

# CONTRIBUIÇÃO DA VEGETAÇÃO PARA A ESTABILIDADE DE TALUDES. PARTE I – ENQUADRAMENTO GERAL

## Vegetation contribution on the slope stability. Part I - Introduction

ANTÓNIO AGOSTINHO MENDONÇA\*  
ANTÓNIO SILVA CARDOSO\*\*

RESUMO - Descreve-se e atribui-se uma valorização aos efeitos da vegetação dos taludes e faz-se uma apreciação das características da vegetação que condicionam cada um desses efeitos. Estuda-se o papel da vegetação, e particularmente das raízes, na estabilização dos taludes. O efeito de reforço das raízes é analisado com certo pormenor, desenvolvendo-se um modelo conceptual para a sua consideração na avaliação da estabilidade dos taludes vegetalizados. O modelo entra em linha de conta com a quantidade e as dimensões das raízes e, também, com as suas resistências à tracção e ao arranque.

SYNOPSIS - The effects of vegetation on slopes are described and qualified and the conditioning characteristics of the vegetation on each of these effects are appreciated. The stabilizing role of the vegetation and particularly of the roots is studied. The reinforcing effect of the roots is analysed in detail and a conceptual model for its consideration on the evaluation of stability of slopes is developed. The model takes into account the quantity and dimensions of the roots and their tension and pull-out strengths.

### 1 - INTRODUÇÃO

O efeito de reforço das raízes e a sua contribuição para a estabilidade de taludes foi objecto de estudos sobre as diversas vertentes da questão (Mendonça, 1997). Por um lado, desenvolveram-se técnicas e procedimentos de ensaio de laboratório e, sobretudo, de campo, tendo em vista a caracterização geométrica e mecânica dos sistemas radiculares e da resistência do conjunto solo-raízes. Por outro lado, houve que desenvolver ferramentas de cálculo capazes de contabilizar o efeito das raízes na estabilidade de taludes através de metodologias de equilíbrio limite.

Estas metodologias foram aplicadas ao estudo de um caso concreto, o que exigiu a execução de um largo conjunto de ensaios e de medições em campo e a realização de cálculos para avaliação dos correspondentes factores de segurança. Tais estudos são relatados noutra artigo (Mendonça e Cardoso, 1998).

No presente artigo pretende-se apenas fazer o enquadramento da problemática dos efeitos da vegetação de taludes e, em particular, do efeito de reforço das raízes, recorrendo-se, fundamentalmente, a uma revisão da bibliografia que sobre o assunto tem sido produzida.

---

\* Mestre em Engenharia Civil

\*\* Doutor em Engenharia Civil, Professor Associado da FEUP

## 2 - EFEITOS DA VEGETAÇÃO

O revestimento vegetal dos taludes melhora a sua integração paisagística e diminui o impacto ambiental a que, em regra, a abertura de escavações ou a construção de aterros conduz, visto que produzem uma alteração, mais ou menos acentuada, da configuração geométrica da paisagem. Tal repercute-se naturalmente no melhoramento das condições de conforto humano.

Estes aspectos, felizmente cada vez mais considerados como decisivos e condicionantes das soluções de engenharia, justificam por si só a obrigatoriedade de proceder à vegetalização dos taludes. Porém, esta desempenha também importantes acções funcionais, já que afecta os maciços terrosos dos pontos de vista hidrológico, hidráulico e mecânico.

Os efeitos funcionais da vegetação, que podem ser benéficos ou adversos, foram exaustivamente estudados por Coppin e Richards (1990). Nos parágrafos seguintes faz-se uma descrição desses efeitos, geralmente associados à folhagem, *in situ* ou depositada na superfície dos maciços, às raízes e ao tamanho da vegetação, procurando-se em cada caso valorizar a sua acção.

A folhagem da vegetação intersecta os pingos da chuva no seu trajecto, tendo como consequências:

- a) - perdas por absorção e evapotranspiração, o que é benéfico pois reduz a quantidade de água disponível para infiltração;
- b) - a redução da energia das gotas e, portanto, da sua erosividade, o que constitui também um efeito benéfico;
- c) - o aumento do tamanho das gotas que, contrapondo-se ao efeito anterior, é localmente desfavorável.

Por outro lado, a folhagem que cobre a superfície dos maciços afecta o fluxo da água superficial visto que produz:

- a) - um aumento do volume de água para infiltração, o que é, em princípio, desfavorável para a estabilidade;
- b) - uma maior rugosidade superficial com a conseqüente redução favorável da velocidade do fluxo de água e ar;
- c) - o arrastamento e concentração de detritos, o que constitui um efeito adverso já que conduz à concentração do fluxo e ao aumento da velocidade.

Ainda no que respeita à folhagem depositada sobre os terrenos, ela tem efeitos mecânicos benéficos pois protege a superfície dos maciços dos impactos devidos ao tráfego e amortece a velocidade do vento, constituindo assim uma protecção contra a erosão eólica.

Por sua vez, as raízes penetram nos maciços acarretando quer um efeito desfavorável, que consiste na abertura de fissuras que incrementam a infiltração da água, quer um efeito favorável, dado que absorvem a humidade e, conseqüentemente, conduzem à diminuição do teor em água dos maciços terrosos.

Do ponto de vista mecânico, os efeitos das raízes são genericamente benéficos, consistindo em:

- a) - união superficial as partículas, resultando em restrição dos movimentos, redução da erosão e, naturalmente, incremento da resistência ao corte;
- b) - penetração nos níveis profundos dos maciços, conduzindo à amarração dos níveis superiores aos inferiores e ao suporte dos níveis superiores através de reforço e efeito de arco.

QUADRO I  
Características da vegetação condicionantes dos diversos efeitos  
(adaptado de Coppin e Richards, 1990)

| Efeitos  |                        | Características condicionantes             |   |   |                |                |                |                |                |                |                |   |
|--|------------------------|--|---|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---|
|  |                        | S  | H | P | F <sub>1</sub> | F <sub>2</sub> | F <sub>3</sub> | F <sub>4</sub> | R <sub>1</sub> | R <sub>2</sub> | R <sub>3</sub> | C |
| No fluxo de água superficial                     | Intersecção da chuva   | X  |   |   | X              | X              |                |                |                |                |                |   |
|  | Fluxo superficial      | X  |   |   |                | X              |                |                |                |                |                |   |
|  | Arraste superficial    | X  | X |   | X              | X              |                | X              |                |                |                | X |
|  | Infiltração            |  |   |   |                |                | X              |                | X              | X              |                |   |
| No fluxo de ar (vento)                           | Partícul. em suspensão | X  |   |   | X              |                |                |                |                |                |                | X |
|  | Desvio do fluxo        |  | X | X |                |                |                |                | X              |                | X              | X |
|  | Arraste superficial    | X  | X |   | X              |                | X              |                |                |                |                | X |
|  | Protec. Contra o ruído | X  | X |   | X              |                |                |                |                |                |                | X |
| Na água subterrânea                              | Evapotranspiração      |  |   |   | X              | X              |                |                |                | X              |                | X |
|  | Teor em água do solo   |  |   |   |                |                |                |                | X              |                |                | X |
|  | Drenagem interna       |  |   |   |                |                |                |                | X              | X              |                |   |
| Nas características do maciço                    | Erosão                 | X  | X |   | X              | X              |                |                |                |                |                | X |
|  | Transporte             | X  |   |   |                | X              |                |                |                |                |                | X |
|  | Isolamento             | X  |   |   |                | X              |                |                |                |                |                | X |
|  | Filtro                 |  | X |   |                | X              | X              | X              |                |                |                |   |
|  | Resistência própria    | X  | X |   |                | X              | X              |                |                | X              | X              | X |
| Mecânicos  | Sobrecarga             |  |   |   | X              |                |                |                |                |                |                |   |
|  | Rede superficial       |  |   |   |                |                |                |                |                | X              | X              | X |
|  | Reforço de raízes      |  |   |   |                |                |                |                | X              | X              | X              | X |
|  | Ancoragem              |  |   |   |                |                |                |                | X              | X              | X              |   |
|  | Contraforte            |  |   |   |                |                |                |                | X              |                | X              |   |
|  | Cunha de raízes        |  | X |   |                | X              | X              |                | X              | X              |                |   |
| Características da vegetação:                    |                        |  |   |   |                |                |                |                |                |                |                |   |
| S - % de cobertura superficial                   |                        | F <sub>3</sub> - Robustez da folhagem      |   |   |                |                |                |                |                |                |                |   |
| H - Altura                                       |                        | F <sub>4</sub> - Flexibilidade da folhagem |   |   |                |                |                |                |                |                |                |   |
| P - Peso   |                        | R <sub>1</sub> - Profundidade das raízes   |   |   |                |                |                |                |                |                |                |   |
| F <sub>1</sub> - Forma e comprimento da folhagem |                        | R <sub>2</sub> - Densidade das raízes      |   |   |                |                |                |                |                |                |                |   |
| F <sub>2</sub> - Densidade da folhagem           |                        | R <sub>3</sub> - Resistência das raízes    |   |   |                |                |                |                |                |                |                |   |
|  |                        | C - Ciclo de crescimento anual             |   |   |                |                |                |                |                |                |                |   |

Finalmente, é de referir que o excessivo crescimento da vegetação e, particularmente, das árvores conduz ao aumento da sobrecarga sobre os taludes, o que, dependendo das circunstâncias, pode ser benéfico ou adverso, e das forças horizontais que actuam sobre os

maciços devido à acção do vento, o que é desfavorável quando essas forças actuam no sentido do declive dos taludes.

Os diversos factores que caracterizam a vegetação, ou seja, a sua altura e o seu peso, a forma, comprimento, densidade, robustez e flexibilidade da folhagem, a profundidade, densidade e resistência das raízes, etc., condicionam de forma diferente os distintos efeitos hidrológico, hidráulicos e mecânicos associados à sua existência. O Quadro I, adaptado de Coppin e Richards (1990), dá indicações quanto às características da vegetação que determinam a importância de cada um dos efeitos desta.

Feito o enquadramento geral das diversificadas funções que a vegetação pode desempenhar, que se estendem desde a integração paisagística e a diminuição dos impactes ambientais das obras de terraplenagens, até à protecção contra a erosão e ao aumento da segurança aos deslizamentos, os parágrafos seguintes dedicam-se à apreciação mais pormenorizada do último dos aspectos mencionados, bem como à análise da forma de entrar em linha de conta com esse efeito nos estudos de estabilidade de taludes.

### 3 - A VEGETAÇÃO NA ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES

O emprego de vegetação para estabilização de taludes faz-se desde tempos muito remotos. Porém, Krabel (1936) foi o primeiro a projectar, nos Estados Unidos, construções a que se convencionou designar por solo reforçado biologicamente. Estudos recentes reconhecem o papel desempenhado pela vegetação em determinadas estruturas geotécnicas e têm vindo a alargar e a aprofundar os conhecimentos sobre as formas como a vegetação pode afectar a estabilidade dos taludes (Gray e Leiser, 1982; Greenway, 1987; Coppin e Richards, 1990).

É geralmente aceite que a floresta desempenha um papel importante na protecção do solo e que a desflorestação pode acarretar não apenas erosão mas também movimentos globais do maciço (Gray, 1973). Vários estudos mostraram que: i) num dado maciço concreto, o ângulo máximo de inclinação do talude descia de cerca de 60°, quando existia vegetação, para cerca de 36°, no caso dela faltar; ii) em inúmeras situações a rotura de taludes pode ser atribuída à perda do reforço conferido pelas raízes (Wu et al., 1979; Riestenberg, 1987).

A cobertura vegetal é um factor de estabilização de taludes, não apenas em relação a grandes deslizamentos, mas também em relação a pequenos movimentos. Em regra, a vegetação controla a segurança em relação a superfícies de deslizamento relativamente pouco profundas.

O papel positivo desempenhado pela vegetação na estabilidade dos taludes resulta do facto de as raízes actuarem como elementos de reforço dos maciços terrosos, determinando que a resistência dos sistemas solo-raízes seja superior à dos solos não reforçados. Além disso a vegetação influencia a estabilidade indirectamente na medida em que afecta o teor em água dos maciços; com efeito, diversos estudos de campo e de laboratório demonstraram que a vegetação reduz o teor em água e as pressões intersticiais e incrementa as tensões de sucção que se desenvolvem nos maciços (Williams e Pidgeon, 1983; Greenway, 1987).

Sem embargo, Brown e Sheu (1975) referem casos que, à primeira vista, parecem contradizer a opinião generalizada de que a desflorestação é um factor importante de instabilização dos taludes: i) na região de Queensland (Austrália) observaram-se elevadas velocidades de fendilhação em taludes cobertos por árvores e por herbáceas, ocorrendo a instabilidade mais facilmente em taludes cobertos por uma floresta heterogénea do que nos cobertos por herbáceas; ii) em certas regiões da Nova Zelândia constatou-se que a desflorestação não provocava deslizamentos.

De facto, Brown e Sheu (1975), usando um modelo matemático baseado em observações experimentais de outros autores, mostraram que a remoção da sobrecarga causada pela

vegetação e a consequente eliminação da acção do vento na cobertura vegetal originam um aumento do factor de segurança dos taludes.

No sentido de clarificar esta aparente divergência, aqueles dois autores resumem do seguinte modo a questão em apreço:

- a) - a remoção da cobertura vegetal diminui a velocidade de fendilhação;
- b) - a desflorestação, com a consequente eliminação da sobrecarga e da acção do vento, incrementa a estabilidade do talude;
- c) - este incremento na estabilidade é imediato, mas após um certo tempo desaparece, uma vez que, como resultado da deterioração do sistema de raízes (o que é importante em solos com pouca coesão), a fendilhação é acelerada e a instabilidade aumenta;
- d) - a elevação do nível freático, em consequência da diminuição na evapotranspiração, também conduz a uma diminuição da estabilidade dos taludes.

Os factores a) e b) actuam imediatamente após a desflorestação, ao passo que os factores c) e d) actuam a longo prazo. Em resumo, como se representa na Figura 1, no instante em que ocorre a desflorestação pode haver um efeito positivo imediato, a que corresponde o ligeiro aumento do factor de segurança indicado na figura, mas a longo prazo aquela acaba por ser claramente desfavorável para a estabilidade dos taludes devido à rotura do sistema radicular.

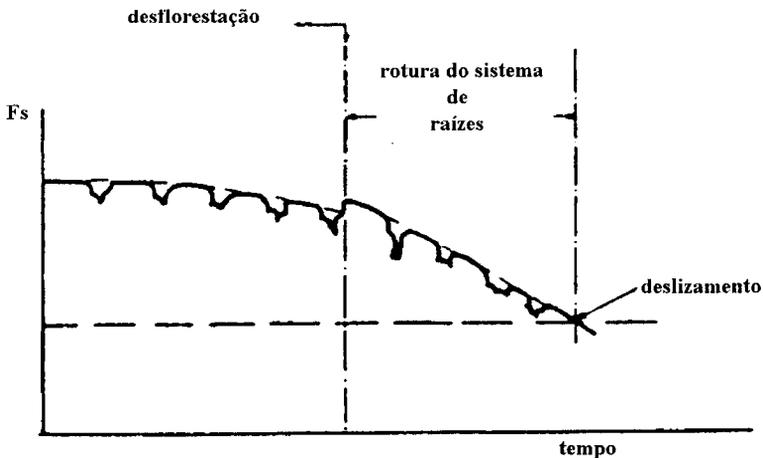


Fig. 1 - Variação do factor de segurança de um talude devido à desflorestação

As opiniões atrás referidas vão no sentido de que a cobertura vegetal reduz a intensidade dos agentes climáticos e contribui para o incremento da estabilidade dos taludes. No entanto, ainda é difícil a avaliação da influência da vegetação natural em todas as suas interferências com o ambiente.

Coppin e Richards (1990) adoptam para a avaliação da segurança de um talude reforçado com raízes uma metodologia baseada no conhecido método das fatias, convenientemente adaptado (ver Figura 2). Os parâmetros aplicados na análise da estabilidade são, por um lado, os usuais em qualquer método das fatias ( $b$ ,  $\alpha$ ,  $\gamma z$  e  $u$ , largura, inclinação, tensão total devida ao peso das terras e tensão neutra na base da fatia, respectivamente,  $c'$  e  $\phi'$ , parâmetros resistentes do solo) e, por outro lado, os que traduzem o efeito da vegetação ( $u_v$ , decréscimo da pressão neutra devido à evapotranspiração,  $c_s'$ , coesão atribuída à sucção do solo,  $\tau_R$ , acréscimo da resistência ao corte atribuída à vegetação,  $S_v$ , sobrecarga devida à vegetação,  $F_v$ , força do vento paralelamente ao talude).

O principal efeito da vegetação deve-se ao incremento da resistência ao corte,  $\tau_R$ , que é analisado em pormenor mais adiante.

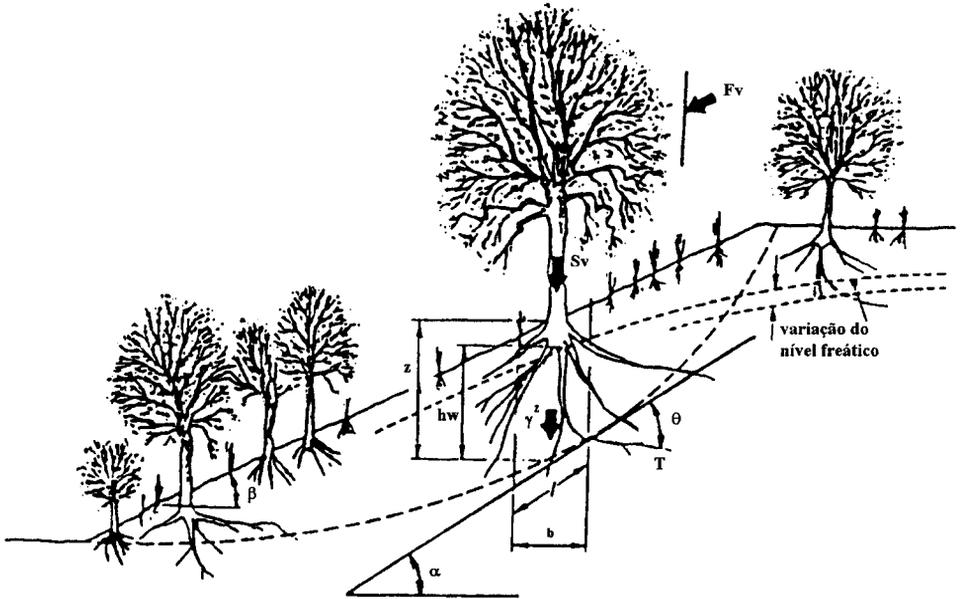


Fig. 2 - Estabilidade de um talude com vegetação (Coppin e Richards, 1990)

Um tratamento mais detalhado dos efeitos globais da vegetação na estabilidade dos taludes pode ser encontrado, por exemplo, em Gray e Leiser (1982). De seguida apresenta-se uma análise do efeito do reforço de solos atribuível às raízes e uma metodologia para a sua quantificação.

#### 4 - REFORÇO DE SOLOS COM RAÍZES

##### 4.1 - Introdução

Endo e Tsuruta (1969) estudaram o efeito de reforço do sistema solo-raízes por meio de ensaios de corte *in situ*, tendo os resultados mostrado a existência de um acréscimo na resistência directamente proporcional à densidade das raízes. Por outro lado, resultados de ensaios de corte em laboratório, referidos por Gray (1973), permitiram concluir que, nos casos de amostras com raízes, a resistência de pico e a resistência residual aumentavam, respectivamente, 2 e 4 vezes.

Por sua vez, Greenway (1987) estudou um talude em solo residual do granito, na zona de Hong Kong, com 9m de altura e 34° de inclinação. No talude foram plantadas acácias, figueiras-de-bengala e outras espécies, as quais, no momento em que o estudo foi realizado, atingiam diâmetros da ordem dos 25-54cm e estavam afastadas entre si 5 a 10m. Usando métodos de equilíbrio limite, o autor conclui que devido às raízes o factor de segurança aumentou de 1,2 para 1,4 a 2,0, dependendo das características geométricas das raízes.

O aumento da resistência resultante da presença de raízes pode ser considerado como uma coesão aparente do sistema solo-raízes (Gray e Ohashi, 1983; Maher e Gray, 1990). Esta

coesão pode acarretar aumentos significativos da resistência ao deslizamento em solos arenosos com pequena, ou inexistente, coesão intrínseca.

#### 4.2 - Resistência ao corte do sistema solo-raízes

O critério de Mohr-Coulomb é geralmente o usado para descrever a resistência ao corte dos solos,  $\tau_s$ , dada por:

$$\tau_s = c' + \sigma' \tan \phi \quad (1)$$

onde  $\sigma'$  é a tensão normal efectiva,  $\phi'$  é o ângulo de atrito e  $c'$  é a coesão.

Quando o solo contém raízes, a rotura envolve a rotura do sistema solo-raízes. Uma aproximação simplificada consiste em considerar as raízes como reforços que incrementam a resistência ao corte de um certo valor,  $\tau_R$ . Então a resistência ao corte total,  $\tau$ , vem:

$$\tau = \tau_s + \tau_R \quad (2)$$

Com o objectivo de desenvolver metodologias de quantificação do efeito de reforço das raízes foram propostos vários modelos simples. Alguns deles apoiam-se em analogias entre o mecanismo de reforço natural através de raízes e os conceitos de reforço de solos com inclusões sintéticas.

Os métodos tradicionais de reforço de solos consistem na introdução de inclusões contínuas (geogrelhas, armaduras, etc.) no terreno. Estas inclusões, geralmente, são orientadas numa direcção preferencial e instaladas sequencialmente em camadas. Diferentes são o sistema "Texsol" (Leflaive, 1985), no qual um monofilamento é misturado, ou injectado, aleatoriamente numa matriz de areia, e os sistemas em que fibras poliméricas, de dimensões relativamente reduzidas, são distribuídas aleatoriamente na massa terrosa (McGown, 1985). Estes últimos sistemas caracterizam-se por uma actuação não direccionada dos reforços, mantendo-se, conseqüentemente, a isotropia de propriedades e eliminando-se as superfícies de fraqueza que se podem desenvolver paralelamente aos reforços nos sistemas do primeiro grupo. O reforço com raízes situa-se provavelmente entre os sistemas direccionais e os sistemas de reforço isotrópico.

É geralmente aceite que, globalmente, o efeito dos reforços no comportamento mecânico do solo que os envolve se traduz por um incremento da tensão de confinamento, resultante das restrições da deformação introduzidas pelos reforços, genericamente menos deformáveis do que o solo não reforçado. Este efeito mobiliza uma resistência ao corte adicional, para além da que se desenvolve apenas devido à tensão de confinamento externa aplicada.

A resistência ao corte adicional devida à presença das raízes depende naturalmente das propriedades do sistema solo-raízes (fibras). Entre essas propriedades são de referir as dimensões, a resistência à tracção e a rigidez das fibras e as características friccionais das interfaces solo-fibras.

Para avaliar a contribuição da resistência ao corte das raízes,  $\tau_R$ , é, portanto, necessário considerar a interacção solo-raízes. Seguindo as hipóteses dos métodos de equilíbrio limite, a deformação de corte ao longo da superfície de rotura é suposta concentrada numa zona restrita com espessura  $z$  (ver Figura 3). Uma raiz é representada por uma barra, inicialmente rectilínea (linha a tracejado), que é deslocada para a posição representada a traço contínuo. O deslocamento introduz na barra uma força axial, bem como um esforço transversal e um momento flector. Para um dado deslocamento tangencial,  $x$ , a deformação da barra,  $\theta$ , a força axial, o esforço cortante e o momento dependem da rigidez da barra relativamente à do solo e do comprimento da barra.

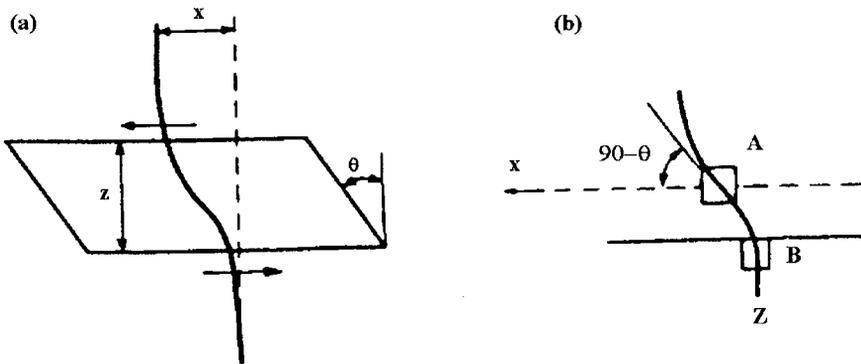


Fig. 3 - Deslocamento de uma raiz: (a) zona de corte; (b) pormenor

O modelo de interacção mais simples consiste em assumir que o solo se deforma em corte puro e as raízes em conjunto com ele (ver Figura 4), o que é válido para raízes perfeitamente flexíveis. Neste caso, o ângulo  $\theta$ , que define a direcção de uma raiz na banda de corte, é igual a:

$$\tan \theta = \tan \rho + \tan \beta \Rightarrow \theta = \tan^{-1}(x / z + \tan \beta) \quad (3)$$

em que os símbolos têm o significado explicitado na Figura 4.

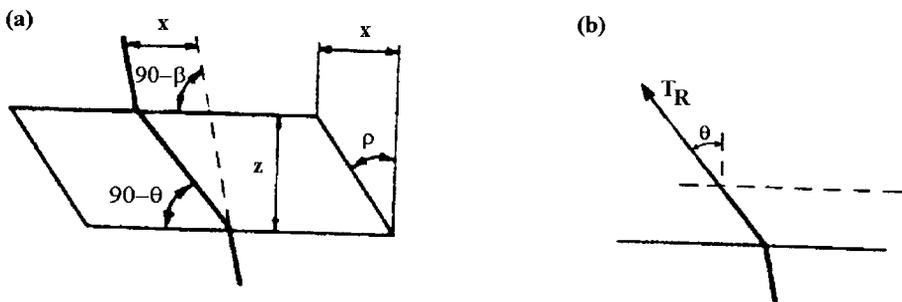


Fig. 4 - Modelo de interacção solo-raiz para uma raiz flexível:  
(a) zona de corte; (b) força na raiz

A força de tracção que se instala nessa raiz,  $T_R$ , divide-se numa componente normal e numa componente tangencial à superfície de corte. A primeira aumenta a tensão de confinamento e, por conseguinte, a resistência friccional ao longo do plano de corte. A segunda contribui directamente para a resistência ao corte. Sendo  $A_S$  a área de influência da raiz em consideração, o acréscimo de resistência ao corte que ela introduz no sistema solo-raiz é dado por:

$$\tau_R = (\cos \theta \tan \phi' + \sin \theta) T_R / A_S \quad (4)$$

em que  $\phi'$  representa o ângulo de atrito do solo, o qual se supõe permanecer inalterado pela presença das raízes.

Naturalmente, no caso de existirem  $n$  raízes, o acréscimo de resistência ao corte é definido por:

$$\tau_R = \left[ \sum_{i=1}^n (\cos\theta_i \tan\phi' + \text{sen}\theta_i) T_{Ri} \right] / A_S \quad (5)$$

sendo  $\theta_i$  e  $T_{Ri}$  a inclinação em relação à normal à superfície de deslizamento e a força de tracção na raiz genérica  $i = 1, n$ , respectivamente, e  $A_S$  a área de influência das  $n$  raízes.

Em princípio, as raízes podem romper através de dois mecanismos: por falta de resistência à tracção ou por falta de ancoragem ou aderência. Portanto, a força de tracção que se pode instalar numa raiz,  $T_{Ri}$ :

a) - é limitada pela sua resistência à tracção, ou seja:

$$T_{Ri} \leq \sigma_R A_{Ri} \quad (6)$$

onde  $\sigma_R$  é a resistência à tracção das raízes e  $A_{Ri}$  é a sua secção;

b) - não pode exceder a resistência da interface solo-raiz, pelo que:

$$T_{Ri} \leq \tau_a p_{Ri} L_{ai} \quad (7)$$

onde  $\tau_a$  é a resistência das interfaces,  $p_{Ri}$  é o perímetro médio da raiz e  $L_{ai}$  é o seu comprimento de amarração.

#### 4.3 - Modelo adoptado

Uma vez que a completa caracterização geométrica e mecânica de um sistema de raízes é muito difícil, senão impossível, não se justifica a adopção de modelos muito elaborados para a avaliação da sua contribuição para a resistência ao corte global do conjunto solo-raízes. Optase, por isso, por um modelo simples, de fácil aplicação, adaptado às possibilidades de caracterização das raízes.

A primeira hipótese simplificadora assumida consiste em admitir que a rotura ocorre por tracção das raízes, ou seja, supõe-se que a sua resistência à tracção é totalmente mobilizada. Para que este pressuposto seja válido, o arranque não se deve produzir. Para tal é necessário que as raízes possuam, em combinação, um comprimento atrás da zona de rotura e uma rugosidade suficientes para que a aderência seja superior à sua resistência à tracção.

Tendo presente (6) e (7) o comprimento mínimo,  $L_{aiMin}$ , das raízes requerido para prevenir o arranque é dado pela expressão seguinte:

$$L_{ai} \geq L_{aiMin} = \sigma_R A_{Ri} / \tau_a p_{Ri} \quad (8)$$

onde os símbolos têm o significado anteriormente referido.

Por outro lado, aceita-se que o ângulo  $\beta$  (ver Figura 4), que define a inclinação das raízes antes de se iniciar o corte, é o mesmo para todas elas. Nestas condições a expressão (5) transforma-se em:

$$\begin{aligned} \tau_R &= (\cos\theta \tan\phi' + \text{sen}\theta) \left( \sum_{i=1}^n T_{Ri} \right) / A_S \\ &= (\cos\theta \tan\phi' + \text{sen}\theta) t_R \end{aligned} \quad (9)$$

Por sua vez,  $t_R$  pode escrever-se do seguinte modo:

$$t_R = \left( \sum_{i=1}^n T_{Ri} \right) / A_S = \sigma_R \left( \sum_{i=1}^n A_{Ri} \right) / A_S \quad (10)$$

ou seja,  $t_R$  é igual ao produto da resistência à tracção das raízes,  $\sigma_R$ , pela densidade de raízes. Esta pode ser definida por:

$$\left( \sum_{i=1}^n A_{Ri} \right) / A_S = N_f A_{Rm} \quad (11)$$

onde  $N_f$  é o número médio de raízes por unidade de área e  $A_{Rm}$  é o valor médio das secções transversais das raízes.

Introduzindo (11) em (10) e, depois, esta em (9) obtém-se:

$$\tau_R = N_f A_{Rm} \sigma_R ( \cos\theta \tan\phi' + \text{sen}\theta ) \quad (12)$$

Na equação anterior a única grandeza desconhecida é o ângulo que define a direcção das raízes na banda de corte,  $\theta$ , o qual varia com a espessura da zona de corte,  $z$ , e com o valor do deslocamento de corte,  $x$  (ver Figuras 3 e 4). Resultados obtidos em ensaios de corte realizados por Waldron (1977) em laboratório, usando diversos perfis formados por camadas argilo-siltosas, arenosas e cascalhentas, e raízes de diferentes espécies (luzerna, cevada, pinho, etc.) apontam no sentido de o valor de  $\theta$  variar entre 45 e 50°. Por outro lado, observações efectuadas por Wu *et al.* (1979) em taludes, de diferentes constituições e com raízes de diversas espécies, que experimentaram roturas indicam que aquele parâmetro varia no máximo entre 45° e 70°.

De qualquer forma, considerando para o ângulo de atrito uma gama de variação que inclui os valores comuns dessa grandeza, isto é,  $25^\circ \leq \phi' \leq 40^\circ$ , conclui-se que o termo entre parênteses da expressão (12) é pouco sensível ao valor de  $\theta$ . Com efeito, para qualquer valor do ângulo de atrito pertencente à gama indicada, esse termo varia apenas entre 3 e 6% quando se considera  $45^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$ . Para os intervalos de variação indicados, o termo em causa toma valores entre um mínimo e um máximo, respectivamente, iguais a 1,04 ( $\phi' = 25^\circ$  e  $\theta = 40^\circ$ ) e a 1,31 ( $\phi' = 40^\circ$  e  $\theta = 50^\circ$ ), pelo que, em termos médios, se pode considerar, simplifadamente:

$$\tau_R = 1.15 N_f A_{Rm} \sigma_R \quad (13)$$

Esta é, portanto, a expressão que, com as hipóteses assumidas, traduz a contribuição das raízes para a resistência ao corte do sistema solo-raízes. Têm sido desenvolvidos modelos mais refinados, porém, o que acima se explanou permite a obtenção de uma boa aproximação do valor do reforço do solo para a maioria das situações.

## 5 - VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE DE TALUDES VEGETALIZADOS

Na análise da estabilidade de taludes vegetalizados podem empregar-se os métodos das fatias correntes, convenientemente adaptados para atender ao efeito da vegetação.

Como se viu, a contabilização do efeito da cobertura vegetal na estabilidade de taludes pode ser efectuada através da quantificação da resistência ao corte adicional conferida pelas raízes. Incorporando esta contribuição num programa tradicional baseado no método das fatias, obtém-se o factor de segurança correspondente.

A expressão (13) mostra que o acréscimo de resistência ao corte devido à presença das raízes depende da densidade de raízes, da área média da secção transversal das raízes e da sua

resistência à tracção. Dada a sua natureza, estes parâmetros apresentam obviamente uma grande variabilidade.

A variabilidade dos parâmetros que caracterizam o efeito da vegetação associada às incertezas relativas às propriedades do próprio solo justifica que se recorra a análises probabilísticas da estabilidade de taludes, em alternativa ao cálculo determinístico do factor de segurança (Mendonça, 1997). A estabilidade passa, então, a ser avaliada através da probabilidade de rotura.

Para proceder a essas análises probabilísticas tem que se definir as distribuições estatísticas das grandezas envolvidas, parâmetros do solo e da vegetação, mediante a realização de ensaios *in situ*, por exemplo.

Os programas de cálculo automático que realizam os cálculos pelos métodos das fatias têm que ser dotados de capacidade de geração de números aleatórios, por forma a serem escolhidos aleatoriamente os parâmetros das distribuições estatísticas correspondentes, anteriormente estabelecidas. Tal procedimento baseia-se no método de Monte Carlo, sendo, então, possível definir a probabilidade de rotura (Mendonça, 1997).

Como se referiu em 1, num outro artigo dos mesmos autores (Mendonça e Cardoso, 1998) ilustra-se a aplicação destas metodologias a um talude concreto, tendo sido efectuada uma cuidadosa caracterização experimental do sistema radicular existente.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi financeiramente apoiado pelo projecto de investigação PRAXIS/2/2.1/CEG/42/94 - "Geotecnia nas Infraestruturas de Transportes e Energia. Novos Desenvolvimentos", subsidiado pelo Programa PRAXIS XXI. Além disso o primeiro autor foi apoiado por uma Bolsa de Mestrado, atribuída pela Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BROWN, C. B.; SHEU, M. S. - *Effects of deforestation on slopes*. J. of the Geot. Eng. Div., ASCE, Vol. 101, nº 2, pp. 147-165, 1975.
- COPPIN, N. J.; RICHARDS, I. G. - *Use of vegetation in Civil Engineering*. Construction Industry Research and Information Association, Butterworths, London, 1990.
- ENDO, T.; TSURUTA, T. - *The effect of tree roots upon the shearing strength of soil*. Annual Report, Hokkaido Branch, Tokyo Forest Experiment Station, 18, pp. 168-179, 1969.
- GRAY, D. H. - *Effects of forest clear-cutting on the stability of natural slopes: results of field studies*. National Science Foundation, University of Michigan, Washington, 1973.
- GRAY, D. H.; LEISER, A. J. - *Biotechnical slope protection and erosion control*. Van Nostrand Reinhold, New York, 1982.
- GRAY, D. H.; OHASHI, H. - *Mechanics of fiber reinforcement in sand*. J. of the Geot. Eng. Div., ASCE, Vol. 109, nº 3, pp. 335-353, 1983.
- GREENWAY, D. R. - *Vegetation and slope stability*. Capítulo do livro *Slope Stability*, editado por M. G. Anderson e K. S. Richards, John Wiley, New York, pp. 187-230, 1987.
- KRABEL, C. J. - *Erosion control on mountain roads*. U. S. Department of Agriculture, Circular 380, Washington, 1936.
- LEFLAIVE, E. - *Soils reinforced with continuous yarns: the Texsol*. Proc. XI<sup>th</sup> Int. Conf. on Soil Mech. and Foundation Engineering, Vol. III, San Francisco, pp. 1787-1790, 1985.
- MAHER, M.; GRAY, D. H. - *Static response of sands reinforced with randomly distributed fibers*. J. of the Geot. Eng. Div., ASCE, Vol. 116, nº 11, pp. 1661-1677, 1990.

- ENDO, T.; TSURUTA, T. - *The effect of tree roots upon the shearing strength of soil.* Annual Report, Hokkaido Branch, Tokyo Forest Experiment Station, 18, pp. 168-179, 1969.
- GRAY, D. H. - *Effects of forest clear-cutting on the stability of natural slopes: results of field studies.* National Science Foundation, University of Michigan, Washington, 1973.
- GRAY, D. H.; LEISER, A. J. - *Biotechnical slope protection and erosion control.* Van Nostrand Reinhold, New York, 1982.
- GRAY, D. H.; OHASHI, H. - *Mechanics of fiber reinforcement in sand.* J. of the Geot. Eng. Div., ASCE, Vol. 109, n° 3, pp. 335-353, 1983.
- GREENWAY, D. R. - *Vegetation and slope stability.* Capítulo do livro *Slope Stability*, editado por M. G. Anderson e K. S. Richards, John Wiley, New York, pp. 187-230, 1987.
- KRABEL, C. J. - *Erosion control on mountain roads.* U. S. Department of Agriculture, Circular 380, Washington, 1936.
- LEFLAIVE, E. - *Soils reinforced with continuous yarns: the Texsol.* Proc. XI<sup>th</sup> Int. Conf. on Soil Mech. and Foundation Engineering, Vol. III, San Francisco, pp. 1787-1790, 1985.
- MAHER, M.; GRAY, D. H. - *Static response of sands reinforced with randomly distributed fibers.* J. of the Geot. Eng. Div., ASCE Vol. 116, n° 11, pp. 1661-1677, 1990.
- McGOWN, A. - *Soil strengthening using randomly distributed mesh elements.* Proc. XI<sup>th</sup> Int. Conf. on Soil Mech. and Foundation Engineering, Vol. III, San Francisco, pp. 1735-1738, 1985.
- MENDONÇA, A. A. - *Um estudo sobre aterros ferroviários antigos.* Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Estruturas de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1997.
- MENDONÇA, A. A.; CARDOSO, A. S. - *Contribuição da vegetação para a estabilidade de taludes.* Parte II - *Estudo de um caso.* Geotecnia, SPG, n° 83 (a publicar), 1998.
- RIESTENBERG, M. M. - *Anchoring of thin colluvium on hillslopes by roots of sugar maple and white ash.* PhD Thesis, University of Cincinnati, Cincinnati, Ohio, 1987.
- WALDRON, L. J. - *The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil.* Soil Science Society American Journal, Vol. 41, pp. 843-849, 1977.
- WILLIAMS, A. A.; PIDGEON, J. T. - *Evapotranspiration and heaving clays in South Africa.* Geotechnique, n° 33, pp. 141-150, 1983.
- WU, T. H.; MCKINNELL, W. P.; SWANSTON, D. N. - *Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska.* Canadian Geotechnical J., n° 16, pp. 19-33, 1979.