

XII COBRAMSEG

ATERROS REFORÇADOS SOBRE SOLOS MOLES – A INFLUÊNCIA DO TEMPO NOS PARÂMETROS DE PROJETO DOS MATERIAIS

André Estêvão F. da Silva¹; Delma de Mattos Vidal²

RESUMO

Em análises da estabilidade global de aterros reforçados sobre solo mole, baseadas em conceitos de equilíbrio limite, normalmente considera-se o reforço geossintético em final de vida de serviço no que diz respeito à sua resistência útil, e o solo de fundação na sua condição inicial quanto à resistência não-drenada (quando é o caso). Geralmente, no sentido de tornar a análise menos complexa, não se leva em consideração a variação gradual e paralela de ambos os parâmetros ao longo do tempo. O artigo apresenta um procedimento para análise do problema considerando este aspecto, no qual o processo de consolidação do solo mole, causa de seu ganho de resistência, é formulado pelos conceitos de consolidação unidimensional de Terzaghi, e a perda de resistência do geossintético de reforço ao longo do tempo, é definida pela caracterização de sua suscetibilidade à fluência.

ABSTRACT

Analysis of reinforced embankments on soft subsoil through methods based on limit equilibrium principles, normally considers the geosynthetic reinforcement on its final service life in terms of design strength, and the foundation soil on its initial condition with respect to its undrained shear strength (if it is the case). In general, in order to make less complex the analysis, it is not considered the gradual and parallel variation of both parameters through the time. The paper presents a basic analysis procedure for the problem taking this aspect into consideration, wherever the soft soil consolidation process, cause of its resistance increasing, is formulated through Terzaghi's concepts for one-dimensional consolidation, and the geosynthetic resistance decreasing is defined through the characterization of its susceptibility to creep phenomenon.

PALAVRAS-CHAVE: solo mole, geossintético, estabilidade

INTRODUÇÃO

O dimensionamento de geossintéticos para reforço de aterros altos sobre solos moles é tradicionalmente feito pela análise das condições limites de estabilidade da estrutura através de diversos métodos já consagrados.

A análise por tais métodos, de maneira geral, requer diversos parâmetros de entrada, entre eles, dois que são obrigatórios e representam os principais alvos do trabalho: a resistência ao cisalhamento do solo mole (resistência não-drenada no caso de solos argilosos com comportamento não-drenado) e a resistência à tração do geossintético de reforço (resistência útil ou de projeto). Estes dois parâmetros, talvez os de maior relevância no que diz respeito à magnitude dos resultados da análise, apresentam variação no tempo. O solo de fundação apresenta ganho de resistência pelo processo de adensamento e o reforço geossintético (geogrelha ou geotêxtil de elevada resistência), perda de capacidade de resistir a solicitações de tração pela sua suscetibilidade à fluência.

Tradicionalmente, em análises por equilíbrio limite, o ganho de resistência do solo não é considerado, por outro lado, a resistência de projeto do reforço é estimada pelo final do período de serviço do mesmo. Existem ainda algumas correntes que acreditam que a fluência pode ser desconsiderada em problemas de aterros sobre solo mole, uma vez que o solo de fundação deve ganhar resistência com o tempo e o reforço deixa, em poucos meses ou anos, de ser essencial na garantia de estabilidade da estrutura. A primeira situação é reconhecidamente uma prática conservadora, mas comum na análise de problemas de aterros sobre solo mole, uma vez que a torna bem facilitada. No segundo caso, erro muito grave é cometido, uma vez que a fluência de materiais poliméricos é bastante importante do ponto de vista da magnitude de sua influência sobre os parâmetros mecânicos de tais materiais, especialmente nos primeiros instantes de solicitação.

Este trabalho apresenta critérios de análise que levam em consideração a variação destes parâmetros no tempo. Através de um exemplo prático é ilustrado o procedimento proposto, no qual uma estimativa mais precisa dos parâmetros de projeto é considerada para diferentes instantes da obra. Com isso, visa possibilitar o dimensionamento do

¹ Huesker Ltda, Rua Serimbura 320 sala 15, Jd. Maringá, São José dos Campos – SP – andre@huesker.com.br

² Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos – SP – delma@infra.ita.br

geossintético segundo considerações menos conservadoras pela identificação do momento realmente mais crítico da obra. Ele complementa a discussão iniciada em [1], abordando os efeitos na variação do comportamento em fluência do geossintético.

A Figura 1 apresenta de forma qualitativa a abordagem que será apresentada.

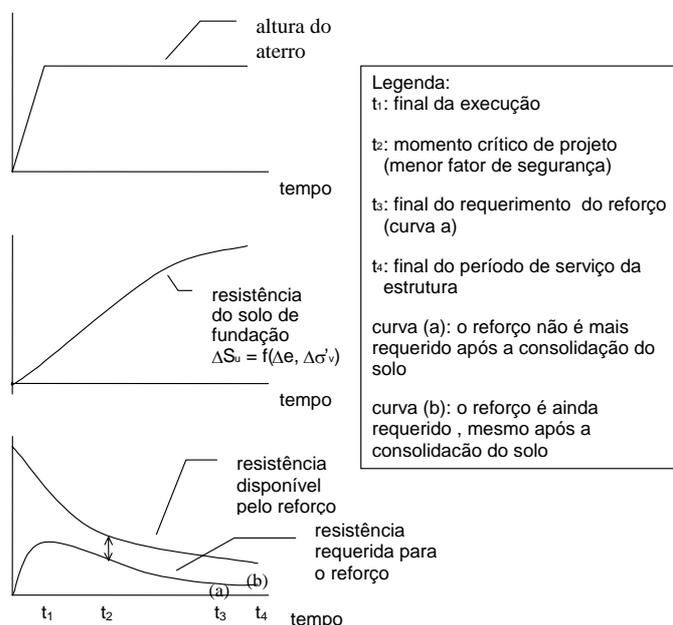


Figura 1. Representação esquemática da abordagem apresentada.

Na consideração do processo de adensamento do solo são admitidas as hipóteses e definições da teoria de Terzaghi para adensamento unidimensional [2,3]. Entretanto, são discutidos as limitações da teoria e o quanto estas afetam a validade dos critérios propostos. Na consideração da variação da resistência útil do geossintético, por sua vez, discute-se o comportamento dos materiais poliméricos de reforço em fluência, destacando a influência da temperatura e, principalmente, do tipo de polímero como matéria-prima do material no processo.

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Geogrelhas

As geogrelhas fazem parte da família dos geossintéticos (materiais poliméricos com aplicação exclusiva em obras geotécnicas) e são, neste contexto, os materiais desenvolvidos exclusivamente para desempenharem função de reforço de solos. Uma de suas aplicações mais correntes é a de reforço de base de aterros sobre solos moles com função de garantir a estabilidade da estrutura pela falta de capacidade de carga do solo de fundação.

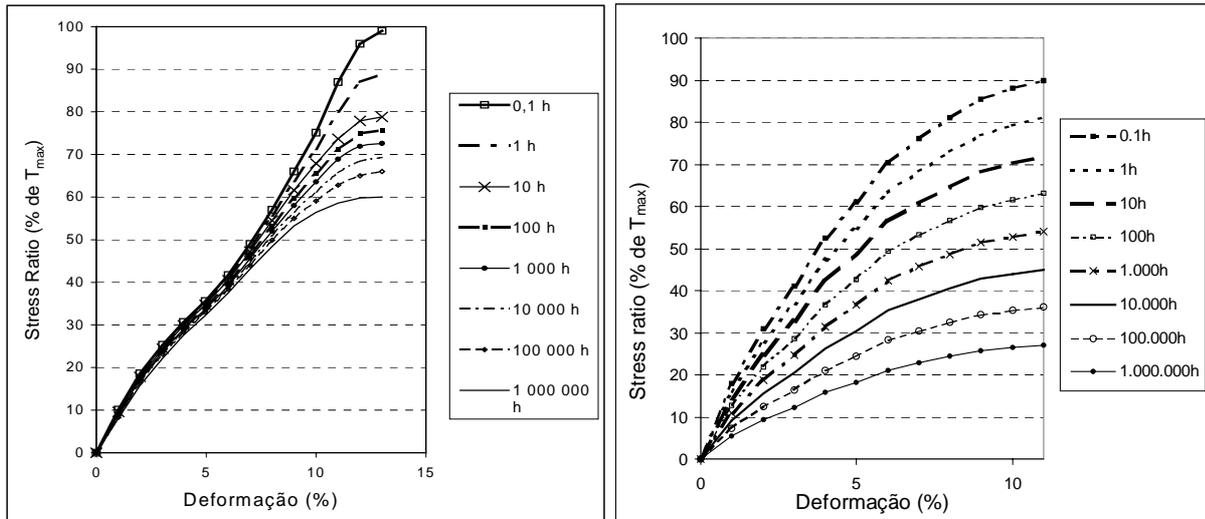
Parâmetros de resistência e deformabilidade (módulo de rigidez) em longo prazo, são, em termos de projeto, os mais importantes na caracterização das geogrelhas. As geogrelhas, por serem materiais poliméricos, são bastante suscetíveis ao fenômeno da fluência. A fluência é o fenômeno de deformação gradual do material ao longo do tempo quando solicitado por uma carga de tração permanente. Como consequência deste fenômeno, o material observa uma perda gradual de capacidade resistiva, podendo chegar à ruptura após determinado prazo pela solicitação de uma carga menor que sua resistência nominal (de ensaio de curto prazo) [4].

As geogrelhas podem ser produzidas a partir de diversos polímeros. Cada polímero apresenta um grau de suscetibilidade à fluência diferenciado. O tipo de polímero é o principal fator de influência na fluência, mas a fluência de um material sintético é também função de outros componentes e do processo adotado na indústria. Fator decisivo para a caracterização do processo de fluência é a temperatura ambiente e cada tipo de polímero apresenta um comportamento próprio diante da fluência a cada nível de temperatura.

Normalmente a caracterização da fluência para cada geossintético é feita através das chamadas curvas isócronas do material. Através de curvas tipo resistência versus deformação para diferentes períodos de carregamento contínuo tem-se o comportamento de longo prazo de cada material. As curvas isócronas são construídas a partir de ensaios normalizados de fluência (Norma ABNT em projeto, Norma ISO 13431[5]).

As Figuras 2a e 2b apresentam, respectivamente, as curvas isócronas (em termos do chamado “Stress Ratio”, Porcentagem da Resistência Máxima) de uma geogrelha de filamentos de poliéster de alta tenacidade e uma de filamentos de polipropileno, conforme informações fornecidas pelo fabricante. As análises apresentadas neste trabalho baseiam-se nestas curvas, para ambos os materiais. É importante notar que as curvas aqui apresentadas são válidas

apenas para os produtos em que se baseiam, não sendo válidas para outras marcas de produtos com descrições semelhantes.



(a) Geogrelha de filamentos de poliéster.

(b) Geogrelha de filamentos de polipropileno.

Figura 2. Curvas isócronas características das geogrelhas analisadas.

A resistência útil ou de projeto (T_{proj}) da geogrelha, para um determinado período de projeto, é, então, definida considerando-se a perda de capacidade resistiva pela fluência. Outros fatores podem provocar perda de capacidade resistiva da geogrelha e devem ser considerados na estimativa da resistência útil [4,6]:

- Danos mecânicos ou de instalação: função das condições de campo, de execução e do solo de aterro, bem como das características físicas (se possuem revestimento protetor, por exemplo) das geogrelhas;
- Danos químicos e ambientais: função da composição química do solo e das condições de exposição das geogrelhas a substâncias químicas e raios UV; função também do tipo de polímero, podendo ser, eventualmente, função da temperatura ambiente e do tempo;
- Outros, de acordo com situações específicas, como emendas, por exemplo.

Numa situação de meio ambiente não agressivo, pode-se considerar que a fluência é principal fator dependente do tempo. Além disso, é seguramente o fator de maior influência na definição da resistência útil do geossintético. É, portanto, o único fator considerado nos exemplos apresentados neste trabalho, mas outros efeitos, quando for o caso, poderiam ser acoplados de modo semelhante.

A resistência útil ou funcional da geogrelha é, portanto, definida a partir de sua resistência nominal ou característica pela aplicação de fatores de redução referentes a cada um dos fatores descritos anteriormente. A resistência nominal é a que normalmente caracteriza o material (em geral é a resistência apresentada nos catálogos) e é obtida através de ensaios normalizados (norma ABNT 12824[7], Norma ISO 10319) de resistência à tração de curto prazo. A resistência útil pode ser obtida através da seguinte equação:

$$T_d = \frac{T_{max}}{FR_f \times FR_{dm} \times FR_{amb} \times \gamma} \quad (1)$$

onde: FR_f é o fator de redução devido à fluência; FR_{dm} é o fator de redução devido a danos mecânicos; FR_{amb} é o fator de redução devido a danos ambientais e químicos; γ é o fator de segurança devido a eventuais incertezas quanto ao material e seu processo de fabricação.

Solo mole

Basicamente, defini-se como solo mole os de resistência ao cisalhamento abaixo de 50kPa [3], cabendo deixar claro que o termo está diretamente associado a solos argilosos. Por se tratarem de solos argilosos (pouco permeáveis) de baixa resistência, a análise do comportamento de solos moles como fundação de estruturas geotécnicas ou civis é importante sobre dois aspectos: adensamento/deformação e estabilidade.

O adensamento – processo vinculado à expulsão da água a partir dos vazios no interior solo - de argilas moles é normalmente um processo muito lento, uma vez que se trata de solo de baixa permeabilidade. Assim, recalques de grande magnitude podem ocorrer ao longo de um período muito extenso, resultando em grandes deformações ao longo da vida de serviço de estruturas implantadas sobre tais solos. Para fins analíticos, as características de consolidação do solo são definidas basicamente através do chamado coeficiente de adensamento do solo (c_v) e de suas derivações para situações específicas.

Para caracterização dos solos quanto à resistência, diversos modelos constitutivos podem ser utilizados, muitos passando por conceitos de materiais elasto-plásticos. O modelo de Mohr-Coulomb é o mais comumente considerado na geotecnia em análises de equilíbrio limite. Dessa forma, a resistência ao cisalhamento dos solos é caracterizada pelos parâmetros de coesão (c) e ângulo de atrito interno (ϕ).

No caso de solos moles, em situações que tratam de argilas saturadas, considera-se geralmente que o comportamento do solo sob solitação em compressão é do tipo não-drenado. Neste caso, em curto prazo, carregamentos verticais provocam variações lentas em termos de tensão efetivas, fenômeno que acompanha o processo de adensamento do solo. Para estes solos, as propostas de análise por equilíbrio limite adotam freqüentemente como parâmetro de resistência a resistência não-drenada, S_u , preferencialmente obtida através de ensaios de palheta (Vane Test).

Na análise aqui apresentada, o solo mole de fundação, assim como o solo de aterro, é um solo argiloso de comportamento não-drenado, caracterizado pelo modelo de Mohr-Coulomb [3]. No que se refere à análise de adensamento, a teoria de adensamento unidirecional de Terzaghi é considerada [2]. Discussões sobre estas considerações são apresentadas em seções posteriores.

EXEMPLO ADOTADO

Geometria

Para ilustrar o procedimento de análise aqui idealizado, considera-se um aterro hipotético a ser executado sobre um terreno de solo argiloso mole de comportamento não-drenado com 10m de profundidade. O aterro possui 4m de altura e talude com declividade 2h:1v. Foram adotadas camadas de solo drenante tanto abaixo quanto acima da de solo mole com o nível do lençol freático na superfície do terreno.

Solo mole

Foi tomado da literatura um exemplo de campo, solo típico de Sarapuú, estado do Rio de Janeiro [8]. Este exemplo foi adotado por se tratar de solo extensivamente estudado por diversos pesquisadores da COPPE/UFRJ. A Tabela 1 apresenta os parâmetros do solo de fundação relevantes para a análise de estabilidade por equilíbrio limite e a relação entre a resistência não-drenada e a tensão vertical efetiva máxima válida para o solo de Sarapuú, que foi considerada como determinante para o efeito do tempo (consolidação) sobre a resistência do solo mole:

$$S_u = 0.35 \sigma'_{vm} \quad (2)$$

Tabela 1. Parâmetros característicos do solo de Sarapuú.

Parâmetro	Unidade	Valor médio
Profundidade total	m	10*
% argila	%	50
% material orgânico	%	5.25
Peso específico seco: γ	kN/m ³	13-14
Tensão de pré-adensamento	kN/m ²	15**
Razão de compressão: $C_c/(1+e_0)$	-	0.38
C_r/C_c	-	0.12
Resistência não-drenada: S_u (vane)	kN/m ²	8 – 15**
S_u/σ'_{vm}	-	0.35
Coefficiente de consolidação: C_v	m ² /s	2.0 E-8***

* 10m foi considerado para a análise, diferentemente dos 11m publicados por [8].

** 8 kN/m² até 3m de profundidade, aumentando em função de σ' , a partir desta profundidade.

*** valor médio para o intervalo de valores publicado por [8].

Solo de aterro

Para o aterro hipotético foram considerados os seguintes parâmetros como característicos do solo coesivo compactado que o comporia:

- Peso unitário seco: $\gamma = 20\text{kN/m}^3$
- Coesão efetiva: $c' = 5\text{kN/m}^2$
- Ângulo de atrito efetivo: $\phi' = 30^\circ$

Reforço

Como materiais de reforço foram consideradas duas geogrelhas tecidas certificadas de um mesmo fabricante, produzidas a partir de matérias-primas distintas: filamentos de poliéster de alta tenacidade (GG PET) e filamentos de polipropileno de alta tenacidade (GG PP). As Figuras 2a e 2b apresentam as curvas isócronas dos dois produtos considerados. A partir destas curvas, podem-se obter as curvas de resistência de referência de cada geogrelha (Figura 3). As curvas de referência são, em outras palavras, as curvas de ruptura por fluência (resistência em função do tempo).

A partir das curvas de resistência das geogrelhas (Figura 3), tem-se definido o comportamento em fluência de cada material, ou seja, o fator de redução por fluência para cada material em cada situação. Os outros fatores de redução são aqui considerados como unitários, uma vez que não são objeto de discussão neste trabalho.

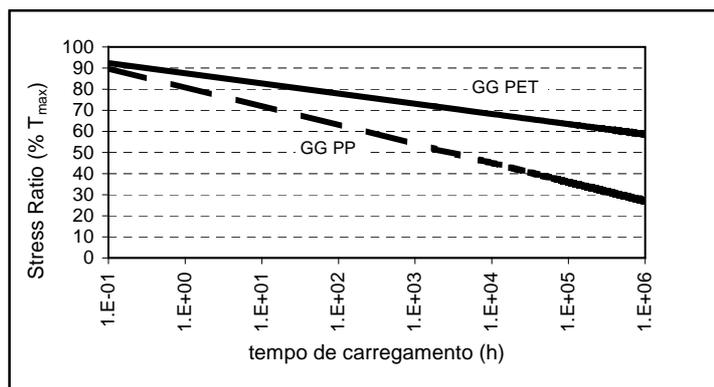


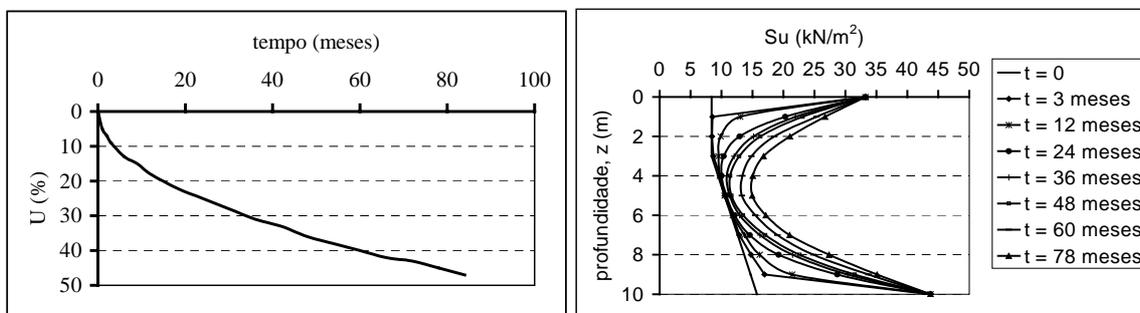
Figura 3. Curvas de resistência em função do tempo das geogrelhas consideradas.

ANÁLISE DE CONSOLIDAÇÃO DO SOLO MOLE

O solo de Sarapuí, para a presente análise, foi considerado inicialmente saturado com comportamento não-drenado, com 10m de profundidade assente sobre camada de solo drenante. A construção do aterro, para fins de simplificação da análise, foi considerada como se ocorresse instantaneamente. Também foi considerado um colchão drenante de areia na base do aterro, consistindo numa camada drenante diretamente acima da de solo adensável.

A análise de consolidação do solo mole foi feita segundo os princípios da Teoria de Terzaghi para adensamento unidirecional. A Figura 4 apresenta os resultados da análise de adensamento: a Figura 4a apresenta a evolução da condição de adensamento do solo em termos de porcentagem de adensamento (U) segundo a análise feita, de acordo com as hipóteses descritas, e a Figura 4b, a evolução da resistência não-drenada (S_u) do solo mole em função do progresso da consolidação.

A análise pela formulação de Terzaghi apontou um recalque total de 2,04m e 90% da consolidação ocorrendo em 409 meses.



(a) Porcentagem de consolidação do solo mole.

(b) Resistência não-drenada do solo mole.

Figura 4. Resultados da análise de consolidação do solo mole.

ANÁLISE DE ESTABILIDADE

A análise de estabilidade foi feita segundo conceitos de análise de equilíbrio limite. Foi utilizado o programa alemão GGU-Slope [9], desenvolvido especificamente para análise de estabilidade de aterros e taludes, inclusive fundados sobre solo mole. A análise foi feita através do tradicional Método de Bishop Simplificado [2], que considera cunha de ruptura circular. Não houve preocupação em se fazer outras análises (o programa apresenta outras quatro possibilidade de métodos de análise) uma vez que o foco do trabalho é apenas apresentar uma análise comparativa com fins exclusivamente acadêmicos.

Um dos recursos disponíveis pelo pacote é justamente a análise de aterros reforçados com geossintéticos. O programa GGU-Slope exige, como parâmetros de caracterização dos diversos solos envolvidos, o peso específico e os parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb (coesão e ângulo de atrito efetivos). Para o solo mole, entra-se apenas com a coesão e, indicando-se que este se encontra abaixo do nível do lençol, o programa o considera como um material de comportamento não-drenado. A camada de solo mole pode ser estratificada horizontal e verticalmente, permitindo a

variação no valor de resistência com a profundidade e com a posição em relação ao aterro. Para o reforço geossintético, o programa pede parâmetros de resistência útil (Equação 1) e de interação com o solo.

Foram feitas análises de estabilidade considerando ambas as geogrelhas para os instantes: 0,1, 2, 3, 6, 9, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 54, 60, 66, 72, 78 meses. No exemplo adotado, após 78 meses o reforço não seria mais necessário para garantir a estabilidade da estrutura, em função da resistência adquirida pelo solo. A resistência não-drenada (S_u), em função do tempo, é calculada pela equação 2 para cada instante analisado. A tensão vertical efetiva (σ'_{vm}) é obtida pela análise de adensamento segundo os conceitos de Terzaghi, para uma carga equivalente ao aterro de 4m de altura, sendo que, na região de talude considerou-se uma carga equivalente a um aterro de 2m de altura. Esta última hipótese é uma prática comum; um maior seccionamento nesta região pode levar a uma melhor aproximação.

A Figura 5 apresenta os resultados obtidos para a análise de condição limite (“Ultimate Limit State”, ULS). As análises foram feitas com base na resistência de projeto (T_d) de cada geogrelha, e os resultados são apresentados na Figura 5 em termos da resistência nominal (T_{max} , segundo a Equação 1) de cada geogrelha, necessária para a mobilização da resistência requerida em cada instante. Para cada geogrelha, os fatores de redução por fluência são obtidos com base nas curvas apresentadas na Figura 3.

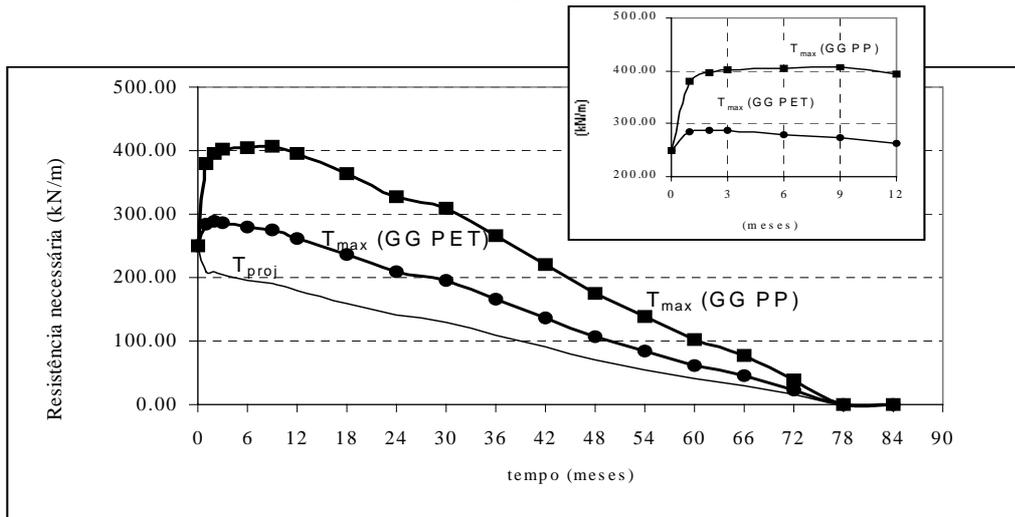


Figura 5. Análise de condição limite para fatores de segurança unitários.

A partir dos resultados apresentados na Figura 5 (detalhe) foi possível localizar o instante mais crítico em termos da resistência nominal de cada geogrelha. Em outras palavras, quando (em que momento da vida de serviço da estrutura e do período de serviço do reforço) ocorreria a necessidade da geogrelha de maior resistência nominal e qual seria o valor desta resistência em cada caso.

Em termos de análise de condição limite (resistência à tração da geogrelha no nível de ruptura), para a geogrelha de poliéster, o instante crítico foi o terceiro mês de serviço, enquanto para a geogrelha de polipropileno foi o nono mês. É importante lembrar que, para fins de simplificação da análise, o período de construção do aterro não foi considerado, sendo o instante correspondente ao fim da construção do aterro considerado o inicial tanto para a análise de adensamento quanto para a de estabilidade e de serviço do reforço.

A Tabela 2 apresenta os resultados (em termos de pré-dimensionamento do reforço) da análise de condição limite para o momento crítico para cada geogrelha, segundo dois princípios:

- o procedimento aqui identificado como “Procedimento Idealizado” que considera a evolução das resistências do solo mole e do reforço ao longo do tempo, e o dimensionamento é feito para o instante crítico - situação (A);
- o procedimento aqui chamado “Procedimento Tradicional” que não leva em conta o ganho de resistência do solo mole na análise de estabilidade, onde duas situações podem ser consideradas: a resistência de projeto do reforço é estimada para um período equivalente a 90% do adensamento do solo mole [10], situação (B), ou para um período equivalente ao final da vida de serviço do reforço (C);

Tabela 2. Resultados de dimensionamento (para fatores de segurança unitários).

		Procedimento Idealizado		Procedimento Tradicional	
		(A)	(B)	(C)	
GG PET	T_{max} (kN/m)	288	365	376	
	Comparação (%)	100	127	131	
GG PP	T_{max} (kN/m)	406	654	786	
	Comparação (%)	100	161	194	

(A) para 3 meses (GG PET) e 9 meses (GG PP) de período de serviço do reforço.

(B) para 78 meses (GG PET e GG PP) de período de serviço do reforço.

(C) para 409 meses (GG PET e GG PP), 90% da consolidação do solo mole.

Vale destacar também os valores dos fatores de redução para cada instante analisado (Tabela 2) válidos para cada geogrelha considerada, valores estes apresentados na Tabela 3.

As análises de estabilidade apresentadas foram feitas para fatores de segurança global e parciais unitários, uma vez que o objetivo era apenas a identificação do instante crítico para definição da geogrelha necessária. Para projeto, as análises devem se basear em normas e publicações específicas (BS 8006 [11], por exemplo) que trazem recomendações a respeito de procedimentos e parâmetros a serem considerados.

Tabela 3. Fatores de redução válidos para as geogrelhas analisadas.

	Procedimento	Procedimento	
	Idealizado	Tradicional	
	(A)	(B)	(C)
FR _{fl} (GG PET)	1,37	1,54	1,63
FR _{fl} (GG PP)	1,93	2,62	3,14

(A) para 3 meses (GG PET) e 9 meses (GG PP) de período de serviço do reforço.

(B) para 78 meses (GG PET e GG PP) de período de serviço do reforço.

(C) para 409 meses (GG PET e GG PP), 90% da consolidação do solo mole.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

É interessante notar que o momento crítico para a definição do reforço requerido não é, necessariamente, o instante inicial onde o solo mole apresenta sua condição de mais baixa resistência e nenhuma perda de resistência por fluência é ainda considerada; tampouco é necessariamente o final de sua vida de serviço. Em outra análise, vale notar que o instante crítico não é necessariamente o mesmo para ambas as geogrelhas consideradas.

A definição deste instante depende ao mesmo tempo do ganho de resistência do solo de fundação e da perda de resistência do reforço por fluência. Ambos são processos que dependem do tempo e a velocidade de ocorrência de cada processo é importante. Esta, por sua vez, depende das características e condições dos materiais, solo de fundação e reforço geossintético; e, no caso deste último, principalmente do tipo de polímero que o constitui.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 2 (ULS), fica claro que os procedimentos tradicionais (B) e (C) são realmente mais conservadores. Através do procedimento idealizado (A), obtém-se um ganho significativo no que diz respeito ao reforço necessário. Neste caso, a aplicação de procedimento tradicional resultou na definição de uma geogrelha de poliéster 27% ou 31% mais resistente que no procedimento idealizado; para a geogrelha de polipropileno, a resistência calculada pelo procedimento tradicional foi 61% ou 94% maior.

É interessante notar que a diferença entre os resultados através da aplicação dos procedimentos (B) e (C) é menos significativa, especialmente no caso da geogrelha de poliéster, que entre estes e o procedimento (A). Isto se deve ao fato de que a fluência é um fenômeno que ocorre com maior intensidade nos primeiros instantes de solicitação, consequentemente nestes primeiros instantes a velocidade da perda de resistência útil dos materiais geossintéticos é maior. Isto pode ser verificado pelas curvas apresentadas na Figura 4: a perda de resistência das geogrelhas poliméricas é linear em escala logarítmica.

COMENTÁRIOS ADICIONAIS

A aplicação da teoria de Terzaghi não é a mais apropriada para a análise de adensamento em situações similares à estudada. Os conceitos de Terzaghi são diretamente voltados para uma situação de adensamento unidirecional (o movimento de percolação de água é também unidirecional) numa condição de carregamento uniforme e infinito. O aterro não corresponde a uma carga infinita e é de se prever que o adensamento ocorra com dissipação de poro-pressão pela percolação de água também na horizontal, buscando a região de talude e os limites laterais do aterro, após os quais não há carregamento. Este aspecto pode ser facilmente verificado tanto em campo através de obras instrumentadas quanto em simulação através de programas de elementos finitos. De qualquer maneira, a teoria de Terzaghi permite a obtenção de resultados através de análises pouco complexas, e certamente a favor da segurança, uma vez que é de se esperar que o adensamento, consequentemente o ganho de resistência do solo mole, ocorra de forma mais rápida numa condição mais realística.

Um dos focos da análise apresentada foi comparar os resultados obtidos através da consideração de duas geogrelhas produzidas a partir de polímeros distintos. Os desempenhos de tais produtos mostraram-se realmente diferentes, uma vez que polímeros distintos apresentam níveis de sensibilidade à fluência distintos. Também os processos de fabricação e a temperatura ambiente são fatores que influenciam o desempenho dos materiais.

É importante destacar que as análises apresentadas são válidas também para outros materiais geossintéticos de reforço (tecidos de alta resistência, por exemplo). No entanto, é importante a adequação destes materiais ao procedimento apresentado em termos dos parâmetros de caracterização dos mesmos: parâmetros de resistência e de deformação, de suscetibilidade à fluência e de interação com o solo.

Vale destacar também, uma vez mais, que as análises realizadas tinham um caráter exclusivamente acadêmico e comparativo. Dessa forma, lançou-se mão de alguns valores tanto para fatores de redução da resistência dos reforços

quanto para fatores de segurança que normalmente não são recomendáveis para projeto. Além disso, a estrutura aqui analisada é hipotética e não há nenhuma base de comparação com eventuais projetos em situações semelhantes.

Outro aspecto: mesmo após o período de requerimento de reforço de acordo com análises de estabilidade (78 meses no caso aqui apresentado), o reforço continua mobilizado. Alguns trabalhos apresentam discussões e constatações a este respeito [12], de onde se pode afirmar que o reforço continua trabalhando no sentido de garantir a restrição de deformações e recalques do aterro (garantia de servicibilidade). Este também é um aspecto que pode ser observado em simulações através de programas de elementos finitos[1]. Parâmetros de rigidez do reforço (deformações compatíveis com as do solo) são os parâmetros a serem analisados neste caso.

CONCLUSÕES

A partir das análises feitas e dos resultados obtidos, algumas conclusões podem ser apresentadas a respeito da análise de aterros sobre solos moles reforçados com geogrelhas:

- O processo de consolidação do solo mole resulta em um ganho significativo (Figura 4b) da resistência do solo de fundação, e este ganho é, por sua vez, significativo na otimização do dimensionamento do reforço necessário para garantia de estabilidade da estrutura (Tabela 2).
- A fluência é um fenômeno que de fato tem grande influência sobre a resistência de projeto da geogrelha (Figuras 2 e 3), principalmente nos primeiros instantes de solicitação.
- Geossintéticos produzidos a partir de polímeros distintos apresentam níveis distintos de sensibilidade à fluência (Figuras 2 e 3), sendo este um aspecto de grande importância no que concerne ao dimensionamento e à especificação do produto.
- O procedimento apresentado (aqui chamado “Procedimento Idealizado”) realmente deve trazer ganho no que diz respeito à definição da necessidade de um material de reforço de menor resistência nominal (Tabela 2), conseqüentemente, de menor custo, uma vez que se trata de um procedimento menos conservativo que o aqui identificado como “Tradicional”, no entanto, não menos acurado tecnicamente.
- Uma vez que o Procedimento Idealizado exige uma análise prévia do processo de adensamento do solo de fundação, e o conhecimento de parâmetros que o caracterizam quanto a sua condição de adensabilidade. Os ganhos representados por uma análise deste tipo podem justificar, de forma geral, maiores investimentos na investigação geotécnica previamente ao projeto de obras desta natureza.
- Obras de aterro reforçado sobre solo mole, em geral exigem geossintéticos de elevada resistência à tração como materiais de reforço. Neste caso, deve-se trabalhar com geogrelhas e tecidos que tenham capacidade de mobilizar elevados níveis de resistência, a longo prazo, e a níveis de deformação compatíveis com o comportamento da estrutura (aterro).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Vidal, D., Silva, A.E., Queiroz, P.I.B. Design Of Geosynthetic Reinforcement for Embankments on Soft Soil Considering the Strength Increasing of the Foundation Soil because of the Consolidation, *XI Inter. Conf. On Geosynthetics*, Nice, França, 22-27 set, 2002.
- [2] Lambe, T. W. & Whitman, R.V. Soil Mechanics. *John Wiley and Sons*, 1979.
- [3] Pinto, C. S. Curso básico de mecânica dos solos, *Oficina de Textos*, São Paulo, Brasil, 2000.
- [4] Koerner, R. M. Designing with geosynthetics, Fourth Edition, Prentice Hall, New Jersey, EUA, 1998.
- [5] ISO 13431 Determination of tensile creep and creep rupture behaviour, *Inter. Stand. Org.*, 1999.
- [6] Vidal, D. M.; Fabrin, T. W.; Montez, F. T. O conceito de fatores de redução aplicados às propriedades dos geossintéticos. *1º SSAG-Simp Sul Americano de Geos./3SBG - 3º Simp. Bras. de Geossintéticos*, Rio de Janeiro, pp. 189-198, 1999.
- [7] NBR 12824 Geotêxteis – Determinação da resistência à tração não confinada – Ensaio de faixa larga, *Assoc. Bras. de Normas Técnicas*, 1993.
- [8] Lacerda, W. & Almeida, M. Engineering properties of regional soils: residual soils and soft clays. *X Congresso Panamericano de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Cidade do México, México, pp.1-44, 1995.
- [9] Buß, Johann. GGU-Slope 6,04 Slope failure calculations with circular and polygon slip planes, *Braunschweig, German*, 1999.
- [10] Jewell, R. A. Soil reinforcement with geotextiles, *Ciria*, Londres, Inglaterra, 1996.
- [11] BS 8006. Code of practice for strengthened / reinforced soils and other fills, Grã-Bretanha, 1995.
- [12] Alexiew, D., Blume, K. H. German long-term experience with reinforced embankments on soft subsoil: performance and durability. *XI Congresso Panamericano de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Foz do Iguaçu, Brasil, 1999.