

# DIMENSIONAMENTO E VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA DE TALUDES DE ATERRO REFORÇADOS COM GEOTÊXTEIS

Design and safety analysis of embankment slopes reinforced by geotextiles

por

AFONSO C. MARQUES\*

RUI M. CORREIA\*\*

**RESUMO** — O artigo incide na aplicação de geotêxteis como elementos de reforço interno de obras de aterro. São focados aspectos relativos às propriedades dos geotêxteis, ao mecanismo de interacção solo-reforço e aos métodos de análise e critérios de segurança destas obras. São descritos os fundamentos teóricos de dois programas de cálculo automático que permitem efectuar a verificação da segurança e o dimensionamento de taludes de aterro reforçados com geotêxteis. Os programas, que se baseiam em análises por equilíbrio limite, foram utilizados na realização de um estudo de avaliação da influência de alguns parâmetros de projecto na segurança e economia das obras.

**SYNOPSIS** — The application of geotextiles as a means of internal reinforcement of embankment earth slopes is dealt with. Aspects such as the properties of geotextiles, the mechanism of soil-reinforcement interaction and the methods of analysis and safety criteria for this type of earth structures are discussed. The theoretical principles of two computer programs for the stability analysis and design of geotextile reinforced embankment slopes are presented. The programs, which are based on limit equilibrium analyses, were used in a parametric study aiming at the evaluation of the influence of some design parameters upon the safety and economy of a reinforced soil structure.

## 1 — INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a utilização de geotêxteis e produtos similares em obras geotécnicas (barragens e outras obras de aterro, taludes, obras de suporte, estradas, canais, etc.) tem aumentado de forma significativa. De uma forma geral, pode-se dizer que o crescente emprego destes produtos teve como base aspectos económicos, relacionados com o baixo custo do material e com a simplicidade das técnicas construtivas, e também aspectos técnicos, uma vez que as características específicas dos geotêxteis permitiram o melhoramento e inovação de soluções de projecto e de construção.

Actualmente a utilização de geosintéticos e produtos similares (geogrelhas, georedes, etc.) constitui uma disciplina bem individualizada no âmbito da engenharia geotécnica, o que pode

---

\* Engenheiro civil, ex-estagiário no LNEC

\*\* Engenheiro civil, Investigador Principal do LNEC

ser constatado pelo elevado número de artigos, comunicações e dissertações que incidem sobre esse tema e pela realização, com carácter regular, de conferências internacionais a ele dedicadas exclusivamente.

Os geotêxteis são produtos planares, permeáveis e flexíveis, obtidos a partir de fibras sintéticas ou naturais. Segundo o processo de fabrico, dividem-se em tecidos, não-tecidos e enlaçados. Podem desempenhar diversas funções no solo, designadamente as de separação, drenagem, filtragem e reforço (Koerner, 1986).

As obras de aterro de solo reforçadas internamente com geotêxteis (taludes, sistemas de suporte, etc.) possuem paramentos verticais ou inclinados e múltiplas camadas de reforço dispostas no interior do aterro (Fig. 1). Os próprios geotêxteis são utilizados para revestir o paramento, conseguindo-se assim conter pequenos escorregamentos e erosões superficiais. O revestimento de geotêxtil é geralmente coberto por asfalto, betão projectado, alvenaria, solo com vegetação, etc., com o objectivo de evitar os efeitos detrimenais da exposição aos raios ultravioleta. O aterro propriamente dito é constituído por material granular (areia siltosa a cascalho grosseiro) ou coesivo, compactado por camadas.

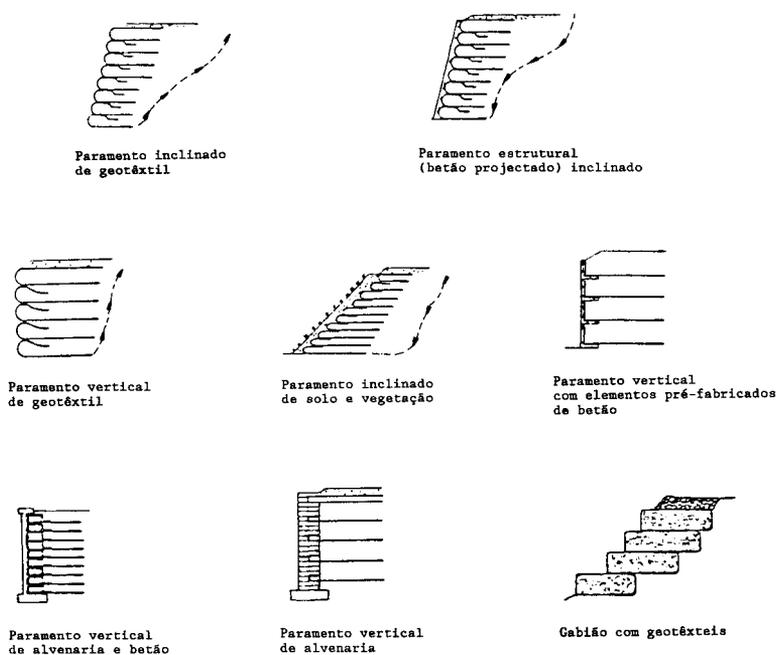


Fig. 1 — Exemplos de obras de solo reforçado com geotêxteis (Mitchell e Villet, 1987)

Apesar da crescente aplicação de geotêxteis em obras geotécnicas, muitas lacunas, relativamente aos aspectos técnicos da sua utilização como elementos de reforço, ainda se encontram por preencher, designadamente no que se refere à interacção mecânica com o solo, ao comportamento a longo prazo, às metodologias de ensaio e aos métodos de dimensionamento das obras em que são inseridos.

Este artigo incide na aplicação de geotêxteis como elementos de reforço interno de aterros de solo, sendo focados aspectos relacionados com as propriedades do material e com o projecto das obras. São descritos os fundamentos teóricos de dois programas de cálculo automático, baseados em análises por equilíbrio limite, destinados um à verificação da segurança e outro ao dimensionamento de maciços de aterro reforçados com geotêxteis. São também apresentados os principais resultados de análises paramétricas efectuadas com base na utilização desses dois programas.

## 2 — PROPRIEDADES DOS GEOTÊXTEIS CONDICIONANTES DA SUA APLICAÇÃO COMO ELEMENTOS DE REFORÇO

Para as aplicações como reforço de terrenos, as principais propriedades dos geotêxteis dizem respeito ao comportamento mecânico e à durabilidade.

Quanto ao comportamento mecânico, há a considerar as propriedades intrínsecas e as propriedades que têm a ver com a interacção solo-reforço. No grupo das primeiras incluem-se a deformabilidade e a resistência do material, podendo ambas ser avaliadas através de um ensaio à tracção, que consiste basicamente em submeter uma amostra rectangular a forças crescentes de tracção uniaxial, registando-se as deformações resultantes até à ocorrência da ruptura. Quer a resistência quer a deformabilidade dependem de uma série de factores, tais como: propriedades dos polímeros que constituem os geotêxteis, processo de fabrico, direcção da força aplicada, geometria da amostra, velocidade de deformação do ensaio, temperatura e confinamento (Marques, 1991).

É importante salientar que os geotêxteis são materiais cujo comportamento mecânico é fortemente dependente do tempo. Os efeitos de fluência devem pois ser quantificados, já que podem influenciar significativamente a mobilização de tracções e deformações nos reforços. Numa situação ideal, as características mecânicas dos geotêxteis deveriam ser obtidas a partir de ensaios a longo prazo com amostras confinadas em solo. Infelizmente, esta situação normalmente não ocorre, sendo necessárias certas extrapolações e/ou utilização de elevados coeficientes de segurança, por forma a ter em consideração estes efeitos.

No que diz respeito à interacção com o solo, a propriedade essencial do geotêxtil é a resistência ao deslizamento nas superfícies de contacto. Esta resistência pode ser mobilizada pelo atrito entre o solo e o geotêxtil e também pela interpenetração das partículas de solo, quando estas forem menores que as aberturas do geotêxtil. A interacção solo-reforço depende pois da rugosidade do geotêxtil, da tensão normal efectiva actuante sobre o mesmo, da dimensão das aberturas e ainda das características de atrito interno do solo.

A resistência ao deslizamento pode ser avaliada a partir de ensaios de corte directo ou de ensaios de arrancamento (Fig. 2). Devido à elevada extensibilidade dos geotêxteis quando submetidos a esforços de tracção, alguns autores recomendam a utilização do ensaio de corte directo para a obtenção de elementos de projecto.

Uma outra importante propriedade dos geotêxteis deve ser avaliada; trata-se da sua maior ou menor susceptibilidade à deterioração das características mecânicas após longos períodos de inserção nos terrenos, seja por acção química e biológica, seja por acção mecânica secundária

(abrasão, punçoamento, rasgamento, etc.). Materiais com deficientes características de durabilidade podem sofrer importantes reduções de resistência ao longo da vida útil da obra onde se inserem; tal efeito, quando não previsto na fase de projecto, redundará inevitavelmente em prejuízo das condições de segurança dessa mesma obra.

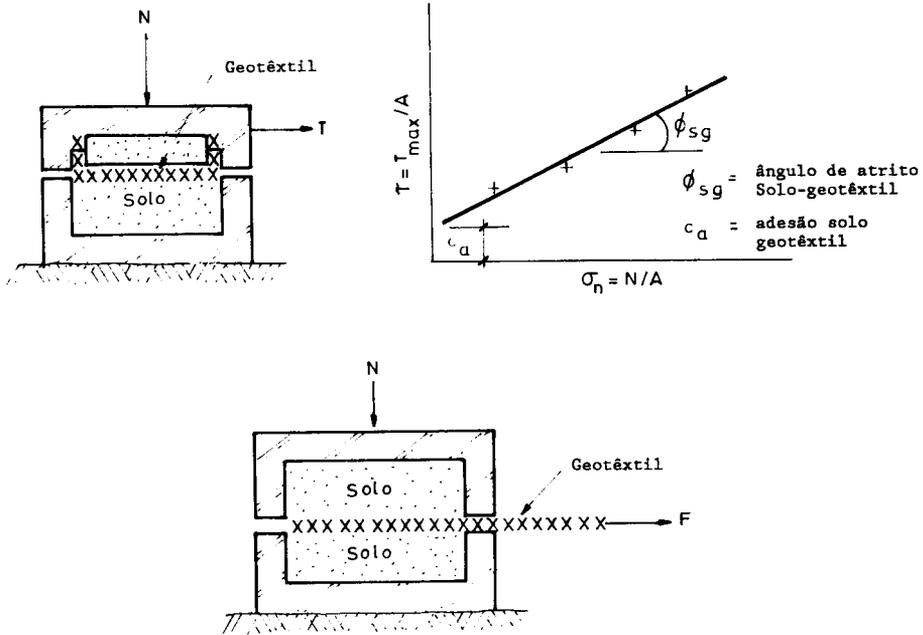


Fig. 2 — Ensaio para determinação da resistência ao deslizamento na interface solo-geotêxtil: (a) ensaio de corte directo; (b) ensaio de arrancamento (Koerner, 1986)

### 3 — INTERACÇÃO SOLO-GEOTÊXTEL E MECANISMOS DE RUPTURA

O mecanismo de transferência de tensões entre o solo e os geotêxteis consiste exclusivamente no desenvolvimento de tensões tangenciais ao longo da interface e na consequente mobilização de tracções nos reforços. Em sistemas reforçados com geogrelhas e georedes também a resistência passiva do solo sobre elementos transversais do reforço pode ser mobilizada.

Na ausência de adesão, a tensão tangencial máxima que é possível mobilizar na interface solo-geotêxtil é dada por:

$$\tau_{\max} = \sigma' \tan \phi_{sg} \quad (1)$$

onde:  $\sigma'$  = tensão normal efectiva no plano do reforço;  
 $\phi_{sg}$  = ângulo de atrito solo-geotêxtil.

O valor de  $\phi_{sg}$  pode ser relacionado com o ângulo de atrito interno do solo através de:

$$\tan \phi_{sg} = f \tan \phi' \quad (2)$$

onde:  $\phi'$  = ângulo de atrito interno do solo, em termos de tensões efectivas;  
 $f$  = coeficiente de eficiência de atrito; o valor de  $f$ , obtido a partir de ensaios de corte directo, situa-se geralmente entre 0,5 e 1.

Em estruturas de solo reforçado com geotêxteis podem verificar-se mecanismos de ruptura internos e externos. A instabilidade interna é condicionada pelas propriedades mecânicas dos geotêxteis, podendo dar-se por ruptura dos reforços, por deslizamento no contacto solo-reforço, ou ainda pela combinação de ambos os fenómenos. Assim, a máxima tracção ( $T_{mob}$ ) que é possível mobilizar em cada camada de geotêxtil (valor de cálculo) é limitada, por um lado, pela resistência à tracção do reforço:

$$T_{mob} \leq \frac{T_{rup}}{FS_{prup}} \quad (3)$$

onde:  $T_{rup}$  = resistência à tracção do geotêxtil (valor característico);  
 $FS_{prup}$  = coeficiente de segurança parcial em relação à ruptura do geotêxtil;

e, por outro, pela resistência ao arrancamento do reforço, por fricção na interface com o solo:

$$T_{mob} \leq \frac{T_{fric}}{FS_{pfric}} = \frac{2 \int_0^{L_{res}} \sigma' \tan \phi_{sg} dL}{FS_{pfric}} \quad (4)$$

onde:  $T_{fric}$  = resistência ao arrancamento (valor característico);  
 $L_{res}$  = comprimento da parte do geotêxtil que resiste ao arrancamento;  
 $FS_{pfric}$  = coeficiente de segurança parcial em relação ao arrancamento.

A atribuição dos valores de cálculo relativos à resistência dos geotêxteis à tracção e ao arrancamento é obviamente uma questão de grande relevância. Nessa atribuição devem ser ponderados os efeitos do tempo (fluência), da deterioração do geotêxtil no solo, da temperatura e de eventuais danos na instalação em obra (McGown et al., 1984) (Jewell, 1988).

Quanto à estabilidade externa, a ruptura global (ou seja, a ocorrência de um escorregamento que envolve toda a massa reforçada) é a mais usual; principalmente em estruturas de suporte com grande desenvolvimento segundo a vertical, colapsos por deslizamento pela base, por derrubamento ou por falta de capacidade de carga da fundação também poderão ocorrer.

#### 4 — MÉTODOS DE ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO

As análises de estabilidade e o dimensionamento de estruturas de solo reforçado com geotêxteis podem ser realizados através de: (i) métodos baseados na utilização de modelos físicos em escala reduzida ou na observação do comportamento de obras instrumentadas; (ii) métodos baseados em modelação matemática. Estes últimos, por sua vez, podem ser divididos em métodos que têm em conta as relações tensões-deformações dos materiais, como o método dos elementos finitos, e em métodos de equilíbrio limite. Em qualquer destes métodos pode-se recorrer, ou não, à prévia homogeneização do maciço.

Os métodos baseados em análises por equilíbrio limite, apesar de não fornecerem qualquer informação sobre o estado de deformação da obra, têm mostrado ser plenamente satisfatórios para fins de projecto, uma vez que exigem um menor esforço de cálculo e necessitam somente dos parâmetros de resistência do solo e dos reforços, os quais podem ser facilmente determinados através de ensaios laboratoriais correntes. Quanto ao método dos elementos finitos, embora seja atractivo por permitir o cálculo do estado de tensão e deformação da estrutura, ainda é demasiado dispendioso para poder ser usado na prática corrente de projecto.

As análises por equilíbrio limite inserem-se numa filosofia de verificação da segurança, em relação a estados limites últimos, através da utilização de coeficientes de segurança parciais. Com efeito, admitindo que são utilizados valores de cálculo (isto é, valores característicos divididos por coeficientes de minoração adequadamente escolhidos) das forças máximas que é possível mobilizar nos geotêxteis, o coeficiente de segurança que se obtém para cada superfície potencial de deslizamento ensaiada não é mais do que o máximo coeficiente de minoração que é possível aplicar aos parâmetros definidores da resistência ao corte dos solos sem que fique inviabilizado o equilíbrio da parte do maciço delimitada pela referida superfície.

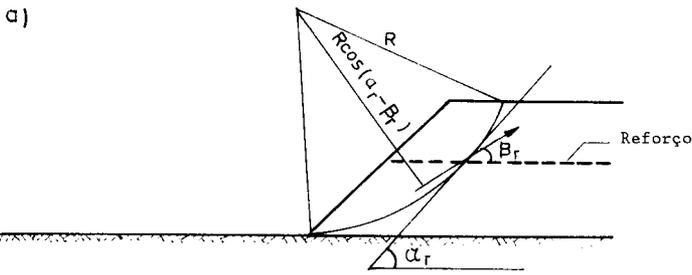
Fundamentalmente, as diferenças entre os vários métodos de análise e dimensionamento por equilíbrio limite dizem respeito à forma das superfícies potenciais de deslizamento (lineares, circulares, espirais logarítmicas, etc.) e ao modo como são incorporadas no cálculo as forças mobilizadas nos reforços. Quanto a este segundo aspecto, existem duas alternativas:

(1) As forças de tracção nos reforços não alteram directamente a resistência do solo, contribuindo apenas para o equilíbrio global de forças e momentos (Fig. 3a).

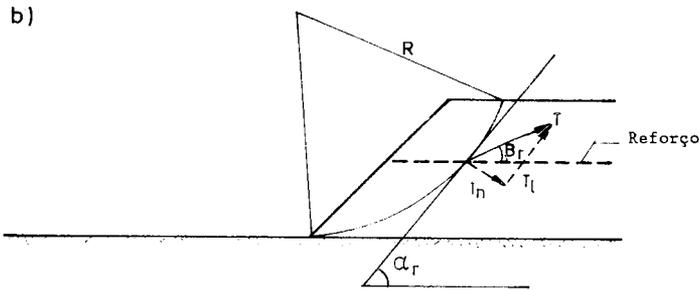
(2) As forças nos reforços fazem aumentar directa e localmente a resistência ao corte do solo; neste caso, as forças são decompostas em componentes normais e tangenciais, as quais fornecem acréscimos locais de resistência atrítica e coesiva, respectivamente (Fig. 3b).

Em qualquer dos casos, a linha de acção que se adopta para a força de tracção nos reforços pode não coincidir com a orientação inicial dos mesmos, devido à inexistência de rigidez à flexão dos geotêxteis e às elevadas distorções na vizinhança da superfície de deslizamento, numa situação limite.

Em comparação com os reforços metálicos, os geotêxteis têm uma deformabilidade muito superior. Por esse motivo, nas obras de solo reforçado com estes materiais é indispensável ter em consideração os aspectos relacionados com a segurança em relação aos estados limites de



$$M_T = T(R \cos(\alpha_r - \beta_r)) \quad 0 \leq \beta_r \leq \alpha_r$$



$$M'_T = T_1 R + T_2 \tan \phi R = M_T [1 + \tan(\alpha_r - \beta_r) \tan \phi]$$

Fig. 3 — Hipóteses de consideração da contribuição dos reforços em análises por equilíbrio limite (Bonaparte et al., 1987)

utilização. Designadamente, a limitação das deformações constitui um critério relevante (e frequentemente condicionante) de dimensionamento. Este assunto será retomado mais adiante, a propósito da descrição dos programas de cálculo para análise e dimensionamento.

## 5 — VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA DE ESTRUTURAS DE SOLO REFORÇADO COM GEOTÊXTIL

São apresentadas seguidamente as principais características de um programa de cálculo automático desenvolvido com vista à avaliação das condições de segurança de obras de solo reforçado com geotêxteis. O programa (designado por STAB) baseia-se numa análise por equilíbrio limite, com superfícies de deslizamento de forma circular. A formulação utilizada consiste na adaptação do método das fatias de Bishop simplificado, por forma a ter em conta a contribuição dos reforços. Uma vez fornecidos os parâmetros de resistência do solo e dos reforços, a geometria do maciço e a disposição das camadas de geotêxtil (espaçamentos e comprimentos), o programa determina a superfície de escorregamento crítica e o respectivo coeficiente de segurança.

Na consideração do efeito dos reforços foram admitidas as seguintes hipóteses:

(1) As forças mobilizadas nos geotêxteis não afectam directamente a resistência do solo, contribuindo apenas para o equilíbrio de forças e momentos (Fig. 3a);

(2) Os reforços são dispostos inicialmente na horizontal, prevendo-se contudo a possibilidade de, numa situação limite, as forças de tracção nos mesmos terem uma inclinação obedecendo a:

$$0 \leq \beta_r \leq \alpha_r \quad (5)$$

onde:  $\beta_r$  = ângulo entre a direcção da força mobilizada no reforço e a horizontal;  
 $\alpha_r$  = ângulo entre a tangente à superfície de ruptura, no ponto em que o geotêxtil a intersecta, e a horizontal.

(3) A favor da segurança, não são considerados eventuais efeitos estabilizadores devidos ao paramento do talude.

Como já foi mencionado, uma das grandes limitações das análises por equilíbrio limite é a de não fornecer informação sobre o estado de deformação do maço. Em estruturas reforçadas com materiais extensíveis, como é o caso dos geotêxteis, esta limitação deve ser superada de alguma forma. Uma das soluções, e que foi a utilizada nos programas de cálculo desenvolvidos, é estabelecer um limite para o estado de deformação dos materiais. Assim, um dos parâmetros a fornecer é o máximo valor admissível ( $\epsilon_d$ ) da deformação principal de extensão, o qual deve ser escolhido por forma a satisfazer as duas seguintes condições:

(1) Não ultrapassar os valores consagrados pela experiência, tendo em conta, naturalmente, a importância da obra (Jewell, 1985) (Vanicek e Skopek, 1989);

(2) Não ultrapassar o valor ( $\epsilon_r$ ) correspondente à resistência de pico do solo em ensaio de corte (Fig. 4).

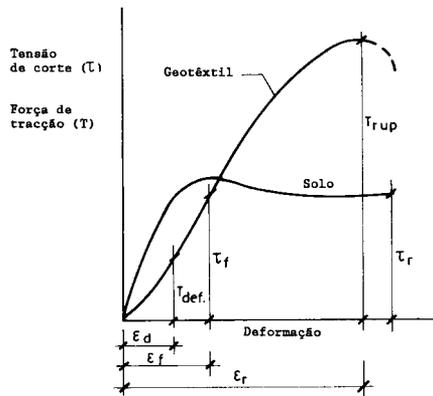


Fig. 4 — Comportamento tensão-deformação do solo e do geotêxtil

Postulando a existência de compatibilidade de deformações entre o solo e os geotêxteis, o valor da deformação admissível introduz um limite adicional à tracção máxima que é possível mobilizar nos reforços; esse limite é precisamente o valor da tracção que corresponde a  $\epsilon_d$  no diagrama tracções-deformações do geotêxtil (Fig. 4).

Para cada superfície potencial de deslizamento ensaiada, a força mobilizada em cada reforço é então calculada a partir da seguinte expressão:

$$T_{mob} = \min \left( \frac{T_{rup}}{FS_{prup}}, \frac{T_{fric}}{FS_{pfric}}, \frac{T_{def}}{FS_{pdef}} \right) \quad (6)$$

onde:  $T_{def}$  = força disponível correspondente à deformação admissível  $\epsilon_d$ ;  
 $FS_{pdef}$  = coeficiente de segurança parcial referente ao critério de limitação das deformações.

A resistência ao arrancamento dos geotêxteis ( $T_{fric}$ ) é calculada através de:

$$T_{fric} = 2 \sum_1^{n_d} \sigma' \tan \phi_{sg} \Delta L_{res} \quad (7)$$

onde:  $n_d$  = número de parcelas em que é dividido o comprimento resistente;  
 $\Delta L_{res}$  = comprimento de cada parcela.

Para satisfazer a condição de equilíbrio limite no solo, a força de corte,  $\Delta S$ , mobilizada na base de cada fatia é dada por (ver Fig. 5):

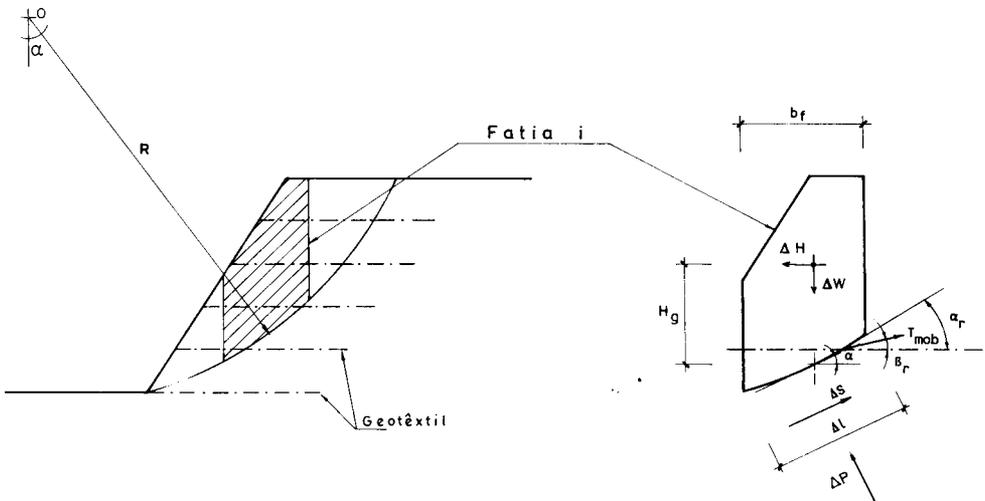


Fig. 5 — Forças actuantes numa fatia de solo reforçado

$$\Delta S = \frac{c' \Delta l + (\Delta P - \mu \Delta l) \tan \phi'}{FS} \quad (8)$$

onde:  $c'$  = coesão do solo em termos de tensões efectivas;  
 $\mu$  = pressão neutra média na base da fatia;  
 $\Delta P$  = força normal na base da fatia, devida às tensões no solo;  
 $\Delta l$  = comprimento da base da fatia.

Equacionando o equilíbrio de momentos em relação ao centro da superfície de escorregamento, tem-se:

$$\sum_1^{NFA} \Delta S R + \sum_1^N T_{mob} R \cos(\alpha_r - \beta_r) = \sum_1^{NFA} \Delta W R \sin \alpha + \sum_1^{NFA} \Delta H (R \cos \alpha - H_g) \quad (9)$$

onde:  $NFA$  = número de fatias;  
 $N$  = número de geotêxteis;  
 $\Delta W$  = peso total da fatia;  
 $\Delta H$  = força horizontal devida a acção sísmica (cálculo pseudo dinâmico);  
 $R$  = raio da superfície de escorregamento;  
 $\alpha$  = ângulo entre a tangente à superfície de escorregamento, no ponto médio da base da fatia, e a horizontal;  
 $H_g$  = altura do centro de gravidade da fatia.

Equacionando também o equilíbrio segundo a vertical das forças actuantes numa fatia, e desprezando a componente vertical das forças de interacção entre fatias contíguas, tem-se:

$$\Delta W - \Delta P \cos \alpha - \Delta S \sin \alpha - \sum_1^{NGF} T_{mob} \sin \beta_r = 0 \quad (10)$$

onde:  $NGF$  = número de geotêxteis intersectados pela superfície de escorregamento dentro da fatia.

Combinando as equações 8, 9 e 10, e atendendo a que

$$\Delta l = b_f \sec \alpha \quad (11)$$

onde  $b_f$  é a largura da fatia, tem-se:

$$FS = \frac{\sum_1^{NFA} \frac{(c' - u \tan \phi') b_f + (\Delta W - \sum_1^{NGF} T_{mob} \sin \beta_r) \tan \phi'}{\cos \alpha (1 + \frac{\tan \phi' \tan \alpha}{FS})}}{\sum_1^{NFA} \left[ \Delta W \sin \alpha + \Delta H \left( \cos \alpha - \frac{H_g}{R} \right) \right] - \sum_1^N T_{mob} \cos (\alpha_r - \beta_r)} \quad (12)$$

Como é habitual, o valor de  $FS$  é calculado por iteração directa a partir de um valor inicial estimado. Após ensaiar sistematicamente um grande número de superfícies potenciais, determina-se a superfície de escorregamento crítica, correspondente ao menor valor do coeficiente de segurança.

Após a determinação da superfície circular mais desfavorável, o programa STAB faz ainda uma verificação da segurança relativamente ao deslizamento ao longo de cada uma das camadas de reforço. Esta verificação baseia-se na formulação do equilíbrio limite de duas cunhas de terreno, conforme se mostra na Fig. 6.

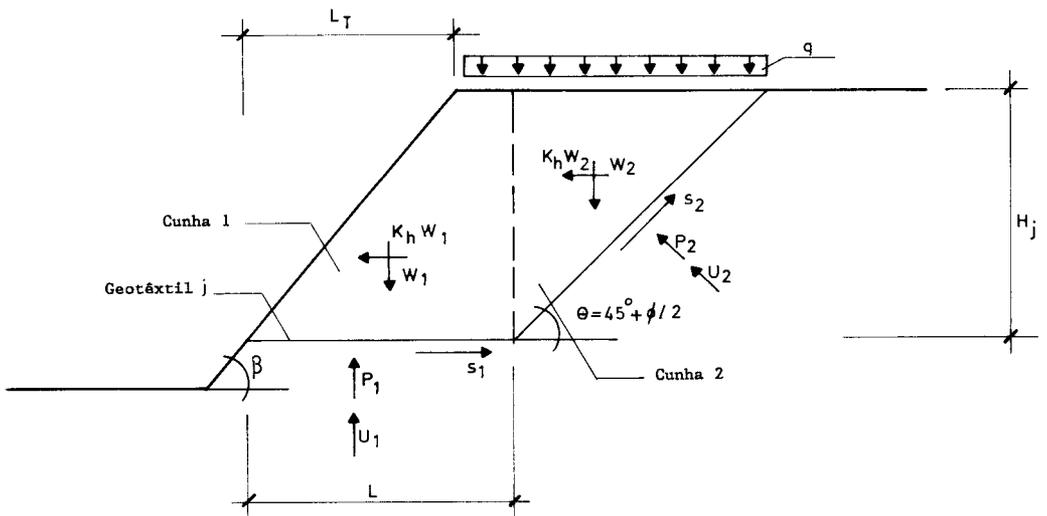


Fig. 6 — Verificação da segurança em relação ao deslizamento entre o solo e o geotêxtil

## 6 — DIMENSIONAMENTO DE ESTRUTURAS DE SOLO REFORÇADO COM GEOTÊXTEIS

O programa STAB permite avaliar as condições de segurança de qualquer estrutura de solo reforçado com geotêxteis, podendo pois ser usado, mediante um processo de tentativas, no dimensionamento destas obras. No entanto, é obviamente mais cómodo e eficiente o recurso a um instrumento de cálculo capaz de gerar automaticamente soluções seguras e económicas. Com esse objectivo foi desenvolvido o programa DIM, cujas principais características seguidamente se indicam.

O programa baseia-se na conjugação de análises de estabilidade por equilíbrio limite (usando também o método das fatias de Bishop simplificado e superfícies de deslizamento de forma circular) com o conceito de forças disponíveis e necessárias proposto por Jewell (1985). Uma vez fixada a geometria do talude e definidos o coeficiente de segurança desejado ( $FS_{des}$ ) e os parâmetros relativos ao solo e ao geotêxtil, o programa fornece o número e a disposição (cotas de instalação e comprimentos) dos geotêxteis no interior do maciço.

Para uma determinada resistência do solo, ou seja, atribuindo um determinado coeficiente de segurança para as suas propriedades, é possível calcular, através da equação 12, a força horizontal necessária para estabilizar o talude. Ao contrário do programa STAB, no programa DIM admite-se que as forças mobilizadas nos reforços estão, em qualquer circunstância, sempre orientadas segundo a horizontal; assim sendo, a força total,  $Q$ , necessária para estabilizar o talude é obtida através de:

$$Q = \sum_1^N T_{mob} \cos \alpha_r = R_1 - \frac{R_2}{FS_{des}} \quad (13)$$

onde:

$$R_1 = \sum_1^{NFA} \left[ \Delta W \operatorname{sen} \alpha + \Delta H \left( \cos \alpha - \frac{H_g}{R} \right) \right] \quad (14)$$

$$R_2 = \sum_1^{NFA} \frac{(c' - u \tan \phi') b_f + \Delta W \tan \phi'}{\cos \alpha \left( 1 + \frac{\tan \phi' \tan \alpha}{FS_{des}} \right)} \quad (15)$$

Com base nesta formulação, e através da pesquisa de uma série de superfícies potenciais de escorregamento, pode-se determinar a superfície crítica, em termos de forças necessárias ao equilíbrio (ou seja, a que requer a maior força para estabilizar o talude) e a envolvente das superfícies que apresentam força necessária nula. Esta última acaba por delimitar a zona do maciço a ser reforçada (conjunto das zonas a e b, na Fig. 7), enquanto a primeira separa uma zona do maciço com forças necessárias crescentes, designada por zona activa (zona a), de uma zona com forças decrescentes, designada por resistente (zona b).

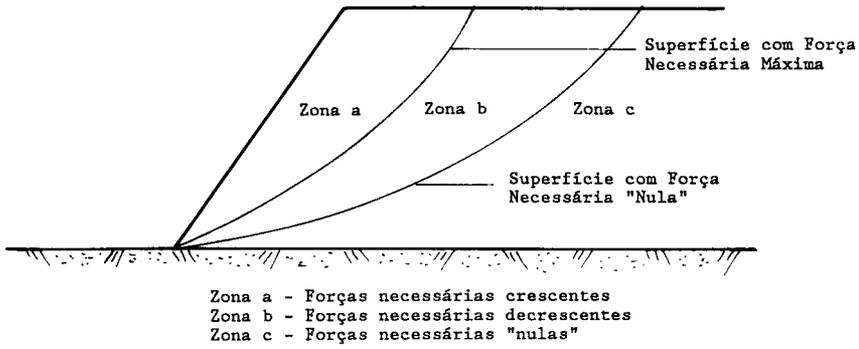


Fig. 7 — Zonamento do maciço em termos de forças necessárias ao equilíbrio

Uma vez determinada a força necessária,  $Q_{max}$ , correspondente à superfície crítica, e supondo que é conhecida a força mobilizada em cada camada de geotêxtil (menor valor entre as resistências de cálculo à rotura e à deformação excessiva), é possível proceder à definição dos espaçamentos entre camadas. Para tal, há que atender não só a uma condição de equilíbrio global:

$$\sum_1^N T_{mob} \cos \alpha_1 = Q_{max} = \int_0^{H_t} \sigma_x \cos \alpha dz \quad (16)$$

onde:  $H_t$  = menor valor entre a altura do talude e a altura da massa de terreno delimitada pela superfície crítica;

$\sigma_x$  = tensões necessárias ao equilíbrio;

$z$  = profundidade, contada a partir da extremidade superior da superfície crítica;

mas também a um conjunto de condições que traduzem o equilíbrio local:

$$T_{mob} \cos \alpha_r = \int_{z_a}^{z_b} \sigma_x \cos \alpha dz \quad (17)$$

onde:  $z_a, z_b$  = profundidades correspondentes aos limites da zona de influência de cada camada de reforço.

Na ausência de resultados de estudos teóricos susceptíveis de fornecer orientação nesta matéria, admitiu-se que as tensões necessárias ao equilíbrio se distribuem em profundidade de acordo com:

$$\sigma_x(z) = C_1 z^{n_p} \quad (18)$$

onde:  $C_1$  = constante que se pode determinar a partir da equação 16;

$n_p$  = parâmetro adimensional a fornecer como dado.

Para além das condições de equilíbrio local, o programa DIM permite que a definição das cotas de instalação dos reforços seja também condicionada pelo estabelecimento de um espaçamento máximo ( $E_{max}$ ) e de um espaçamento mínimo entre camadas.

Para a definição dos comprimentos dos reforços começa-se por definir, para cada camada, um comprimento,  $L_{fric}$ , que mobilize uma resistência ao arrancamento, na intersecção com a superfície crítica, igual ao valor da força mobilizada utilizada para a verificação do equilíbrio local, ou seja:

$$L_{fric} = \frac{T_{mob}}{2 \sigma' \tan \phi_{sg}} FS_{pfric} \quad (19)$$

Depois, através da intersecção da linha horizontal correspondente à cota de instalação do primeiro geotêxtil (contado a partir da base do aterro), com a envolvente das superfícies de força necessária nula, determina-se um comprimento resistente adicional ( $L_{ad1}$ ), para este reforço. Para obter a distribuição, em profundidade, dos comprimentos adicionais ( $L_{ad}$ ) admite-se que:

$$L_{ad}(z) = L_{ad1} \left( \frac{z}{z_1} \right)^{n_c} \quad (20)$$

onde:  $n_c$  = parâmetro adimensional a fornecer como dado;  
 $z_1$  = profundidade de instalação do primeiro geotêxtil.

Em resumo, o comprimento de cada geotêxtil,  $L$ , é obtido através de:

$$L = L_{act} + L_{fric} + L_{ad} \quad (21)$$

onde:  $L_{act}$  = comprimento da parte do geotêxtil situada na zona activa.

O processo de definição dos comprimentos inclui ainda uma etapa final, que consiste em verificar, para cada camada, se ao longo do comprimento  $L$  (dado pela equação 21) é possível mobilizar resistência friccional suficiente para equilibrar o impulso de uma cunha activa de solo, conforme se mostra na Fig. 6. Se para algum dos reforços tal não suceder, é calculado o comprimento mínimo necessário, o qual passa então a ser o comprimento do geotêxtil no respectivo nível.

É importante salientar que, apesar de o programa que efectua automaticamente o dimensionamento ter sido concebido com o objectivo de garantir um coeficiente de segurança não inferior ao pretendido, é sempre necessário fazer uma verificação posterior da segurança; com efeito, uma atribuição incorrecta de valores aos parâmetros de cálculo (designadamente  $n_p$ ,  $n_c$  e  $E_{max}$ ) pode conduzir a dimensionamentos insuficientes.

Os instrumentos de cálculo automático desenvolvidos para análise e dimensionamento foram utilizados na realização de um estudo de avaliação da influência da variação de alguns parâmetros na segurança e na economia de obras de aterro de solo reforçado com geotêxteis (Marques, 1991). Com esse estudo pretendeu-se também obter orientação com vista à atribuição, em situações reais de obra, de valores para os parâmetros que não podem ser determinados experimentalmente (designadamente  $n_p$ ,  $n_c$  e  $E_{max}$ ).

O estudo incidiu sobre a situação típica de projecto representada na Fig. 8. Foram considerados três tipos de fundação para o aterro, designados por fundação média, rígida e mole. O terreno da fundação média foi considerado como tendo propriedades idênticas às do material do aterro, enquanto os dois restantes têm respectivamente melhores e piores propriedades mecânicas do que esse material. Salvo indicação em contrário, as propriedades adoptadas para os materiais foram as seguintes:

aterro:	$c' = 0$ ; $\phi' = 30^\circ$ ; $\phi_{sg} = 21^\circ$ ; peso volúmico $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ ;
fundação rígida:	$c' = 1000 \text{ kN/m}^2$ ; $\phi' = 42^\circ$ ; $\gamma = 24 \text{ kN/m}^3$ ;
fundação mole:	$c' = 20 \text{ kN/m}^2$ ; $\phi' = 16^\circ$ ; $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$ ;
geotêxtil:	$T_{rup} = 60 \text{ kN/m}$ ; $\epsilon_d = 3\%$ ; módulo de rigidez $J = 650 \text{ kN/m}$ .

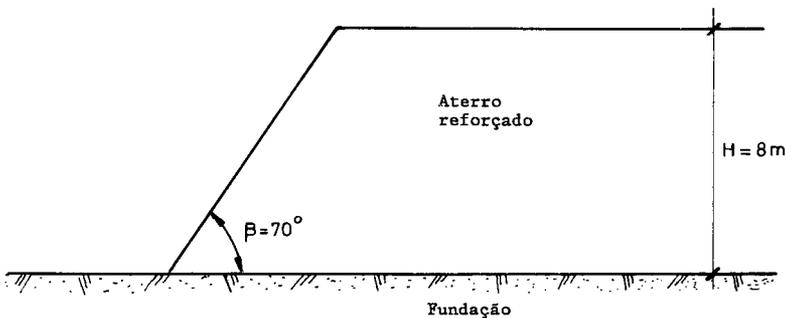


Fig. 8 — Situação considerada nas análises paramétricas

Quanto aos coeficientes de segurança parciais, foram adoptados os seguintes valores:

$$FS_{rup} = 4,0; FS_{fric} = 2,0; FS_{pdf} = 1,0.$$

Seguidamente são apresentados, de forma necessariamente resumida, os resultados mais interessantes das análises paramétricas efectuadas. No âmbito destas análises, as aplicações do programa STAB incidiram sobre obras previamente dimensionadas através do programa DIM, admitindo um coeficiente de segurança desejado  $FS_{des} = 1,5$ .

## Influência da inclinação das forças nos geotêxteis

Usando o programa de análise de estabilidade, foram calculados os coeficientes de segurança correspondentes a diferentes valores de  $\beta_r$ , desde 0 (força horizontal) até  $\alpha_r$  (força tangente à superfície de deslizamento). Conforme se pode verificar na Fig. 9, para qualquer dos três tipos de fundação o máximo coeficiente de segurança é obtido para  $\beta_r/\alpha_r$  compreendido entre 0,4 e 0,6; além disso, a hipótese de força tangente à superfície de deslizamento conduz a coeficientes de segurança inferiores aos que se obtêm admitindo que a força é horizontal.

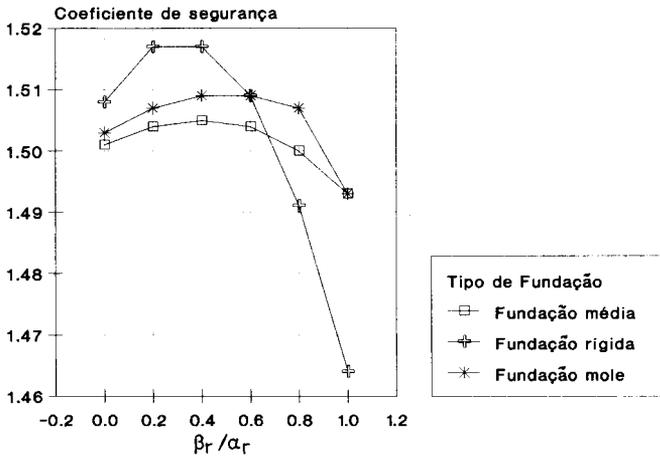


Fig. 9 — Influência da inclinação das forças nos geotêxteis

Estes resultados, à primeira vista surpreendentes, encontram explicação no facto de o aumento de inclinação das forças nos geotêxteis ter um efeito de redução das forças normais na base das fatias, efeito esse que contraria (e pode mesmo ultrapassar, pelo menos com o método de análise utilizado) o efeito óbvio de redução do momento instabilizador.

## Influência da distribuição das tensões necessárias ao equilíbrio

Usando o programa DIM, foi avaliada (através da variação do parâmetro  $n_p$ ) a influência da forma do diagrama de tensões necessárias ao equilíbrio no comprimento total dos reforços. Para o mesmo nível de segurança pretendido, constatou-se serem pequenas as diferenças dos comprimentos totais em relação ao que se obtém admitindo uma distribuição triangular ( $n_p = 1$ ). Sendo assim, e dado que os dimensionamentos resultantes da utilização de valores elevados de  $n_p$ , embora mais económicos, têm em muitos casos uma segurança inferior à desejada, parece não existir justificação para adoptar valores diferentes da unidade para esse parâmetro.

### Influência do espaçamento máximo entre reforços

O espaçamento máximo admissível ( $E_{max}$ ) entre camadas de geotêxteis mostrou ser um parâmetro de dimensionamento com grande influência na segurança. Dimensionamentos efectuados sem qualquer limitação de espaçamento (ou com valores elevados de  $E_{max}$ ) possuem geralmente coeficientes de segurança inferiores ao desejado, devido às baixas densidades de reforço na parte superior do maciço. Análises efectuadas utilizando sucessivamente os programas DIM e STAB permitiram concluir que o máximo valor de  $E_{max}$  para o qual esta situação não ocorre dependem da inclinação do paramento e da tracção mobilizada no geotêxtil.

### Influência da distribuição dos acréscimos de comprimento

Usando o programa DIM, foi estudada a influência do parâmetro  $n_c$  no comprimento total dos reforços. Admitindo um espaçamento máximo admissível de 0,70 m, obtiveram-se os resultados que se mostram na Fig. 10. Como se pode verificar, o comprimento total diminui com o aumento de  $n_c$ , mas deve ser salientado que a partir de um certo valor desse parâmetro (variável com o tipo de fundação) o coeficiente de segurança da obra passa a ser inferior ao desejado (Fig. 11). Estes resultados, juntamente com outros não apresentados neste trabalho, mostram que o valor a atribuir ao parâmetro  $n_c$  para um dado problema de dimensionamento, varia de forma significativa com o tipo de fundação e com a inclinação do paramento.

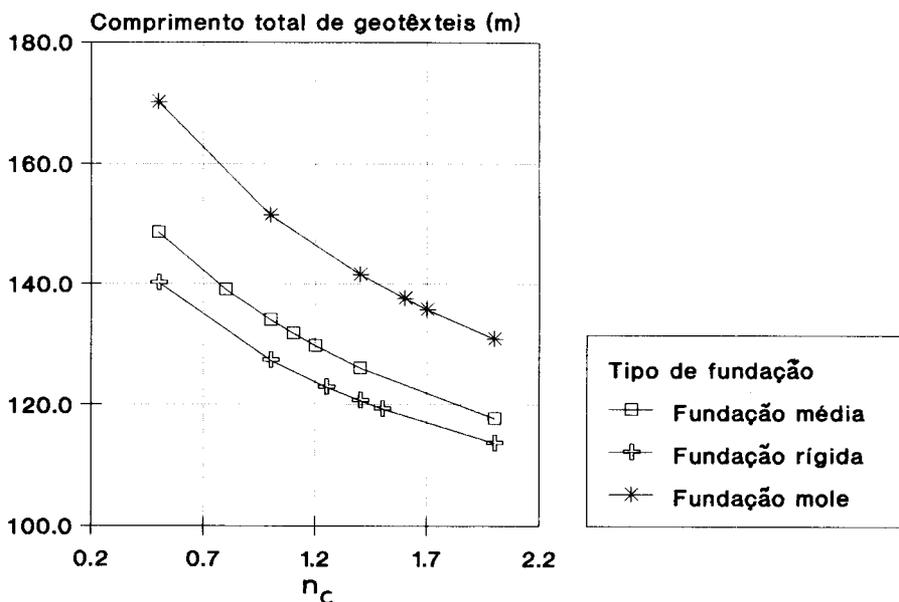


Fig. 10 — Influência do parâmetro  $n_c$  no comprimento total de reforços

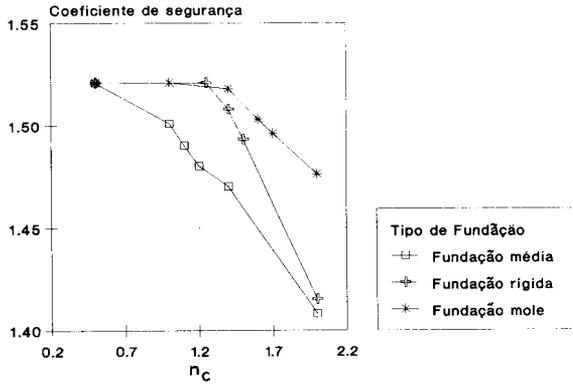


Fig. 11 — Coeficientes de segurança correspondentes aos dimensionamentos representados na Fig. 10

### *Influência da resistência à tracção dos geotêxteis*

Com base nos programas desenvolvidos, foi analisada a influência da resistência à tracção dos geotêxteis no custo total dos reforços. Assim, em primeiro lugar determinou-se, para diversos valores de  $T_{rup}$ , o comprimento total de reforços. Esta determinação foi feita de forma optimizada, isto é, para cada resistência foram procurados os valores de  $E_{max}$  e  $n_c$  para os quais se minimizava o comprimento total (com a restrição de ser garantido um coeficiente de segurança não inferior ao desejado).

Seguidamente, e recorrendo aos preços dos produtos de uma determinada marca comercial, obtiveram-se as curvas de custo total dos reforços, por metro de obra, em função da resistência à tracção do geotêxtil (Fig. 12). Como se pode verificar, os custos mais baixos são conseguidos com resistências situadas nas duas extremidades da gama considerada. É importante salientar que esta conclusão pode não ser válida para geotêxteis de outras marcas (do mesmo ou de outros fabricantes) ou para hipóteses de cálculo diferentes das que foram consideradas.

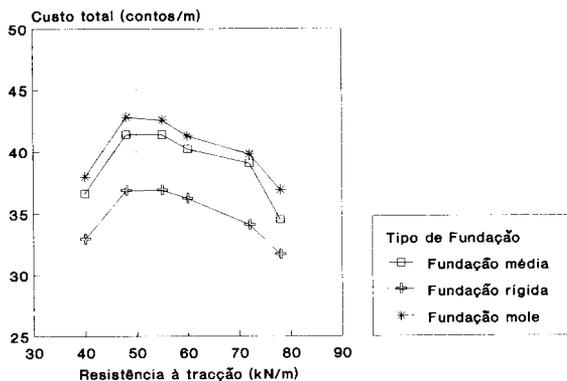


Fig. 12 — Influência da resistência à tracção dos geotêxteis no custo total dos reforços

Não obstante a reconhecida susceptibilidade dos geotêxteis à deterioração das características mecânicas, a utilização destes materiais como elementos de reforço de solos constitui uma solução técnica e economicamente interessante. Trata-se de uma tecnologia relativamente recente e que dispõe ainda de uma larga margem de progresso quer nos aspectos relacionados com o desenvolvimento de novos produtos e com a caracterização dos materiais, quer ao nível da fenomenologia e métodos de dimensionamento das obras, quer ainda no que diz respeito aos aspectos construtivos e de controlo de qualidade.

Os programas de cálculo cuja fundamentação teórica se descreve neste trabalho constituem um instrumento poderoso para o projecto de obras deste tipo, permitindo efectuar dimensionamentos optimizados em termos de emprego dos reforços.

As análises paramétricas efectuadas mostram a influência de alguns parâmetros na segurança das obras e nos resultados do dimensionamento automático. É de salientar a importância que assumem os parâmetros de dimensionamento relativos ao espaçamento máximo entre camadas de geotêxteis e aos comprimentos adicionais dos reforços, em relação aos que seriam estritamente necessários por meras considerações de resistência ao arrancamento.

Finalmente, há a destacar: (i) o facto de um aumento de inclinação da força mobilizada nos reforços poder fazer diminuir o coeficiente de segurança da obra; (ii) e a influência que a resistência à tracção do geotêxtil pode ter em termos de custo total dos reforços.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BONAPARTE, R.; HOLTZ, R. D.; GIROUD, J. P. (1987) — *Soil reinforcement design using geotextiles and geogrids*. Geotextile Testing and the Design Engineer, ASTM STP 952.
- JEWELL, R. A. (1985) — *Limit equilibrium analysis of reinforced soil walls*. Proc. 11th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, S. Francisco.
- JEWELL, R. A. (1988) — *Long term strength and safety in steep soil slopes reinforced by polymer materials*. Geotextiles and Geomembranes, vol. 7.
- KOERNER, R. M. (1986) — *Designing with geosynthetics*. Prentice-Hall.
- MARQUES, A. C. (1991) — *Taludes de aterro reforçados com geotêxteis*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre, Universidade Nova de Lisboa.
- MC GOWN, A.; PAINE, N.; DUBOIS, D. (1984) — *Use of geogrid properties in limit equilibrium analysis*. Proc. Symp. on Polymer Grid Reinforcement, Londres.
- MITCHELL, J. K.; VILLET, W. (1987) — *Reinforcement of earth slopes and embankments*. Report 290, Transportation Research Board.
- VANICEK, I.; SKOPEK, P. (1989) — *Stability calculation of reinforced soil slope*. Proc. 12th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro.