

4

Estabilidade estática do aterro reforçado

4.1.

Introdução

Neste capítulo apresenta-se a avaliação da estabilidade estática de um aterro de rejeitos de mineração reforçado com geossintéticos. A obra está localizada na Mina San Rafael (Peru), na altitude de 4500 acima do nível do mar, na longitude 70°19' Oeste e latitude 14°13' Sul, tendo sido construído com o objetivo de incrementar a capacidade de armazenamento de uma barragem de rejeitos.

O aterro, sobre fundação compressível, possui 10.40m de altura, inclinação de talude de 76°, protegido por geomembrana lisa de 1 mm de espessura, sendo reforçado com 3 camadas de geogrelhas uniaxiais de 200 kN/m de resistência à tração na parte inferior e 6 camadas de geogrelhas uniaxiais de 150 kN/m de resistência à tração na parte superior. O espaçamento vertical entre as 9 camadas de geogrelhas é de 1.20m e a espessura da camada de solo superior é de 0.80m, totalizando o valor de 10.40m de altura do aterro.

Na análise de estabilidade estática foram avaliadas as geometrias das potenciais superfícies de deslizamento, forças de tração máximas nos reforços, deslocamentos na face do talude e fatores de segurança, para diferentes elevações considerando ou não a existência de reforços.

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam diferentes fases de construção do aterro reforçado com geossintéticos da barragem de rejeitos III da mina San Rafael.

4.2.

Propriedades dos materiais

4.2.1.

Propriedades do solo

O solo do aterro reforçado constitui-se de rejeito de mineração de estanho e cobre. As propriedades do aterro e da fundação são apresentadas nas Tabelas 4.1 e 4.2.

O paramento da estrutura foi assumido como um material com coesão igual a 30 kPa e os demais parâmetros iguais aos valores das propriedades do solo de aterro. O material de fundação é rejeito recompactado com ângulo de atrito de 35° e coesão nula.

O comportamento mecânico do material do aterro e da fundação foram representados no estudo numérico através do modelo elastoplástico de Mohr-Coulomb.

Tabela 4.1 - Propriedades da fundação e do solo de aterro

Propriedade	Aterro	Solo de fundação
Massa específica (kg/m ³)	1938	1887
Módulo de Young, E (kPa)	39.216	52.255
Coeficiente de Poisson, ν	0.30	0.30
Ângulo de atrito (°)	30	35
Módulo de Cisalhamento, G (kPa)	15.083	20.098
Módulo de deformação volumétrica, K (kPa)	32.680	43.546

Tabela 4.2 - Características do rejeito do aterro.

Limites de consistência: ASTM - D427 / D4318		
Limite de liquidez (%)		NP
Limite de plasticidade (%)		NP
Índice de plasticidade (%)		NP
Limite de contração (%)		---
Umidade: ASTM - D2216		
Umidade (%)		15.2
Resultados: ASTM – D2487 / D3282		
Material: - Pedregulho (n° 4< ϕ <3") (%)		0
- Areia (n° 200< ϕ <n° 4) (%)		56.9
- Finos (ϕ < n°200) (%)		43.1
Classificação dos solos: - AASHTO - SUCS		A-4(0) SM
Proctor Padrão: ASTM – D698 A		
Umidade ótima (%)		17.6%
Densidade seca máxima (g/cm ³)		1.629

4.2.2.

Propriedades do reforço e interface

O comprimento L da zona reforçada, em relação à geometria do aterro foi selecionado pela correlação $L/H = 0.96$ onde H é a altura do talude. A razão de reforço mínimo típica para o projeto estático de estruturas de solo reforçado é $L/H=0.7$ (FHWA, 1996).

Para os reforços (geossintéticos) e material de interface foram atribuídas as seguintes propriedades:

a) Geogrelha com resistência à tração (**yield**) de 150 kN/m e resistência à compressão (**ycomp**) nula

Espessura $t = 0.005\text{m}$

Área da seção transversal $A = t \cdot 1 = 0.005 \text{ m}^2$

Perímetro exposto $= 2(t+1) \sim 2\text{m}$

Rigidez à tração sob deformação de 2% $J_{wwt,2\%} = 1510 \text{ kN/m}$

Rigidez à tração reduzida $J_{2\%} = 755 \text{ kN/m}$

Módulo de elasticidade $E = \frac{J_{2\%}}{t} = \frac{755}{0.005} = 151.000 \text{ kPa}$

b) Geogrelha com resistência à tração (**yield**) de 200 kN/m e resistência à compressão (**ycomp**) nula

Espessura $t = 0.005\text{m}$

Área da seção transversal $A = t \cdot 1 = 0,005 \text{ m}^2$

Perímetro exposto $= 2(t+1) \sim 2\text{m}$

Rigidez à tração sob deformação de 2% $J_{wwt,2\%} = 1910 \text{ kN/m}$

Rigidez à tração reduzida³ $J_{2\%} = 955 \text{ kN/m}$

Módulo de elasticidade $E = \frac{J_{2\%}}{t} = \frac{955}{0.005} = 191.000 \text{ kPa}$

c) Material de interface

Ângulo de atrito (**s_{friction}**) = 30°

Resistência coesiva (**s_{bond}**) = 0

Rigidez cisalhante na interface (**k_{bond}**) = 10¹⁰ N/m/m.

4.3. Discretização

Para as simulações numéricas foram geradas malhas de diferenças finitas cujas dimensões dependem da altura e da configuração do aterro. Optou-se por uma discretização mais intensa na região dos reforços com o propósito de obter uma maior precisão nos resultados numéricos.

Cada camada de reforço tem 16 segmentos (elementos de cabo); as extremidades de cada reforço são fixadas aos nós da malha para simular tanto a ancoragem do reforço como sua conexão à face externa do talude.

³ Redução da rigidez à tração é necessária para considerar carregamento lento de reforços, efeitos de temperatura, fibras usadas, etc. Para geogrelhas, 50% de redução é recomendada por Lee, Holtz e Allen (1999).



Figura 4.1 – Instalação de geogrelha e colocação de material de rejeito na construção do aterro reforçado (Peru).



Figura 4.2 – Construção da etapa final do aterro reforçado com geossintéticos na barragem de rejeitos III da mina San Rafael (Peru).

Como condição de contorno, considerou-se uma restrição dos deslocamentos horizontais nos contornos laterais e de ambas as componentes de deslocamento (horizontal e vertical) no contorno inferior. A Figura 4.3 mostra o aspecto geral da geometria do aterro, das condições de contorno e da posição dos reforços (geossintéticos).

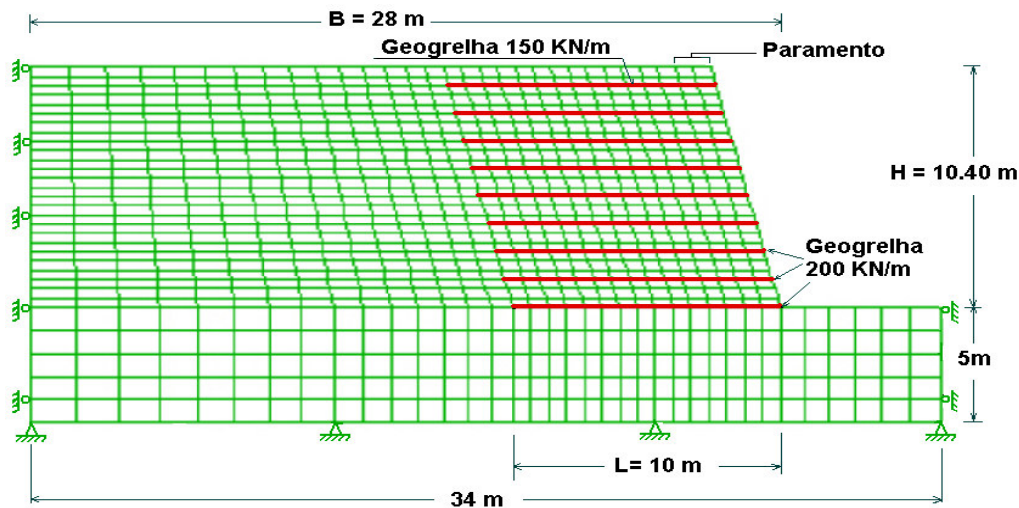


Figura 4.3 – Discretização adotada para análise estática.

4.4. Estabilidade estática do aterro

Em análises de estabilidade estática, foram determinados através do programa FLAC e do método direto de simulação do colapso (Capítulo 2), os fatores de segurança para diversas alturas de aterro, considerando-se ou não a existência de reforços.

Na Figura 4.4, o contorno da máxima velocidade de deformação cisalhante (em azul) indica a potencial superfície de ruptura enquanto que os vetores de velocidade mostram a tendência de ruptura rotacional. O fator de segurança calculado como $FS = 0.66$ evidencia que o talude de 10.40m de altura é instável, sendo imprescindível a introdução de reforço no aterro para garantir condições mínimas de estabilidade.

Em seguida, analisou-se a estabilidade do mesmo talude, mas com reforços (geossintéticos). A Figura 4.5 mostra que o aterro passa a ter comportamento estável, com fator de segurança $FS = 1.90$. Apresenta também o comportamento típico ao de um muro de gravidade, com a potencial superfície de ruptura passando abaixo da base da estrutura, como citado por Mitchell e

Villet (1987) no caso de fundação compressível. A superfície de ruptura na região não reforçada indica que a estabilidade externa constitui um aspecto importante da análise do aterro reforçado, devido aos esforços ativos exercidos pela massa de solo sobre a região reforçada. Outra observação se refere à presença de pequenas deformações de cisalhamento na zona de ancoragem dos reforços.

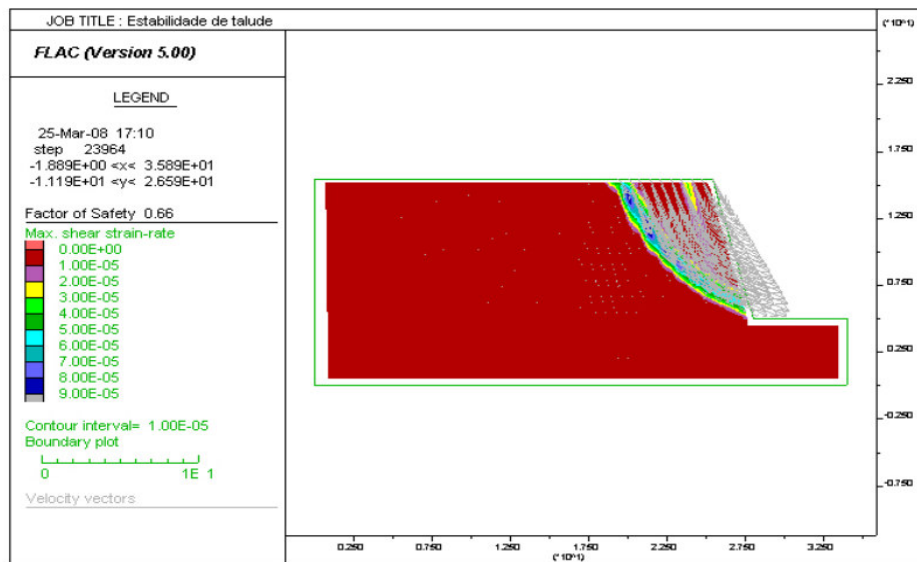


Figura 4.4 – Análise de estabilidade do aterro sem reforço - contorno da máxima velocidade de deformação cisalhante e vetores de velocidade.

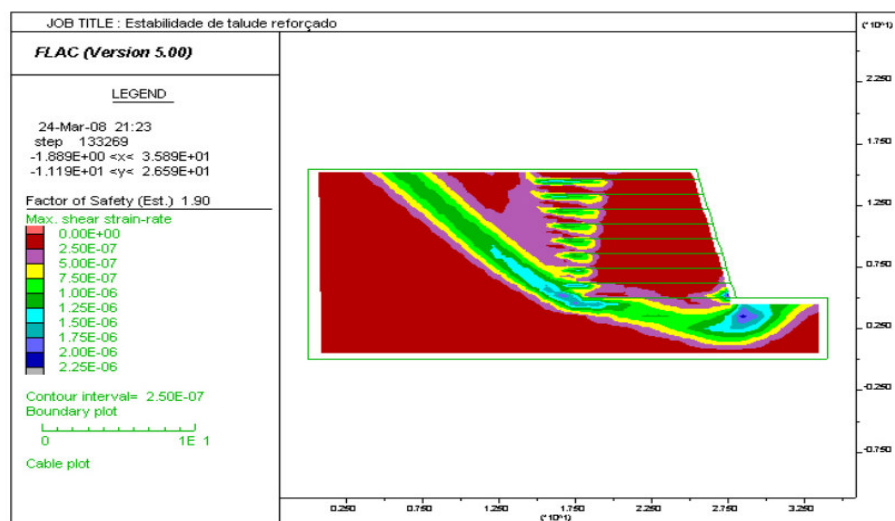


Figura 4.5 - Análise de estabilidade do aterro com reforço - contorno da máxima velocidade de deformação cisalhante.

Da Figura 4.6 pode-se observar que para ambos os casos, como esperado, há uma tendência de incremento do fator de segurança à medida que decresce a altura do talude. Nota-se que no caso do aterro sem reforço, acima de 6m de altura, já ocorre o colapso do aterro, enquanto que para o caso de aterro reforçado o talude é estimado estável até a sua altura máxima de 10.40m (FS = 1.90).

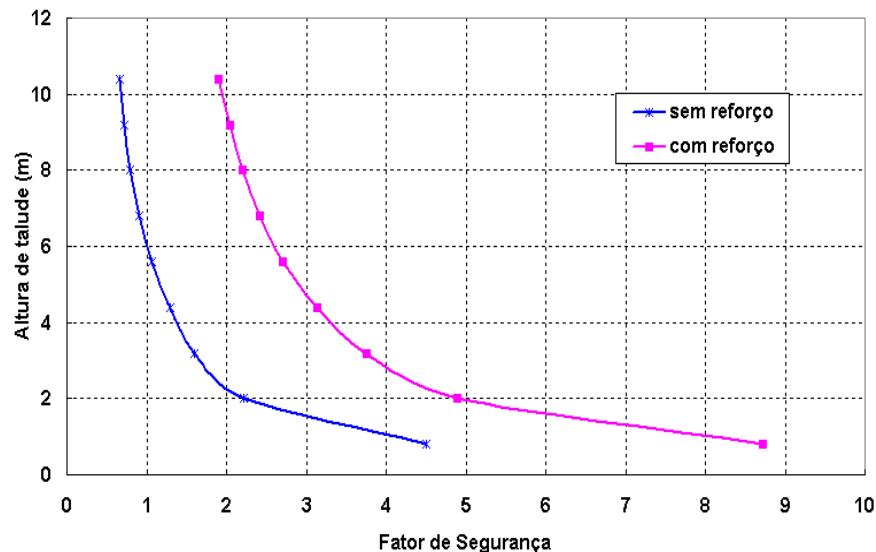


Figura 4.6 – Variação de fator de segurança com a altura do talude com e sem reforço.

4.5 Deslocamentos laterais e forças nos reforços

A Figura 4.7a mostra o gráfico de deslocamentos horizontais da face do talude, estudado com auxílio do programa FLAC na etapa final da construção. Os resultados apresentam maiores deslocamentos na região intermediária do aterro reforçado.

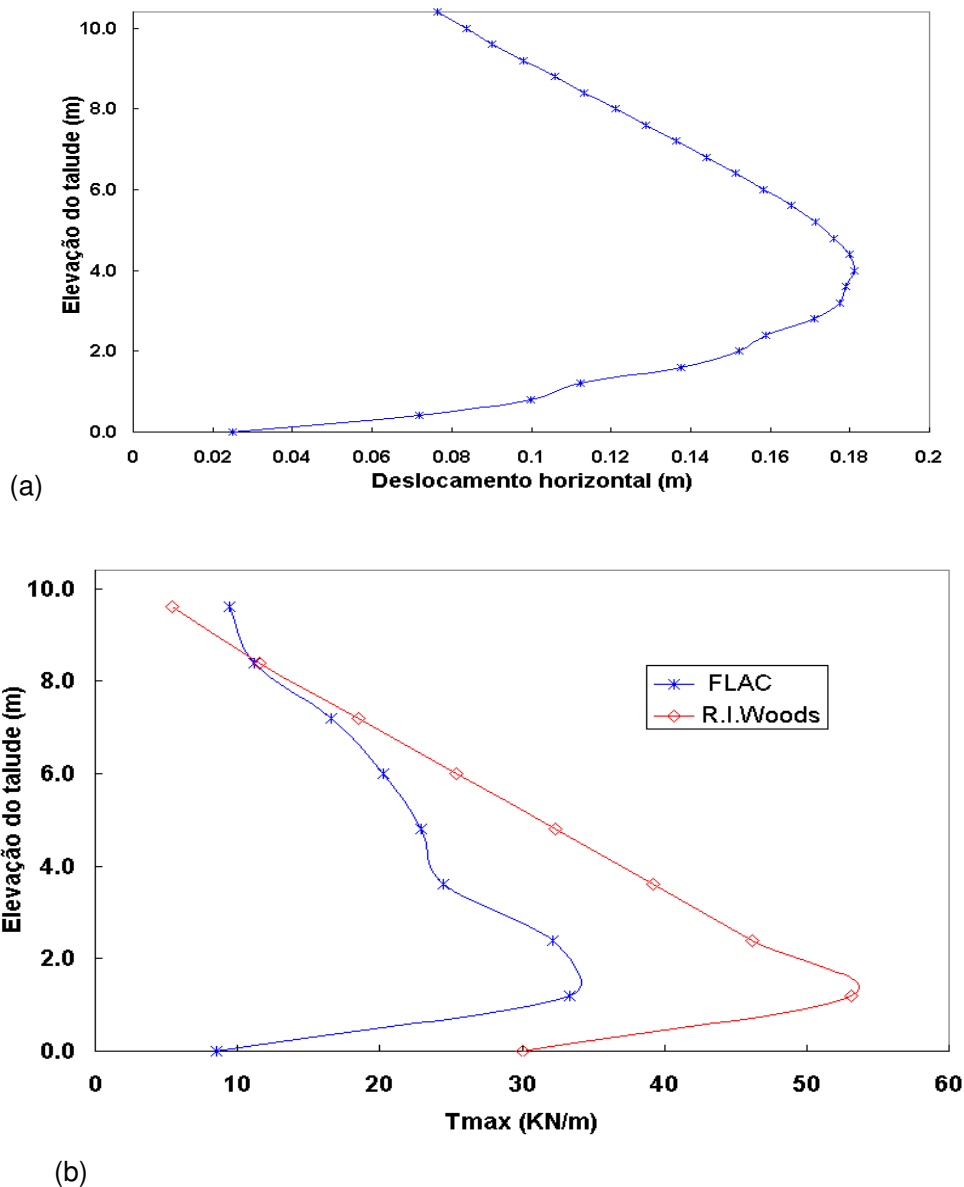


Figura 4.7 – a) Deslocamentos horizontais na face do talude (b) Tração máxima nos reforços de geossintéticos.

A Figura 4.7b apresenta as forças de tração máximas nas camadas de reforço, ao final da construção, estimadas numericamente pelo FLAC e analiticamente pelo método de Woods (1993), descrito logo abaixo, verificando-se que o método analítico proposto por Woods superestima a carga de reforço máximo porque não considera os efeitos da deformação do material.

O método de Woods permite uma estimativa da força de tração no reforço analisando-se o equilíbrio horizontal de cada camada, como indicado na Figura 4.8.

O valor da tração no reforço pode ser estimado por

$$T = S_v S_h K_o \sigma'_v \quad (4.1)$$

onde σ'_v é tensão efetiva vertical, K_o é coeficiente de empuxo (Figura 4.9), S_v e S_h são espaçamentos verticais e horizontais entre os reforços. No caso de geogrelhas S_h deve ser tomado igual a 1.

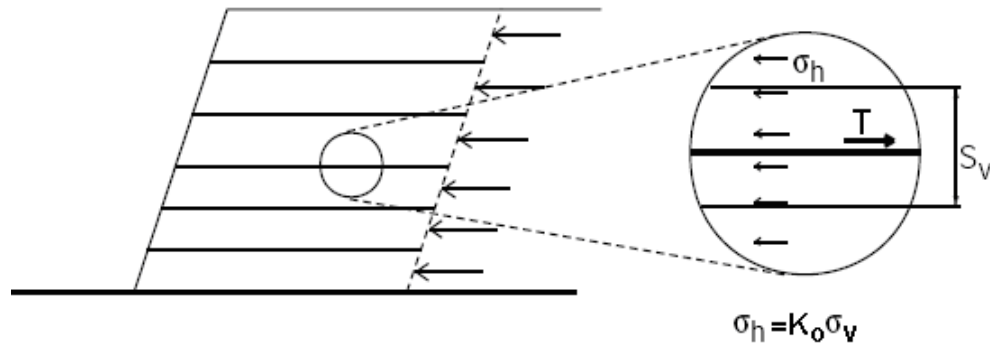


Figura 4.8 - Equilíbrio local de uma camada de reforço.

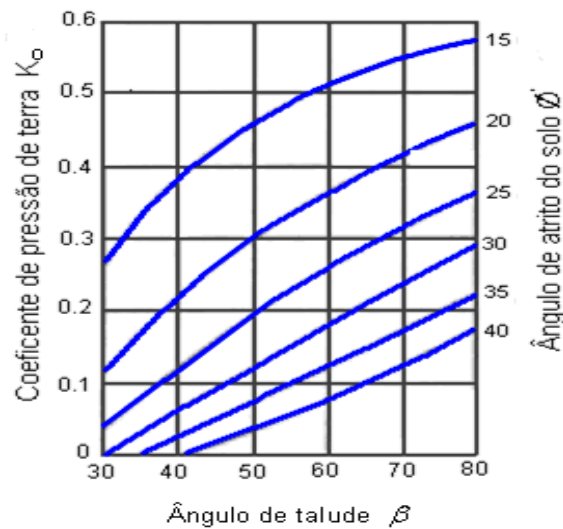


Figura 4.9 - Ábaco para projeto de taludes reforçados (R.I. Woods, 1993).