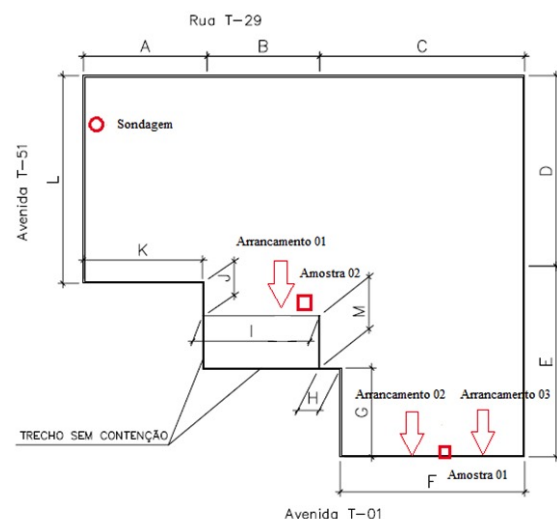


Figura 3. Locais de retiradas de amostras e realização de ensaios.

Nesta pesquisa foram realizados em laboratório os ensaios de caracterização,

cisalhamento inundado, papel filtro, WP4C, compressão diametral, adensamento e permeabilidade saturada tanto para a Amostra 1 quanto para a Amostra 2.

Para a obtenção do primeiro perfil de sucção do solo não saturado analisado, foram necessários os parâmetros de permeabilidade natural, a CCSA da Amostra 1 e os índices pluviométricos do solo da região de Goiânia. Esses parâmetros, juntamente com a geometria do talude e as condições de contorno foram os dados de entrada no software *Seep/W*, que utiliza o Método dos Elementos Finitos para obtenção dos perfis de sucção de solo em diferentes situações de chuva.

A permeabilidade do solo não saturado foi obtida do ensaio de adensamento com medida de permeabilidade e pelos dados da CCSA da Amostra 1. Os dados de índices pluviométricos da cidade de Goiânia foram obtidos no trabalho de Rocha, 2013.

A geometria dos taludes foi de altura total igual a 31,65m, altura do N.A. igual a 11,65m, altura de corte de 11,65m e domínio de 80m.

As condições de contorno utilizadas foram aplicações de fluxo igual a zero nas laterais e na parte inferior do problema. No limite superior, na região de terreno natural foi aplicada precipitação de $1,12 \times 10^{-6}$ durante 24h e tempo de retorno igual a 5 anos. Na região de corte foi simulada pressão igual a zero. A Figura 4 mostra a interface do programa, com essas condições de contorno. A malha para essa simulação foi construída com 40200 nós.

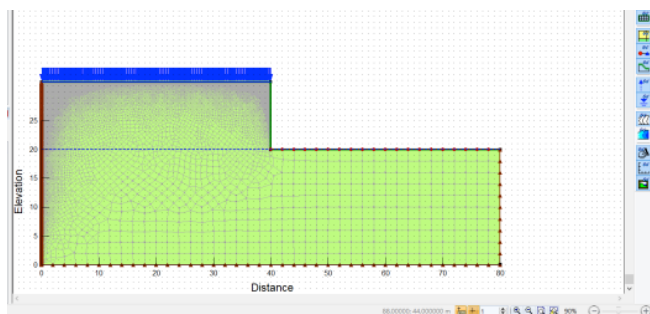


Figura 4. Interface do software para simulação de chuva (GEOSLOPE, 2012).

Para as análises de dimensionamento de solo grampeado foi utilizado do software *Slope W*. Este software utiliza o Método dos Elementos Finitos para análises de estabilidade de taludes considerando formulações de equilíbrio limite

com base no método de fatias. O método considerado foi o Método de Bishop.

Foi usado o critério de resistência Mohr-Coulomb para as tensões efetivas especificadas. O valor de coesão do solo foi calculado a cada metro considerando a coesão efetiva do solo mais a parcela de coesão devido a sucção, como indicado na Equação 2. Para a obtenção da coesão total da parcela do solo acima do N.A. foram utilizadas as curvas de ajuste de Khun (2013), que relacionam os valores de coesão e de sucção obtidos pelo ensaio de compressão diametral. Para as análises abaixo do N.A. foram considerados valores de coesão e ângulo de atrito obtidos no ensaio de cisalhamento saturado.

Os efeitos de reforço de solos por grampos foram incorporados no Software *Slope /W* através cálculo da força de arrancamento, que é aplicado ao diagrama de corpo livre através da especificação de comprimento de ligação para o grampo. Esse comprimento de ligação é o comprimento solicitado, que, assume-se que seja o comprimento atrás da cunha de ruptura.

A diferença foi a profundidade do nível d'água. Para o dimensionamento do solo grampeado, as mesmas considerações do tópico anterior foram simuladas, no entanto, considerou-se a coesão saturada do solo obtida no ensaio de cisalhamento saturado.

4 RESULTADOS E CONCLUSÕES

A Tabela 1 mostra um resumo dos ensaios de caracterização de cada amostra. Nota-se que o peso específico e o índice de plasticidade das duas camadas variou pouco.

Tabela 1. Caracterização das amostras.

Amostra	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Classif.	Peso Esp. (g/cm ³)
1	37	22	15	CL	2,76
2	41	22	19	CL	2,79

Os dois tipos de solos possuem consideráveis porcentagens de silte e argila, o que foi constatado em análise tátil visual em campo.

Obteve-se, para as duas amostras, curvas características solo água bimodais, como mostra a Figura 5. Essa propriedade da curva depende da distribuição de poros do solo, sendo o

primeiro valor de entrada de ar correspondente aos macroporos e o segundo valor de entrada de ar para os microporos. Até o primeiro valor de entrada de ar, o solo encontra-se saturado. Com o aumento da sucção e perda de umidade, a fase líquida torna-se descontínua e a fase gasosa torna-se contínua, com o aparecimento de meniscos.

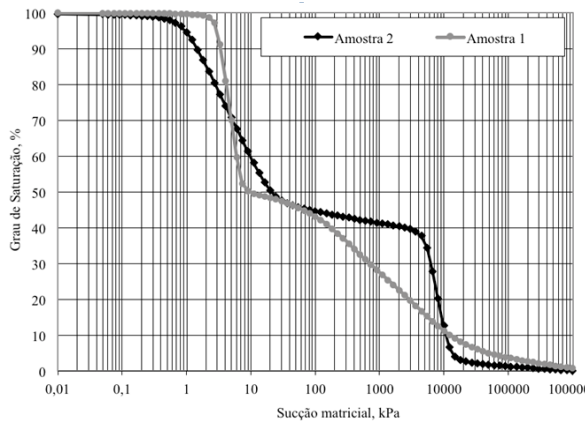


Figura 5. CCSA para as amostras 1 e 2.

As tabelas 2 e 3 mostram que, apesar de serem solos distintos, os valores de ângulo de atrito são muito semelhantes. Os valores de coesão se distinguem, mas são valores consideráveis para um solo saturado. O solo da Amostra 2 apresenta parâmetros de resistência maiores, devido ao valor de coesão de 21,26kPa.

Tabela 2. Resumo do Ensaio de cisalhamento do solo para a Amostra 1.

Amostra	Tensão Normal (kPa)	Tensão de Cisalhamento (kPa)	Ângulo de atrito (°)	Coesão (kPa)
1	49,01	55,05	36,8	13,6
	73,77	64,55		
	98,78	80,94		
	122,66	110,97		

As Figuras 6 e 7 mostram as curvas de ajuste e os dados obtidos nos ensaios de compressão diametral para os dois tipos de solo. Durante a realização do ensaio para a amostra 1, houve algumas dificuldades para o desmolde dos corpos de prova para serem colocados na prensa, devido a alta porosidade da amostra. Consequentemente, alguns pontos foram perdidos e não houve dados suficientes para construção da curva de ajuste. Por se tratar de

um solo semelhante ao solo encontrado por Gomes 2015, utilizou-se a curva de ajuste obtida para esse solo.

Tabela 3. Resumo do Ensaio de cisalhamento do solo para a Amostra 2.

Amostra	Tensão Normal (kPa)	Tensão de Cisalhamento (kPa)	Ângulo de atrito (°)	Coesão (kPa)
2	48,63	57,02	36,6	21,26
	73,95	75,04		
	99,07	97,32		
	148,69	130,75		

O valor máximo de coesão total obtido na curva de ajuste para a amostra 1 é de aproximadamente 17kPa e o valor que essa curva se estabiliza, para maiores sucções, é de aproximadamente 11kPa.

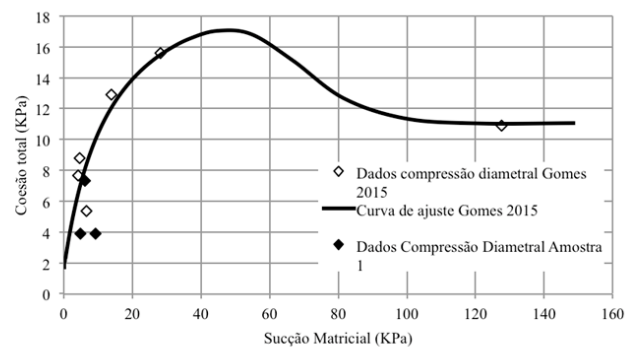


Figura 6. Relação de coesão aparente e sucção matricial para a Amostra 1.

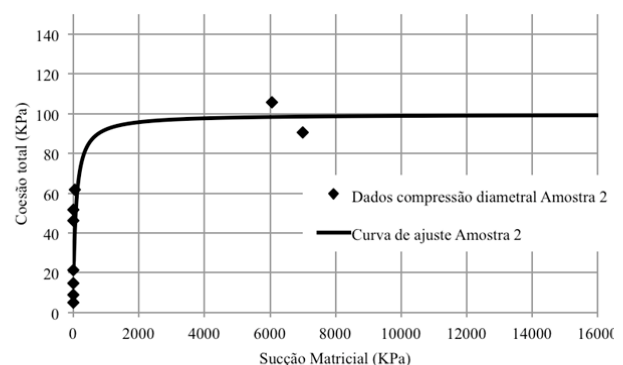


Figura 7. Relação de coesão aparente e sucção matricial para a Amostra 2.

Os ensaios de arrancamento realizados foram do tipo “qualificação”. Não foi possível chegar até a ruptura dos grampos por motivos executivos. A Figura 8 mostra as curvas de deslocamento em relação ao q_s , ou adesão, para

cada grampo realizado em obra. Os grampos 1 e 2 não chegaram a estabilizar, ou seja, no último estágio de carregamento a leitura no deflectômetro não foi precisa. Essa informação não indica ruptura.

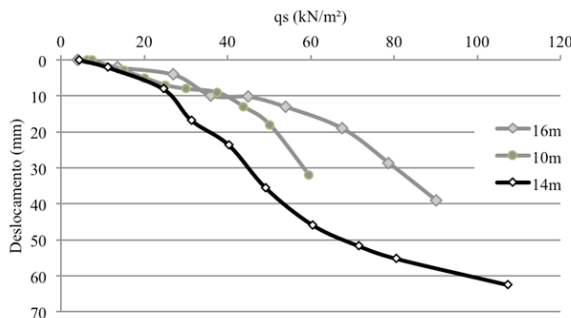


Figura 8. Curvas deslocamento x q_s para cada grampo realizado em obra.

A Figura 9 mostra o gráfico de coesão aparente do solo em relação à profundidade. A camada da Amostra 2 (mais profunda), que possui um solo mais fino e menos poroso, possui maiores coesões. O perfil de sucção de campo possui um solo superficial que apresenta maiores sucções e menores coesões totais e uma camada mais profunda e mais resistente, que possui maiores coesões totais.

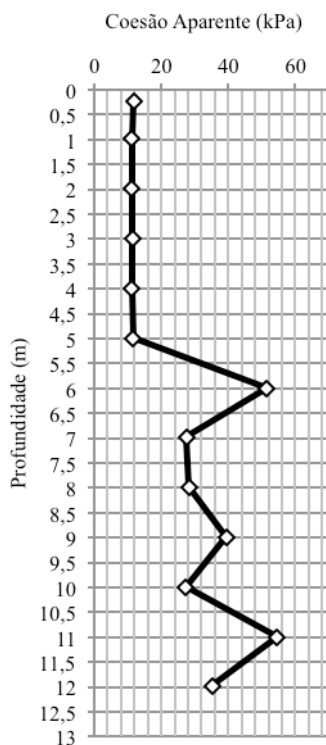


Figura 9. Gráfico de coesão aparente em relação a profundidade.

A Figura 10 mostra os gráficos de FS em relação aos comprimentos dos grampos em análises saturadas e não saturadas.

análises saturadas e não saturadas. Observa-se claramente que, quanto maior o número de grampos, maior é o fator de segurança encontrado. Para um número de grampos n , quanto maior o comprimento dos grampos, maior é o fator de segurança.

Fazendo uma comparação entre as análises saturadas e não saturadas observa-se um aumento considerável do fator de segurança. Esse incremento ocorre devido ao aumento da coesão devido à parcela de sucção, que é desconsiderada nas análises saturadas. É possível observar uma faixa de variação do FS entre a análise com tensões efetivas e solo não saturado. Assim, o dimensionamento de estruturas em solo grampeado pode ser otimizado. Pode-se escolher o limite inferior e superior de FS entre análises efetivas e não saturadas e fazer diferentes considerações dependendo do tipo de obra a ser dimensionada e o período do ano em que ocorrerá a construção.

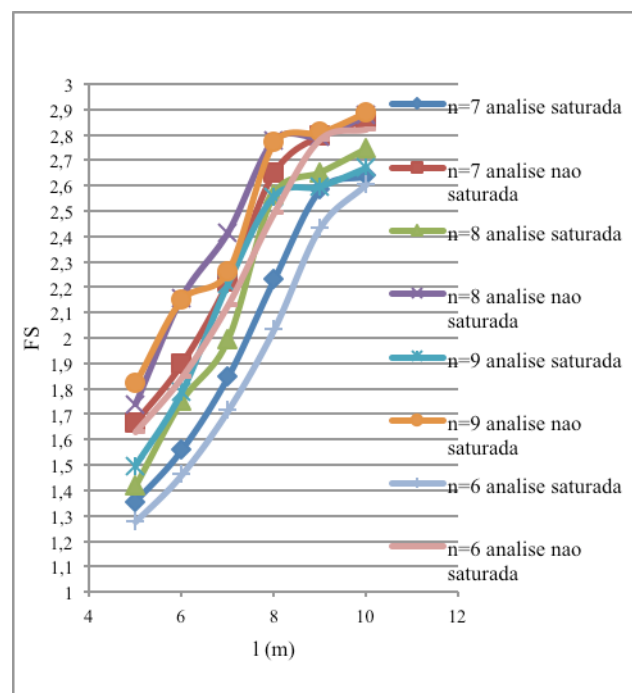


Figura 10. Gráfico de FS em relação aos comprimentos dos grampos em análises saturadas e não saturadas.

Tanto para as análises saturadas quanto para as análises não saturadas, existe um ponto onde o FS ótimo. Esse ponto corresponde a transição entre os casos onde a ruptura é interna ou no pé do talude, dos casos onde a ruptura é externa, ou global.

Esse estudo contribuiu para o entendimento

do dimensionamento de estruturas de contenção em solo grampeado, em diferentes condições de trabalho e condições, uma vez que, a determinação dos fatores de segurança da estrutura é primordial para o desenvolvimento de um projeto seguro, com viabilidade econômica e que tenha soluções simples e de fácil utilização.

SOLOTRAT. 2009. Manual de Serviços Geotécnicos. 3ª Edição. s.l. : Solotrat, 2009.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao programa de mestrado em Geotecnia Estruturas e Construção Civil (PPG-GECON) pelo apoio no desenvolvimento da pesquisa e a Fundação de Apoio a Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

BYRNE, R. J., et al. 1998. Manual for design and construction monitoring of soil nail walls. [ed.] US. Department of Transportation - Federal Highway Administration. Publication No. FHWA-SA-96-096R. 1998.

FREDLUND, D. G. e RAHARDJO, H. 1993. Soil Mechanics for Unsaturated Soils. Canada : s.n., 1993.

GEOSLOPE. 2012. Seepage Modeling with SEEP/W - An Engineering Methodology. Calgary, Canadá : s.n., 2012.

GITIRANA JR., G.F.N. 1999. Modelagem numérica do comportamento de solos não saturados considerando modelos elásticos e de estados críticos. Brasília : s.n., 1999.

GOMES, A.C. Monitoramento de uma estrutura de contenção em estacas espaçadas considerando perfil de sucção. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2015.

KUHN, V. O. Resistência ao cisalhamento de um solo tropical não saturado considerando altas sucções. 200f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

ORTIGÃO, J.A. R., ZIRLIS, A. C. e PALMEIRA, E. M. 1993. Experiência com Solo Grampeado no Brasil: 1970 - 1993. Solos e Rochas. Dezembro de 1993.

ROCHA, M. F. 2013. Influência do perfil de sucção em obras de contenção em solos não saturados. 2013.