

Probabilidade de Falha de Muro de Solo Envelopado com Geogrelha

Matheus Andre Rodrigues

Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos – SP, Brasil, mthsndrrdgs@gmail.com

Paula Lodo Zuccolo

Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos – SP, Brasil, paula26lz@gmail.com

Marcell Gustavo Chagas Santos

Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos – SP, Brasil, marcell.gustavo@hotmail.com

Jefferson Lins da Silva

Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos – SP, Brasil, jefferson@sc.usp.br

RESUMO: Os métodos usuais de dimensionamento aplicados a estruturas em solo envelopado e outras obras geotécnicas admitem que os valores dos parâmetros do solo são fixos e conhecidos, recebendo, portanto, o nome de processos determinísticos. No entanto, toda e qualquer obra contém incertezas, cuja origem se dá na impossibilidade de reprodução das condições de campo em laboratório, perturbação do meio devido à instalação de equipamentos, ocorrências geomecânicas não detectadas durante a fase de sondagem, variabilidade inerente do maciço, entre outros. Usualmente, consideram-se tais incertezas ao se afastar os valores médios das resistências dos respectivos valores médios das solicitações, diminuindo, portanto, a probabilidade de falha. Já na análise de confiabilidade, essa incerteza é medida diretamente, conferindo maior sensibilidade quanto à segurança do projeto. Sendo assim, este trabalho apresenta a análise de um muro de solo reforçado com geogrelha disponível na literatura com base em simulações numéricas e análise de confiabilidade, utilizando o método de Monte Carlo, ambas desenvolvidas no software SLOPE/W pertencente ao programa GeoStudio/2012. Neste trabalho, apresentam-se os procedimentos usuais da análise de confiabilidade com base no conjunto de propriedade mecânicas necessário ao projeto da obra geotécnica em questão. Foram ainda realizadas simulações numéricas do processo construtivo, com ênfase na avaliação dos deslocamentos horizontais da face e tensões verticais desenvolvidas – no SIGMA/W. Também foi possível avaliar a estabilidade global e mista ou interna por equilíbrio limite – pelo método de Bishop, além da análise da fundação e da ruptura global. Uma análise probabilística considerando as incertezas dos parâmetros geotécnicos mostra-se mais adequada na verificação da segurança do problema estudado, visto que para o mesmo fator de segurança a estrutura pode apresentar diferentes índices de confiabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: Probabilidade de falha, Muro de solo envelopado, Geogrelha.

1 INTRODUÇÃO

Usualmente, as incertezas relacionadas ao dimensionamento de uma estrutura na Engenharia Geotécnica são absorvidas ao se afastar os valores médios das resistências dos respectivos valores médios das solicitações, diminuindo, portanto, a probabilidade de

ocorrência de uma situação onde a solicitação é maior que a resistência, o que caracteriza falha (Tang, 2001). Esse afastamento é garantido pela adoção de fatores de segurança maiores que a unidade, entretanto sem o devido conhecimento acerca das variáveis envolvidas (Ribeiro, 2008).

Na análise de confiabilidade, essa incerteza é medida diretamente, conferindo maior

sensibilidade quanto à segurança do projeto. Como ilustração disso, considera-se a comparação do grau de segurança entre uma proposta em fundação rasa e outra em fundação profunda. Mesmo que ambos os casos tenham fatores de segurança maiores que o estabelecido em norma, não necessariamente a proposta com maior fator de segurança é, de fato, a mais segura, especialmente ao se considerar que são problemas com grau de incerteza distintos e não quantificados na análise determinística (Silva, 2006).

De modo geral, a análise de confiabilidade é um processo de cálculo mais realista, o qual permite uma adoção mais consciente dos valores das margens de segurança, uma vez que as incertezas do problema são quantificadas, em oposição ao processo convencional, onde são absorvidas através de coeficientes normalizados, sem necessariamente serem conhecidas (Nascimento *et al.*, 2014).

Este trabalho aborda um muro reforçado com geogrelha adaptado da literatura, visando analisar o índice de confiabilidade nas eventuais superfícies de ruptura e a probabilidade de falha – análise probabilística, assim como o desenvolvimento das tensões verticais, esforços na geogrelha e deslocamentos horizontais ao longo do processo construtivo – análise determinística.

2 FORMULAÇÃO DETERMINÍSTICA

O software SIGMA/W do programa GeoStudio/2012, de elementos finitos aplicados à Engenharia Geotécnica foi a ferramenta utilizada neste trabalho para o cálculo das tensões e deformações. Para o cálculo das eventuais superfícies de ruptura foi utilizado o software SLOPE/W do programa GeoStudio/2012, em que foi escolhido o método de Bishop, que tem como base o método de equilíbrio limite.

Tais métodos possuem as seguintes hipóteses básicas: a superfície de ruptura possui forma geométrica definida (circular para este caso), a massa de solo se rompe como um corpo rígido e o critério de Mohr-Coulumb é satisfeito na superfície de ruptura, ou seja, vale a seguinte equação:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \varphi \quad (1)$$

Onde τ é a tensão de cisalhamento; σ é a tensão normal (que pode ser dada em termos de tensão efetiva ou total); c e φ são, respectivamente, a coesão e o ângulo de atrito do solo. Cada potencial superfície de ruptura possui apenas um fator de segurança associado a si.

Mais especificamente, o método de Bishop consiste em dividir o talude em lamelas e supor que a resultante das forças entre as lamelas é horizontal, ou seja, equilíbrio das forças verticais. Na Figura 1, O é o centro da circunferência, enquanto R é o raio, W é o peso de uma dada lamela e x é a distância entre o centro da circunferência e o centro de massa de uma dada lamela.

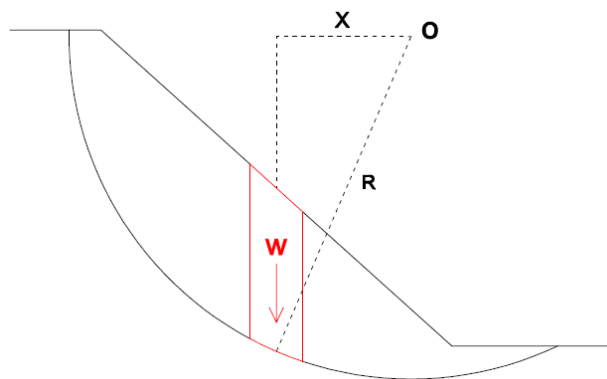


Figura 1. Esquema da divisão do maciço.

Para o muro simulado foram procurados três tipos de superfícies: global e mista ou interna. A superfície interna é aquela que passa apenas na parte reforçada do muro, enquanto a global ocorre no maciço de solo. Já a superfície mista intercepta ambos.

É possível definir a superfície de ruptura por meio da definição de um ou mais pontos para sua entrada e saída no maciço. A análise probabilística foi realizada para a mesma superfície considerada crítica na análise determinística.

3 FORMULAÇÃO PROBABILÍSTICA

Seja a função margem de segurança, definida da seguinte maneira:

$$f(R, S) = R - S \quad (2)$$

Onde R é a resistência disponível e S é o efeito disponível de algum carregamento.

Analisando esta função, é possível perceber que quando $f=0$, a estrutura está na iminência do colapso, isto é, a solicitação se iguala à resistência. Quando $f<0$, a estrutura não está exercendo sua função, caracterizando uma situação de falha. Por outro lado, quando $f>0$, a estrutura é considerada segura e está no exercício de sua função resistir aos carregamentos a que está submetida.

Assim, define-se também a probabilidade de falha, que é a probabilidade de a estrutura não exercer sua função, ou seja, a solicitação torna-se maior do que a resistência:

$$Pf = P(R - S < 0) = P(f < 0) \quad (3)$$

Todas as funções descritas acima dependem de variáveis aleatórias contínuas, que possuem sua própria função densidade de probabilidade, que representa a probabilidade de uma grandeza assumir valores menores ou iguais a certo valor. Essas funções podem ser tratadas com diferentes distribuições, sendo a normal a mais utilizada na Engenharia, descrita apenas pelos parâmetros média e desvio padrão.

Assumindo tal distribuição para as funções, Silva (2011) cita que quanto menor a região de sobreposição das curvas, menor a probabilidade de falha, o que depende tanto do afastamento médio de R e S, quanto de suas dispersões.

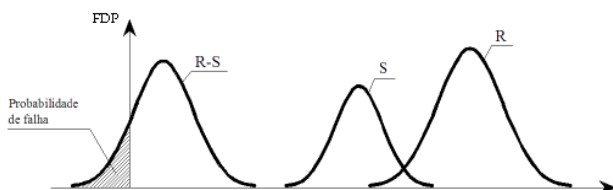


Figura 2. Função densidade de probabilidade para solicitações (S), resistências (R) e margem de segurança (R-S). Fonte: Nowak e Collins (2000).

Sendo conhecidas essas funções e algumas de suas características, é possível definir o índice de confiabilidade, parâmetro de grande importância na análise de confiabilidade e é um dos dados de saída do software utilizado na simulação.

O primeiro passo consiste na mudança de

variáveis para as chamadas variáveis reduzidas. Essa mudança faz com que as variáveis mantenham a distribuição normal, porém tenham média nula e desvio padrão unitário.

$$\begin{aligned} Z_r &= \frac{R - \mu_r}{\sigma_r} \\ Z_s &= \frac{S - \mu_s}{\sigma_s} \end{aligned} \quad (4)$$

Sendo R e S as variáveis aleatórias de resistência e solicitação, respectivamente: μ a média da função e σ o desvio padrão da função. Deste modo, realizando-se as devidas operações, é possível escrever a função margem de segurança da seguinte forma:

$$f(Z_r, Z_s) = R - S = (\mu_r - \mu_s) + Z_r \cdot \sigma_r - Z_s \cdot \sigma_s \quad (5)$$

Então, é possível escrever qualquer valor de f como uma reta no espaço das variáveis Z_r e Z_s . Dar-se-á maior atenção ao caso em que $f=0$, ou seja, a reta representa uma situação crítica.

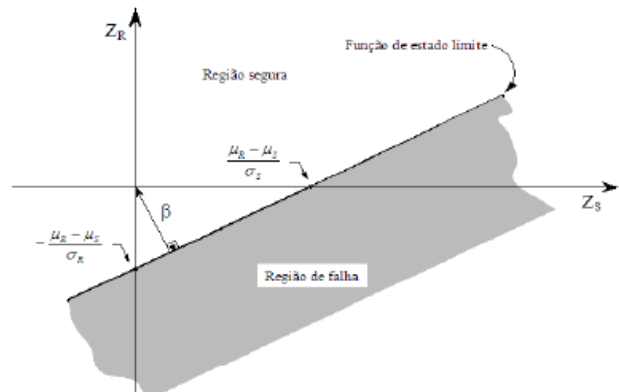


Figura 3. Representação geométrica do índice de confiabilidade (β). Fonte: Nowak e Collins (2000).

Algebricamente, o índice de confiabilidade pode ser representado da seguinte forma:

$$\beta = \frac{\mu_r - \mu_s}{\sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_s^2}} \quad (6)$$

O índice de confiabilidade é uma alternativa na avaliação da segurança de um projeto, sendo que é mais conveniente, pois possui ordem de grandeza entre 1 e 6, enquanto que a probabilidade de falha varia de 10^{-1} a 10^{-9} .

Segue tabela com alguns valores de

referência para o índice de confiabilidade e a probabilidade de falha.

Tabela 1. Valores de referência para o índice de confiabilidade e probabilidade de falha. Fonte: Dell'avanzi e Sayão (1998).

Casos	Índice de confiabilidade	Probabilidade de falha
Fundações	2,3 a 3,0	10^{-2} a 10^{-3}
Taludes de mineração	1,0 a 2,3	10^{-1} a 10^{-2}
Barragens	3,5 a 5,0	10^{-3} a 10^{-5}
Estruturas de contenção	2,0 a 3,0	10^{-2} a 10^{-3}

4 CARACTERÍSTICAS DO MURO

4.1 Parâmetros dos materiais

O muro escolhido para as simulações foi uma adaptação daquele encontrado em Brugger e Montez (2003). A estrutura original é a reconstrução de um aterro rodoviário rompido, localizado no litoral do estado do Rio de Janeiro. A altura total do muro é de 5,5 m e o comprimento das inclusões – geogrelhas – é de 3,5 m, sendo que se encontram espaçada entre si de 0,40 m.

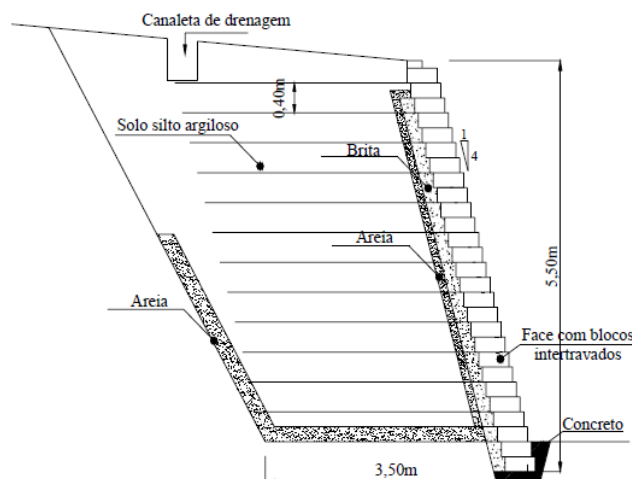


Figura 4. Seção transversal do muro. Fonte: Brugger e Montez (2003).

A inclinação do muro é de 4:1, como exibido na Figura 4. O solo presente no muro é proveniente de jazidas próximas, ou seja, apresenta características físicas e mecânicas semelhantes às do maciço. O solo foi caracterizado como silte argiloso, com 20 a

50% de material fino. Os parâmetros de resistência adotados para o projeto foram: $c=5$ kPa e $\phi=60^\circ$ (Patias, 2005).

As geogrelhas utilizada nesta obra possuem resistência à tração nominal de 35 kN/m e foram ancoradas na face da estrutura, que foi construída com blocos intertravados preenchidos com brita 1.

Os parâmetros inseridos nos softwares para os materiais que compõem o muro encontram-se tabelados a seguir, assim como os coeficientes de variabilidade médios e os desvios padrão das grandezas de interesse. Os parâmetros da Tabela 2 e 3 tiveram como base dados da literatura, tais como: Lumb (1966); Harr (1977) apud Phoon (1995); Patias (2005); Hidalgo-Montoya (2013); etc.

Tabela 2. Parâmetros dos materiais. LP significa linear-plástico, EP elastoplástico e LE linear-elástico.

Material	Modelo	E (kPa)	γ (kN/m ³)	Φ (°)	c (kPa)
Concreto	LP	$20 \cdot 10^6$	24	-	-
Solo silto argiloso	EP	$40 \cdot 10^3$	21	26	5
Areia	EP	$20 \cdot 10^3$	20	30	0
Brita	LE	$40 \cdot 10^6$	27	-	-

Tabela 3. Dados de variabilidade dos parâmetros.

Material	Parâmetro	C.V. (%)	Desvio padrão
Solo silto argiloso	γ	5	1,05
	ϕ	15	3,9
	c	20	1
Areia	γ	10	2
	ϕ	8	8

Para a análise no SLOPE/W, o concreto foi definido como material de alta resistência – High Strength, seguindo recomendações presentes no site da GeoSlope. Tal suposição leva em conta a alta resistência do concreto em comparação aos solos.

4.2 Parâmetros da geogrelha

Não foi considerada variabilidade dos parâmetros da geogrelha devido ao controle durante a fabricação dos geossintéticos.

Com base em conhecimento da Resistência dos Materiais, foi possível inserir a resistência inerente à geogrelha no programa GeoStudio/2012: considerando o geossintético como uma viga, cujo momento de inércia é nulo

– o que é plausível, pois a geogrelha se aproxima de uma membrana.

Seja E o módulo de elasticidade, característica do material desta viga teórica de um metro de comprimento, A é a área da seção transversal e o módulo de rigidez (J) é definido por:

$$J = E.A \quad (7)$$

Para o caso em que a área é unitária, o valor de J é numericamente igual ao de E . Os catálogos de fabricantes indicam que a deformação de ruptura das geogrelhas é, em geral, de 12%. Para a viga de comprimento unitário, corresponde a um deslocamento (δ_{rup}) de 0,12 m.

A caracterização das geogrelhas é feita pela resistência longitudinal última, dada em kN/m de comprimento (F_{rup}). Então, para o deslocamento de ruptura da viga de comprimento unitário, tem-se esforço normal (N) numericamente igual à resistência. Assim, pela lei de Hooke:

$$\frac{N}{A} = E.\varepsilon \rightarrow \frac{N}{1} = J_{rup} \cdot \frac{\delta_{rup}}{1} \rightarrow J_{rup} = E = \frac{N}{\delta_{rup}} \quad (8)$$

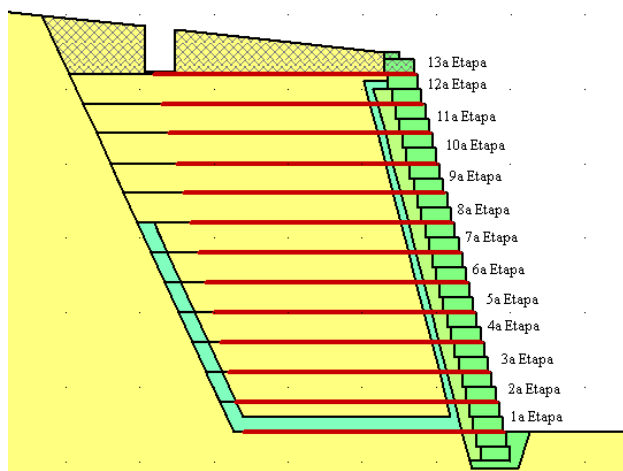


Figura 5. Etapas do processo construtivo realizadas no SIGMA/W.

Para inserir a geogrelha no programa GeoStudio/2012, basta dividir o valor da resistência longitudinal última por 0,12 e associar este valor ao módulo de elasticidade do elemento de viga, com área da seção transversal unitária e momento de inércia nulo.

A cada etapa do processo construtivo,

inseriu-se uma camada de geossintético e a camada de materiais adjacente, como exibido na figura 5. No total, somaram-se treze etapas.

5 RESULTADOS

5.1 Superfícies de ruptura

Como exposto anteriormente, são possíveis três tipos de superfície de ruptura para a estrutura simulada. Porém, encontraram-se apenas superfícies mista e global devido à presença dos blocos de concreto com resistência consideravelmente superior ao solo – logo a superfície de ruptura não passa por estes.

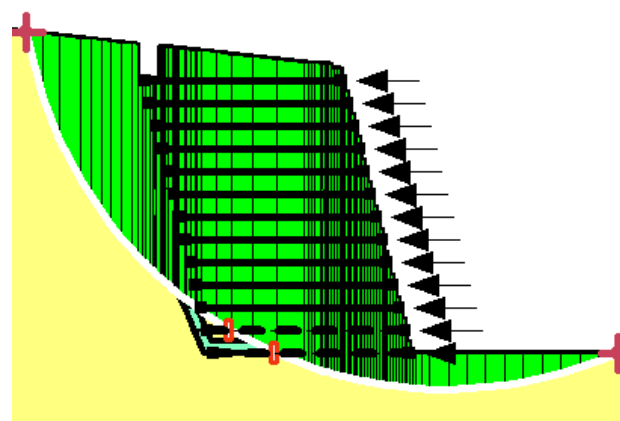


Figura 6. Superfície de ruptura mista. As regiões destacadas em vermelho são a intersecção entre a superfície de ruptura e os reforços.

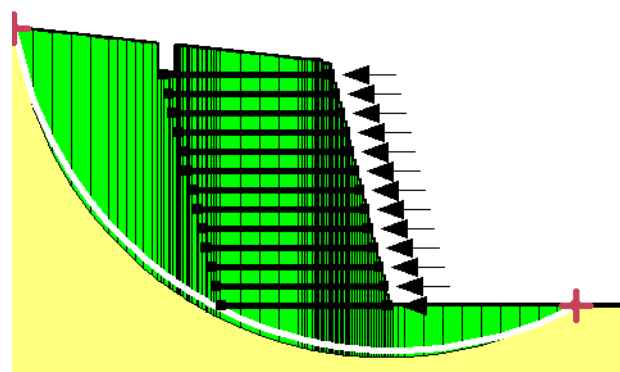


Figura 7. Superfície de ruptura global. As setas indicam o posicionamento de cada reforço na estrutura.

Segue a Tabela 4 com os resultados associados a cada superfície de ruptura.

Tabela 4. Grandezas estatísticas associadas a cada superfície de ruptura.

Superfície	$1/P_f$	β	Fator de segurança			
			méd	DP	mín	máx
Mista	192	2,38	1,45	0,19	0,82	2,33
Global	73	2,07	1,45	0,22	0,54	2,41

5.2 Tensões e deformações

O software SIGMA/W apresenta curvas de isovalores de tensões verticais resultantes do processo construtivo da estrutura. Os valores extremos de tensões e deformações foram observados nas etapas mais avançadas. Analisar as deformações é importante para determinar se os reforços romperão ou não - a deformação de ruptura adotada como crítica foi de 12%.

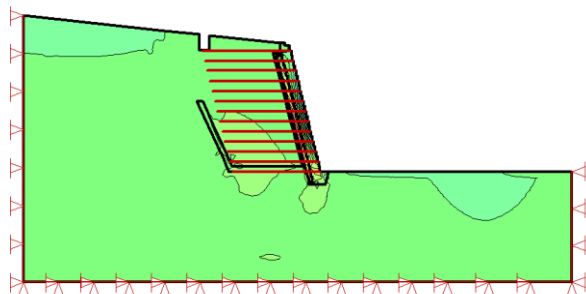


Figura 8. Tensões na etapa construtiva final

Os valores extremos de tensões verticais e deformações horizontais são os apresentados na tabela a seguir.

Tabela 5. Valores máximos e mínimos de tensões verticais e deformações horizontais.

Tensões	σ_v (kPa)	ε_x (m/m)
Máximo	425	0,00104
Mínimo	-270	-0,00189

5.3 Deslocamentos da face

O deslocamento da face em cada uma das etapas será apresentado na Figura 9. Estes valores são importantes quando se leva em consideração aspectos estéticos da estrutura: por exemplo, deslocamentos mesmo dentro das recomendações podem causar sensação de insegurança nos usuários de uma rodovia, supondo que o talude seja de um eventual corte.

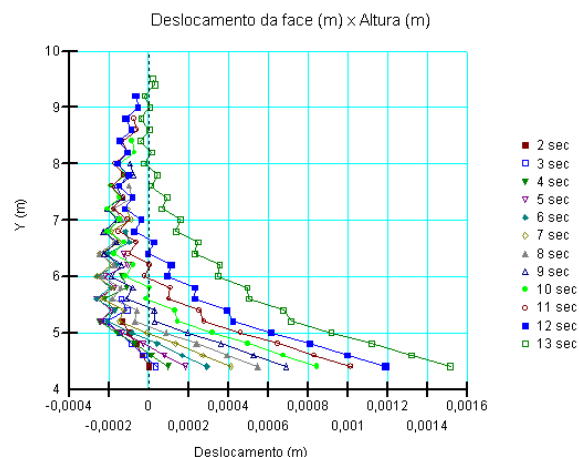


Figura 9. Evolução do deslocamento da face.

5.4 Esforços na geogrelha

Ao fim das simulações, identificou-se que a geogrelha mais solicitada foi aquela na parte mais baixa do muro. A Figura 10 apresenta a evolução dos esforços ao longo do comprimento do reforço.

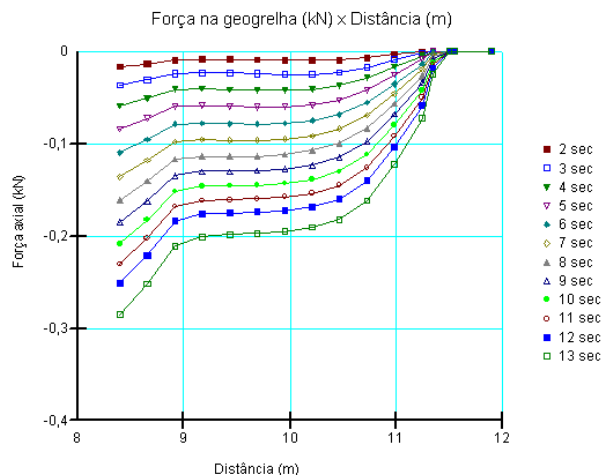


Figura 10. Evolução dos esforços na geogrelha mais solicitada. Cada intervalo de tempo corresponde a uma etapa do processo construtivo (2 sec é a segunda etapa, por exemplo).

6 CONCLUSÃO

Quanto ao índice de confiabilidade e à probabilidade de falha, a superfície de ruptura mista do muro adaptado da literatura mostrou-se satisfatório, enquanto a superfície de ruptura global satisfaz o critério proposto para o índice de confiabilidade para estruturas de contenção e se aproximou bastante do limite em relação à

probabilidade de falha.

Analisando os resultados das simulações é possível concluir que os reforços afastam o sistema da ruptura, ou seja, as deformações horizontais são menores que a máxima deformação de tração admissível, que é de 12%.

Também é possível observar que as tensões mais elevadas encontram-se na fundação do muro (pequena região com concreto e brita mais baixa). A presença da geogrelha torna-se necessária devido à presença de tensões de tração na estrutura.

Em se tratando de deslocamentos, a razão entre a altura do muro e o deslocamento máximo na face é consideravelmente pequena, garantindo que não ocorram estados limites de serviço.

REFERÊNCIAS

- Brugger, P.J.; Montez, F.T. (2003) Muros de contenção em solo reforçado com geogrelhas e blocos segmentais. In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS*, 4, Porto Alegre.
- Dell'avanzi, E. e Sayão, A.S. Avaliação da Probabilidade de Ruptura de Taludes. In: *COBRAMSEG*, 11, 1998, Brasília, Anais. Brasília, v. 2, p. 1289-1295.
- Harr, Milton Edward. *Mechanics of particulate media*. 1977.
- Hidalgo-Montoya, C. A. (2013). *Incertezas, Vulnerabilidade e Avaliação de Risco Devido a Deslizamento em Estradas*. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-081/13, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 250 p.
- Lumb, Peter. The variability of natural soils. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 3, n. 2, p. 74-97, 1966.
- Nascimento, L.D. ; Cordeiro, E.S.B. ; Silva, J.L. (2014) Índice de confiabilidade de um muro de flexão. *XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Goiânia/GO.
- Nowak, A. S. & Collins, K.R. (2000). *Reliability of Structures*. Michigan: Mcgraw-Hill.
- Patias, J. (2005). *Avaliação do uso de Solos não convencionais em estruturas de solo reforçado*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Phoon, Kok-Kwang. *Reliability-based design of foundations for transmission line structures*. 1995. Tese de Doutorado. Cornell University.
- Ribeiro, R.C.H. (2008) *Aplicações de Probabilidade e Estatística em Análises Geotécnicas*. Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Silva, J.L. (2006) *Metodologia de Projeto de Fundações por Estacas Incluindo Probabilidade de Ruína*. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Silva, J.L. (2011) *Análise de tubos circulares de concreto armado para o ensaio de compressão diametral com base na teoria de confiabilidade*. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Tang, W.H. (2001) Efficient reliability-based design using spreadsheet optimization. *Structural safety and reliability*, Corotis et al (eds).