

# Projeto de Aterros Reforçados sobre Solos Moles: Determinação da Deformação de Compatibilidade Admissível no Reforço

Edwin Fernando Ruiz Blanco

Huesker Ltda., São José dos Campos, Brasil, fernando@huesker.com.br

Cristina Francischetto Schmidt

Huesker Ltda., São José dos Campos, Brasil, cristina@huesker.com.br

Ana Paula Cappadoro

Universidad Tecnológica Nacional, Santa Fé, Argentina, apcappadoro@gmail.com

**RESUMO:** O uso de geogrelhas como reforço na base de aterros construídos sobre solos moles oferece grandes vantagens sob o ponto de vista técnico e econômico, no sentido de aumentar a estabilidade da estrutura, diminuir os deslocamentos horizontais na fundação, minimizar os recalques diferenciais e otimizar o tempo e os materiais para sua construção. Um projeto adequado deve incluir a análise de vários mecanismos de ruptura e diferentes estados limite, incorporando as condições de serviço do projeto e a interação solo-reforço. A consideração deste último aspecto é fundamental para determinar o nível máximo de deformação desenvolvida no reforço, evitando estimativas incorretas na estabilidade do aterro. Com o objetivo de abordar esses aspectos e indicar recomendações gerais para projetos e especificação das propriedades relevantes do reforço geossintético, este artigo apresenta um exemplo de dimensionamento de um aterro reforçado sobre solo mole para a condição de curto prazo (final de construção). Assim, a partir dos resultados de um conjunto de simulações numéricas por elementos finitos e de análises de estabilidade por equilíbrio limite, se descreve um procedimento aproximado para a determinação da deformação admissível no reforço. Da mesma forma, algumas das implicações de se adotar uma deformação limite arbitrária para o reforço são igualmente discutidas.

**PALAVRAS-CHAVE:** aterros reforçados, geogrelha, solos moles, compatibilidade de deformações, deformação admissível.

## 1 INTRODUÇÃO

O efeito benéfico da inclusão de geossintéticos de reforço em aterros sobre solos moles, com baixa capacidade de suporte e alta deformabilidade, já foi demonstrado teórica e experimentalmente por vários pesquisadores nos últimos 50 anos (SCW, 1981).

O projeto desse tipo de estrutura deve garantir a estabilidade de todos seus componentes durante o período de construção e ao longo de sua vida útil, desenvolvendo a análise simultânea ou independente do estado limite último (ULS, em inglês) e do estado limite de servibilidade (SLS, em inglês). Como resultado desses estudos, seleciona-se o geossintético de reforço mais adequado para

atender às condições de desempenho requeridas pelo projeto.

A maioria das metodologias de cálculo normalmente adotadas baseia-se em análises de equilíbrio limite (EL) que, de maneira geral, consideram o reforço como uma força estabilizadora adicional na superfície potencial de ruptura (Rowe e Soderman, 1985). Entretanto, esses métodos não fornecem informações a respeito das deformações do aterro nem do alongamento do geossintético, desconsiderando a influência da interação solo-estrutura na mobilização de cargas no reforço e impossibilitando a adequada identificação do comportamento do sistema aterro, reforço e solo de fundação (Rowe e Soderman, 1987).

O desenvolvimento da modelação numérica por elementos finitos possibilitou estudar a importância dessa interação no desempenho de aterros reforçados, permitindo analisar a resposta completa do conjunto até sua ruptura, simular diferentes procedimentos construtivos e examinar a influência de alguns de seus componentes (por exemplo, as propriedades do geossintético). Um número importante de exemplos de sua aplicação na análise deste tipo de estruturas pode ser encontrado na literatura (Rowe e Soderman, 1985).

Apesar do enorme potencial de aplicação do método de elementos finitos (MEF), em muitas situações práticas ocorrem limitações que impedem o detalhamento do projeto com este grau de sofisticação.

Rowe e Soderman (1985) e Hinchberger e Rowe (2003) propuseram metodologias aproximadas para estimar a estabilidade de aterros reforçados na condição não drenada, incorporando a influência da interação solo-estrutura, através de análises por elementos finitos (em termos da estimativa da deformação ou alongamento do reforço), mas conservando a simplicidade e versatilidade das análises por equilíbrio limite.

Este artigo apresenta um exemplo de dimensionamento de um aterro reforçado sobre solos moles com resistência não drenada crescente com a profundidade, considerando-se algumas recomendações da norma britânica BS 8006-1 (2010). A partir dos resultados das simulações numéricas, foi determinada a deformação admissível no reforço, comparando-a com o valor obtido mediante a aplicação do método racional proposto por Hinchberger e Rowe (2003). Da mesma forma, são analisados alguns dos elementos da interação solo-estrutura, da definição de ruptura a partir de critérios de deformação e do desenvolvimento e limitação do alongamento no reforço geossintético.

## 2 CASO ESTUDADO

### 2.1 Geometria Analisada

Para o exemplo de estudo, foram consideradas

as características geométricas típicas de um aterro para fins viários. Foi definida uma largura da base de 18 m, uma altura de projeto requerida de 2,3 m, e uma inclinação para os taludes laterais de 2H:1V. Para a fundação do aterro adotou-se um perfil composto por um depósito de solo argiloso de espessura  $D = 8\text{ m}$  e por um estrato inferior de solo competente.

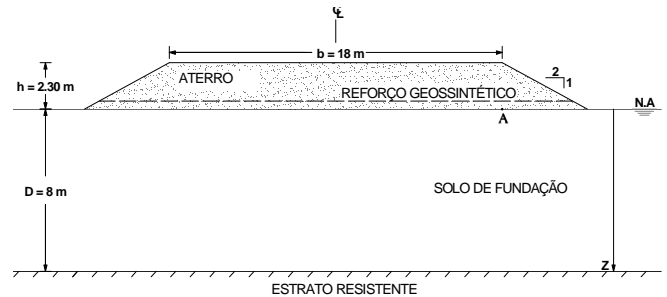


Figura 1. Geometria geral do aterro em estudo

### 2.2 Modelagem Numérica

Com o objetivo de avaliar a resposta do aterro na situação de curto prazo (ao final da construção) e estimar a deformação máxima do reforço em condições de ruptura, foram realizadas simulações com o programa de elementos finitos Plaxis.

A fundação foi modelada como um solo muito mole e compressível, com resistência não drenada crescente com a profundidade, com um valor inicial  $c_{u0}$  na superfície do terreno. Seu comportamento mecânico foi assumido como isotrópico elasto-plástico perfeito, com superfície de fluência fixa e fluxo não acoplado (modelo constitutivo de Mohr-Coulomb, Bakker et al., 1998). Da mesma forma, foi simulada uma condição não drenada, assumindo uma velocidade de construção rápida (aplicação de toda a carga do aterro em uma só etapa e sem dissipação de poro-pressão do solo mole).

O material que compõe o aterro correspondeu a um solo arenoso compactado. Esses tipos de solos apresentam características típicas de rigidez dependentes do estado de tensões, apresentando endurecimento por atrito no estado plástico. Para representar esse comportamento foi empregado para esse material o modelo Hardening Soil.

Como reforço, foi considerada uma

geogrelha (modelada com um elemento esbelto e flexível provida de rigidez axial) disposta a 0,4 m da base do aterro, variando-se os valores de módulo de rigidez à tração  $J$ .

### 2.3 Propriedades dos Materiais

Na Tabela 1 estão descritos os parâmetros básicos dos solos considerados nas simulações e nas análises, necessários para o projeto do aterro.

Tabela 1: parâmetros geotécnicos considerados

#### SOLO DE FUNDAÇÃO

Resistência de cisalhamento não-drenada ( $c_{u0}$ ): 5 kPa  
Aumento de ( $c_{u0}$ ) com a profundidade ( $\rho_c$ ): 1,5 kPa/m  
Ângulo de atrito interno total ( $\varphi$ ):  $0^\circ$   
Peso específico saturado ( $\gamma_{sat}$ ): 15 kN/m<sup>3</sup>  
Relação de Poisson não-drenada ( $\nu_u$ ): 0,48  
Módulo de Young não-drenado ( $E_u$ ):  $E_u/c_u = 125$   
Coeficiente de empuxo em repouso ( $K'_0$ ): 0,65

#### ATERRO

Ângulo de atrito interno efetivo ( $\varphi_{cv}'$ ):  $32^\circ$   
Coesão efetiva ( $c'$ ): 1 kPa  
Peso específico natural ( $\gamma$ ): 20 kN/m<sup>3</sup>  
Relação de Poisson carga/descarga ( $\nu_{ur}$ ): 0,20  
Módulo de rigidez secante triaxial ( $E_{50}$ ): 25.000 kPa  
Módulo de rigidez carga-descarga ( $E_{ur}$ ): 75.000 kPa  
Módulo de rigidez edométrico ( $E_{oed}$ ): 25.000 kPa  
Coeficiente de empuxo em repouso ( $K'_0$ ): 0,47  
Constante de Janbu ( $m$ ): 0,50

As características adotadas baseiam-se em valores representativos determinados para solos utilizados em estudos similares.

## 3 METODOLOGIA DE PROJETO

### 3.1 Considerações Preliminares

#### 3.1.1 Redução dos Parâmetros de Resistência do Solo de Fundação

O primeiro passo no procedimento de projeto de um aterro reforçado é aplicar um valor parcial conveniente de redução os parâmetros de resistência não-drenada do solo de fundação. Para o caso de aterros não reforçados, a consideração de um fator parcial  $FP = 1/1,3 = 0,77$  é equivalente a adotar um fator de segurança global de 1,3 (Hinchberger e Rowe, 2003). A utilização dessa

metodologia facilita a definição de estados limites e a análise correspondente dos resultados obtidos no dimensionamento. Para o exemplo em análise,  $c_{u0}^* = FP \times c_{u0}$  y  $\rho_c^* = FP \times \rho_c$ , para tanto tanto,  $c_{u0}^* = 3,85$  kPa,  $\rho_c^* = 1,2$  kPa / m.

#### 3.1.2 Determinação da Altura Crítica $H_c$ para Aterro Reforçado

A partir da análise de equilíbrio limite (Bishop modificado), foi estimada uma altura de ruptura para o aterro sem reforço, usando os parâmetros reduzidos para o solo de fundação (a altura crítica faz referência à altura na qual o momento atuante é igual ao momento resistente). Deste modo, foi obtida uma altura  $H_c = 1,4$  m. Sendo esta altura muito menor que a altura de projeto  $h = 2,3$  m, se estabelece a necessidade de uso do reforço.

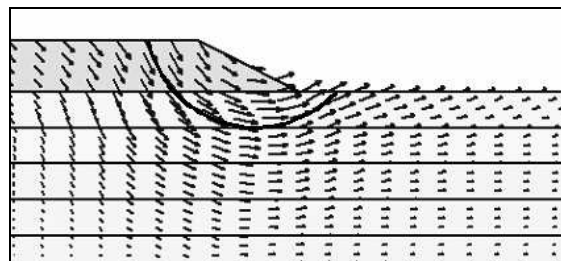


Figura 2. Mecanismo de ruptura para aterro não reforçado (Comparação MEF e LE)

A Figura 2 mostra o círculo de ruptura da análise por equilíbrio limite, em comparação com os vetores de deslocamentos obtidos mediante a modelação por elementos finitos. Os métodos de análise apresentaram altura de falha e mecanismos de ruptura similares.

#### 3.1.3 Cálculo da Altura Máxima de Colapso $H_m$ para Aterro Perfeitamente Reforçado

Mediante a aplicação da teoria da plasticidade e dos fatores de capacidade de carga propostos para sapatas e modificados para a análise de aterros, é possível determinar o limite teórico da contribuição de reforços de alta resistência na sua estabilidade. Considerando que o máximo desempenho de um aterro reforçado ocorreria se este se comportasse como uma sapata rígida (aterro perfeitamente reforçado), a altura de colapso

$H_m$  corresponde à máxima altura determinada nesta condição e calculada a partir dos parâmetros reduzidos de resistência do solo de fundação.

Com base nos procedimentos propostos e descritos em Rowe e Soderman (1987) e Almeida (1996), a altura máxima de colapso do aterro para a situação em estudo é aproximadamente  $H_m = 2,5$  m. Dado que a altura máxima  $H_m$  é superior à altura de projeto  $h$  ( $H_m > h$ ), se conclui que a altura requerida pode ser alcançada mediante a disposição de um reforço geossintético.

### 3.2 Análises de Estado Limite Último

O reforço geossintético na base deverá estabilizar a estrutura, evitando o deslizamento do material do aterro, expulsão do solo mole de fundação e a ruptura global do conjunto, oferecendo resistência à tração, capacidade de ancoragem e aderência adequadas. Cada um desses mecanismos de instabilidade se caracteriza por um estado limite último, que deve ser verificado pelo projeto.

Os procedimentos de análise propostos na norma britânica BS 8006-1 (2010) consideram a aplicação de fatores de segurança parciais para definir e avaliar estes estados limite da estrutura. De maneira geral, as cargas móveis e o peso específico do solo são majoradas, enquanto as propriedades de resistência do solo e do reforço são reduzidas. A seguir, são apresentados os principais elementos a serem considerados em cada um desses estados limites últimos de aterros reforçados (ver Figura 3), descrevendo-se os resultados obtidos para o exemplo em questão.

#### 3.2.1 Estabilidade Local

Ainda que o reforço na base não tenha influência neste mecanismo, a estabilidade local dos taludes laterais do aterro deve ser comprovada. Para solos não coesivos, compara-se a inclinação dos taludes ( $S_t$ ) com a tangente do ângulo de atrito efetivo  $\phi'_{cv}$  (para um estado de deformações a volume constante) do material de aterro.

Considerando os fatores de segurança parciais da norma BS 8006-1, para o caso em estudo se verificou uma condição de estabilidade adequada ( $S_t \leq \tan \phi'_{cv}$  ou seja  $0,5 \leq 0,62$ ).

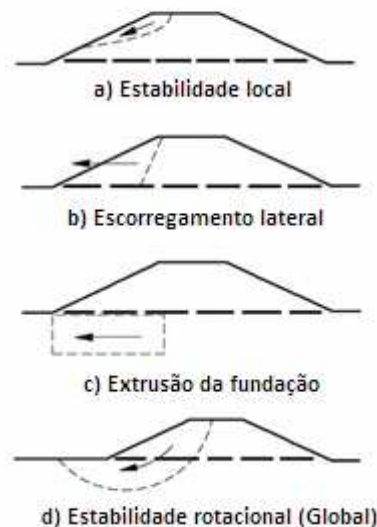


Figura 3. Estados limite últimos em aterros reforçados sobre solos moles (modificado de REF 8)

#### 3.2.2 Estabilidade Interna – Deslizamento Lateral do Material de Aterro

Para avaliar a estabilidade de possíveis mecanismos de deslizamento entre o aterro e a face superior do reforço da base, deve ser calculada a força de tração necessária na geogrelha ( $T_{ds}$ ) para resistir ao empuxo exterior do material do aterro.

Da mesma forma, deve-se calcular o comprimento mínimo de ancoragem ou aderência para o reforço ( $L_e$ ) necessário para evitar esse escorregamento horizontal.

Assumindo que a força máxima na geogrelha ocorre no alinhamento com o topo do talude e considerando novamente os fatores de segurança parciais e procedimentos da BS 8006-1, a força de tração calculada para o reforço corresponde a  $T_{ds} = 21,1$  kN/m, com um comprimento mínimo de ancoragem  $L_e = 2,34$ m.

No dimensionamento, foi considerado um valor para o coeficiente de interação da face aterro-reforço igual a  $a' = 0,90$ .

#### 3.2.3 Estabilidade da Fundação – Expulsão do Solo Mole

A configuração geométrica do aterro induz

tensões de cisalhamento na fundação, que poderiam gerar a extrusão lateral do solo mole. Para evitar o desenvolvimento deste mecanismo e a mobilização dessas tensões externas, deverá ser calculada uma largura mínima do talude  $L_s$  (distância horizontal entre o topo e o pé do talude). Da mesma forma, deverá ser garantido que as forças resistentes totais na parte superior da interface solo-reforço sejam adequadas para estabilizar os esforços laterais desenvolvidos no solo de fundação e que a geogrelha da base tenha resistência à tração suficiente para suportar as solicitações induzidas por tensões transmitidas pelo solo mole subjacente ( $T_{rf}$ ).

Assim, através de uma análise paramétrica, foi estimada uma profundidade crítica  $Z_c = 4,6$  m, indicando a profundidade potencial em que se desenvolveria o mecanismo (BS 8006-1, 2010). Foi determinada a distância mínima para evitar a expulsão do material de fundação  $L_s = 3,67$  m e a força de tração na geogrelha de reforço  $T_{rf} = 14,7$  kN/m. No estudo, foi considerado um valor para um coeficiente de interação da interface solo de fundação-reforço  $a_{bc}' = 0,80$  e uma resistência não drenada média para o estrato de fundação  $C_u = 11$  kPa.

É importante ressaltar que os comprimentos para o reforço determinados nos cálculos anteriores nunca excederam o valor limite de 4,6 m, correspondente à largura do talude, portanto, a colocação da geogrelha ao longo da base do aterro garantiria os requisitos desse item.

### 3.2.4 Estabilidade Rotacional Global / Análise de Curto Prazo

De maneira geral, no caso de aterros sobre solos moles, considera-se que o período crítico para sua estabilidade ocorre durante e ao final de sua construção. Nestas etapas, o reforço é fundamental para evitar o colapso da estrutura, pois, com o desenvolvimento do processo de consolidação, o solo de fundação incrementará sua resistência com o tempo, podendo reduzir a solicitação no reforço (Cappadoro et al., 2007).

Da mesma forma, em numerosas análises e experiências foi reconhecido que a

estabilidade global que passa através da fundação é, na maioria dos casos, o mecanismo que governa a estabilidade do aterro.

Para o caso em questão, foi desenvolvida uma análise por equilíbrio limite, através do método modificado de cunhas circulares de Bishop, considerando os parâmetros de resistência reduzidos do solo de fundação ( $c_{u0}^*$  e  $\rho_c^*$ ), com o objetivo de estabelecer a força à tração necessária ao reforço para alcançar um nível de segurança adequado. Um fator de segurança igual a 1,0 considerando os parâmetros reduzidos corresponde a um fator de segurança global de aproximadamente 1,3, sem redução dos parâmetros, conforme Figura 4.

Deste modo, a força na geogrelha calculada para uma altura de projeto  $h = 2,3$  m correspondeu a  $T_{ro} = 55$  kN/m. A Figura 4 mostra o círculo crítico de ruptura obtido na análise.

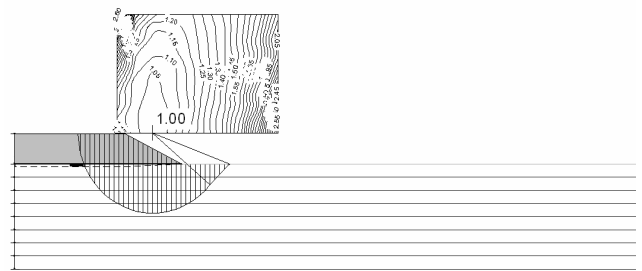


Figura 4. Análise de estabilidade global por equilíbrio limite.

Dado que o reforço deve atingir uma aderência adequada com o solo adjacente para assegurar que a força  $T_{ro}$  possa ser mobilizada, deverá ser definido comprimento mínimo de ancoragem dentro e fora da superfície potencial de ruptura.

Segundo os procedimentos descritos na norma BS 8006-1, foi verificado que um comprimento de ancoragem interna  $L_j = 8,0$  m e um comprimento de ancoragem externa  $B - L_j = 19,2$  m são suficientes para prevenir uma falha por arrancamento.

### 3.2.5 Determinação da Máxima Força de Tração do Estado Limite do Reforço

A partir das análises desenvolvidas, pode-se determinar a máxima força de tração  $T_r$  que o

reforço de base deve apresentar, escolhendo-se o maior valor entre:

- (a) a força máxima de tração solicitada para resistir ao estado limite rotacional  $T_{ro}$  ou
- (b) a soma da força máxima de tração necessária para resistir ao deslizamento lateral  $T_{ds}$  e a máxima força de tração requerida para evitar a expulsão do solo de fundação  $T_{rf}$  ( $T_{ds} + T_{rf}$ ).

No caso analisado, a força de tração máxima na geogrelha corresponde a  $T_r = 55$  kN/m.

### 3.3 Determinação da Deformação de Compatibilidade Admissível

Os mecanismos de falha examinados anteriormente correspondem a análises por equilíbrio limite, considerando o efeito do reforço como uma força estabilizante adicional, com ponto de aplicação e direção bem definidos.

Não obstante e apesar de alguns autores sugerirem que a magnitude da força no reforço depende unicamente das propriedades do geossintético (Fowler, 1982), recentemente tem sido reconhecido que a interação solo-reforço representa um papel fundamental na mobilização dessa força, pelo que seu efeito não pode ser ignorado (Rowe e Soderman, 1985).

Adicionalmente, as geogrelhas são materiais flexíveis que apresentam uma resistência que depende da deformação ou alongamento a que são submetidas. Assim, no caso de um aterro reforçado, o desenvolvimento da força de tração no reforço dependerá das deformações induzidas pelo conjunto aterro-solo de fundação e, conforme descrito anteriormente, de uma adequada aderência com o solo adjacente.

Para incorporar a influência da interação solo-reforço no projeto, Hinchberger e Rowe (2003) estabeleceram que a força no estado limite último requerida pelo projeto  $T_r$  deve ser limitada por uma determinada deformação máxima chamada deformação de compatibilidade admissível:

$$T_r = J_{\min} \cdot \varepsilon_a$$

A estimativa da deformação máxima no reforço não é um exercício trivial. Para fins de projeto, é usual adotar-se valores arbitrários e, em muitos casos, se estabelece que a resistência à tração requerida no reforço é o parâmetro único ou o mais importante na especificação do produto, desconsiderando o nível de alongamento no qual esta resistência é mobilizada.

Assim, por exemplo, aterros construídos rapidamente sobre solos argilosos muito moles podem romper por excesso de deformação muito antes que a tração última no reforço seja mobilizada (Hinchberger e Rowe, 2003).

Por outro lado, utilizando-se os parâmetros de resistência do solo de fundação reduzidos pelo fator parcial  $PF$ , pode ser modelada a situação de estado limite último (ruptura) para o aterro reforçado, usando o método dos elementos finitos para estabelecer a deformação máxima do reforço na ruptura.

O procedimento para a premissa que, se um aterro é reforçado com uma geogrelha de módulo de rigidez tão baixo como para desenvolver níveis de solicitação consideravelmente pequenos na situação de ruptura, se estabeleceria que as deformações no reforço estariam limitadas ao estado deformacional correspondente ao de um aterro sem reforço (situação não reforçada). Por consequência, no caso de um aterro reforçado, a máxima deformação gerada na geogrelha imediatamente antes da ruptura corresponderá à deformação de compatibilidade admissível  $\varepsilon_a$  (Rowe e Soderman, 1985).

Assim, para determinar esse limite para o caso em questão, foram realizadas quatro análises numéricas, considerando os seguintes módulos de rigidez  $J$  da geogrelha: 500, 800, 1.000 e 1.500 kN/m.

As Figura 5 e 6 apresentam a altura efetiva de aterro e a deformação máxima do reforço, calculadas a partir das modelagens com módulo de rigidez  $J = 500$  kN/m. A ruptura do aterro causada por excesso de deformações ocorre para uma altura total de 2,1 m, com um alongamento máximo na geogrelha de 4,1%.

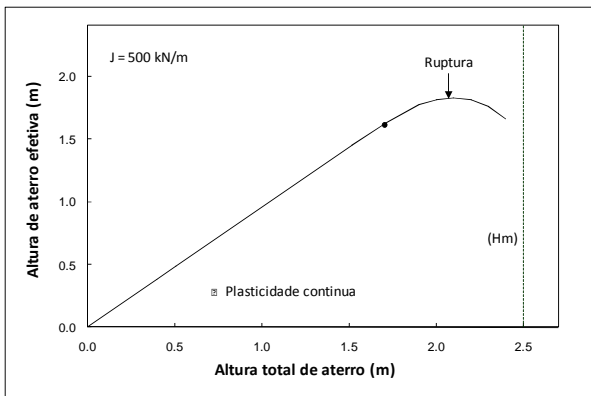


Figura 5. Altura máxima efetiva de aterro

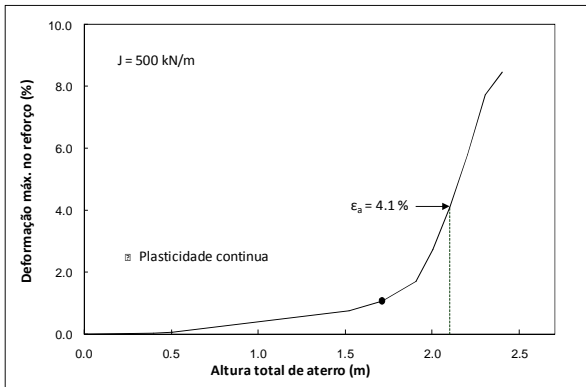


Figura 6. Estimativa da deformação de compatibilidade admissível ( $J=500$  kN/m).

Como pode ser observado, a construção do aterro acima de uma altura de 2,1 m irá afetar o desempenho do conjunto, impedindo seu alteamento com relação à superfície original do terreno. Por isso, é importante definir o nível de ruptura do aterro reforçado com a altura de construção correspondente à máxima altura efetiva alcançada (calculada a diferença entre a altura total de construção e a deflexão vertical no ponto A, ver Figura 1).

Na Figura 6 nota-se que, a partir de uma determinada altura de construção, as zonas de plastificação dentro do solo de fundação se tornam contínuas (definição de plastificação contínua ou *contiguous plasticity*), observando-se que a baixos níveis de carga (solo em estado elástico), a deformação induzida no reforço é relativamente pequena. Assim, a maior parte da deformação da geogrelha só se desenvolve a partir da geração da plastificação contínua no solo de fundação. Estabelece-se então que, para níveis de carga maiores que este limite, o reforço é o único elemento que controla a estabilidade e ruptura do aterro (Rowe e Soderman, 1985).

A definição da ruptura relacionada com as

características de deformabilidade do aterro (altura efetiva máxima) obtida para reforços com módulos de rigidez baixos, permite obter a deformação máxima desenvolvida nesse estado característico de ruptura. Na Tabela 2 e nas Figura 7 e 8 são apresentados os resultados das análises e a estimativa da deformação máxima admissível  $\epsilon_a$ .

Tabela 1. Resultados das simulações.

Módulo de rigidez J (kN/m)	Deformação do reforço na ruptura (%)
500	4,1
800	4,4
1.000	4,4
1.500	4,0

Deformação admissível de compatibilidade adotada  $\epsilon_a = 4,2\%$

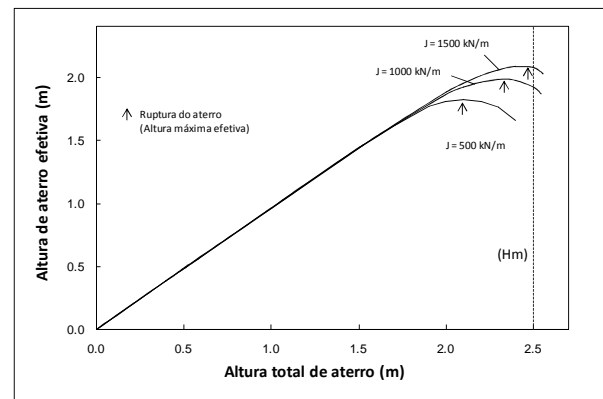


Figura 7. Determinação da altura efetiva máxima.

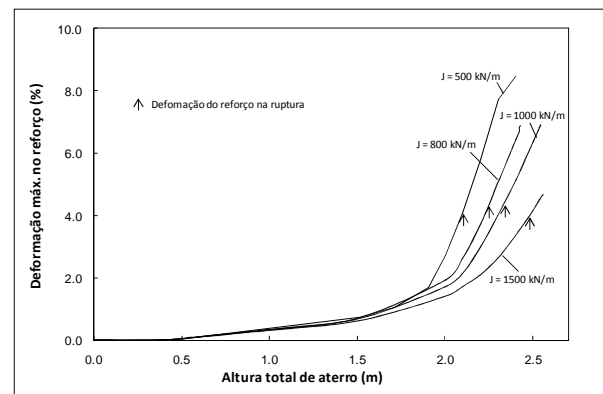


Figura 8. Cálculo da deformação desenvolvida no reforço na ruptura.

### 3.4 Propriedades Requeridas no Reforço

A partir da força de tração máxima  $T_r$  e da deformação de compatibilidade admissível estimada  $\epsilon_a$ , pode ser definido o módulo de rigidez mínimo de projeto requerido na geogrelha:  $J_{\text{mín}} = T_r / \epsilon_a = 55 \text{ kN/m} / 0,042 = 1.310 \text{ kN/m}$ .

Dessa maneira, a geogrelha de reforço a ser escolhida deverá apresentar os seguintes requisitos mínimos: a) módulo de rigidez secante mínimo de 1.310 kN/m, para deformações entre 0 e 4% e b) ser adequada para aplicações de reforço de solo.

### 3.5 Comparação com o Método Aproximado

Dada a complexidade das análises numéricas por elementos finitos, na maioria dos procedimentos práticos de projeto não é considerado tal grau de sofisticação.

Desta maneira, Hinchberg e Rowe (2003) apresentaram um método aproximado para a determinação da deformação admissível no reforço, a partir do uso de ábacos, mostrados na Figura 9.

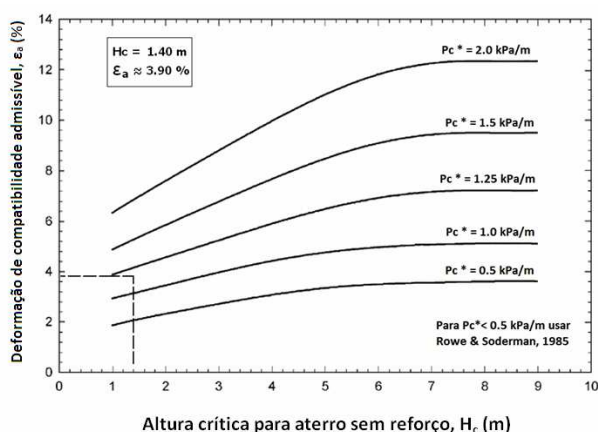


Figura 9. Gráfico de projeto para a determinação de  $\epsilon_a$  (Modificado de Hinchberger e Rowe, 2003)

A partir da altura crítica de ruptura para o caso não reforçado (3.1.2)  $H_c=1,4$  m e do acréscimo de resistência com a profundidade do solo de fundação  $\rho_c^* = 1,2$  kPa/m, foi determinada uma deformação compatível de  $\epsilon_a = 3,9\%$ . A proximidade entre as metodologias representa uma validação preliminar de sua aplicabilidade, sendo uma alternativa aproximada para o uso em projetos.

## 4 CONCLUSÕES

Foi apresentado um exemplo de projeto de um aterro reforçado sobre solos moles. O trabalho incluiu análises de vários estados limites últimos (segundo descrito em BS 8006-1), incorporando o resultado de simulações

numéricas para considerar a interação solo-estrutura em termos da deformação de compatibilidade admissível.

O método racional proposto para a estimativa desse parâmetro foi comparado com as análises numéricas efetuadas, demonstrando ser uma excelente aproximação para procedimentos de projeto simplificados.

O desenvolvimento da deformação na geogrelha foi analisado, assim como a importância significativa de sua adequada definição no projeto.

Finalmente, o módulo de rigidez mínimo para o reforço geossintético foi determinado, com base na consideração simultânea dos estados limites últimos (resistência à tração máxima no reforço e altura máxima efetiva de aterro).

## 5 REFERÊNCIAS

- Almeida, M. S. S. (1996) *Aterros sobre solos moles: da concepção à avaliação do desempenho*. Ed. UFRJ, Rio de Janeiro.
- Bakker, K.J., Bonnier, P.G., Brand, P.J.W., Burd, H.J. & Termaat, R.J. (1998) *Plaxis 2D User's Manual*.
- British Standards Group, BS 8006-1 (2010) *Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills*.
- Cappadoro, A. P., Porta, R., Turello, D. (2007) *Análisis de terraplenes reforzados con geogrietas sobre suelos blandos*. Modelación numérica.
- Fowler, J. (1982) Theoretical design considerations for fabric reinforced embankments. *Proceedings of the 2nd International Conference on Geotextiles*, No. 2.
- Hinchberger, S.D. & Rowe, R. K. (2003) Geosynthetic reinforced embankments on soft clay foundations: predicting reinforcement strains at failure, *International Journal of Geotextiles and Geomembranes*, No.21.
- Marinho de Moraes, C. (2002) *Aterros reforçados sobre solos moles – Análise numérica e analítica*, Dissertação de Mestrado, UFRJ.
- Rowe, R.K., Soderman, K.L. (1985) An approximate method for estimating the stability of geotextile reinforced embankments. *Canadian Geotechnical Journal*, No. 22.
- Rowe, R. K. & Soderman, K. L. (1987) Stabilization of very soft soils using high strength geosynthetics: the role of the finite element analyses, *International Journal of Geotextiles and Geomembranes*, No. 6.
- Study Centre for Road Construction (SCW) (1981) *Stability of slopes constructed with polyester reinforcing fabric*.