

CONTRIBUIÇÃO DA VEGETAÇÃO PARA A ESTABILIDADE DE TALUDES. PARTE II - ESTUDO DE UM CASO

Contribution of the vegetation for slope stability. Part II - A case study

ANTÓNIO AGOSTINHO MENDONÇA *
ANTÓNIO SILVA CARDOSO **

RESUMO - O estudo do efeito estabilizador da vegetação num talude ferroviário antigo com evidentes sinais de degradação constitui o objectivo do artigo. O estudo desenvolve-se em diversas vertentes. Por um lado, houve que caracterizar adequadamente o sistema radicular, quer do ponto de vista geométrico, quer do ponto de vista mecânico. A resistência do conjunto solo-raízes foi também avaliada mediante a realização de ensaios de campo com uma caixa de corte de grandes dimensões. Por outro lado, no que se refere a ferramentas de cálculo, desenvolveu-se um modelo, implantado num programa de cálculo automático, que contabiliza o efeito das raízes na estabilidade de taludes seguindo uma metodologia de equilíbrio limite. O modelo, para além de análises determinísticas correntes, admite a possibilidade de realização de análises probabilísticas recorrendo a procedimentos baseados no método de Monte Carlo. A ferramenta de cálculo desenvolvida é aplicada ao caso real estudado.

SYNOPSIS - The stabilising effects of the vegetation roots developed on an old railway embankment slope is studied. To do this it has been necessary to do some experimental and analytical work. On one hand, the proper geometric and mechanical characterisation of the roots was done and the strength of the soil-roots system was evaluated by carrying out *in situ* tests with a large direct shear box. On the other hand, the contribution of the root's strength for slope stability was incorporated in a computer program, using a limit equilibrium methodology. The program uses the data obtained from experimental work and allows the realisation of deterministic and probabilistic analysis. The developed analytical model is applied to the case study considered.

1 - INTRODUÇÃO

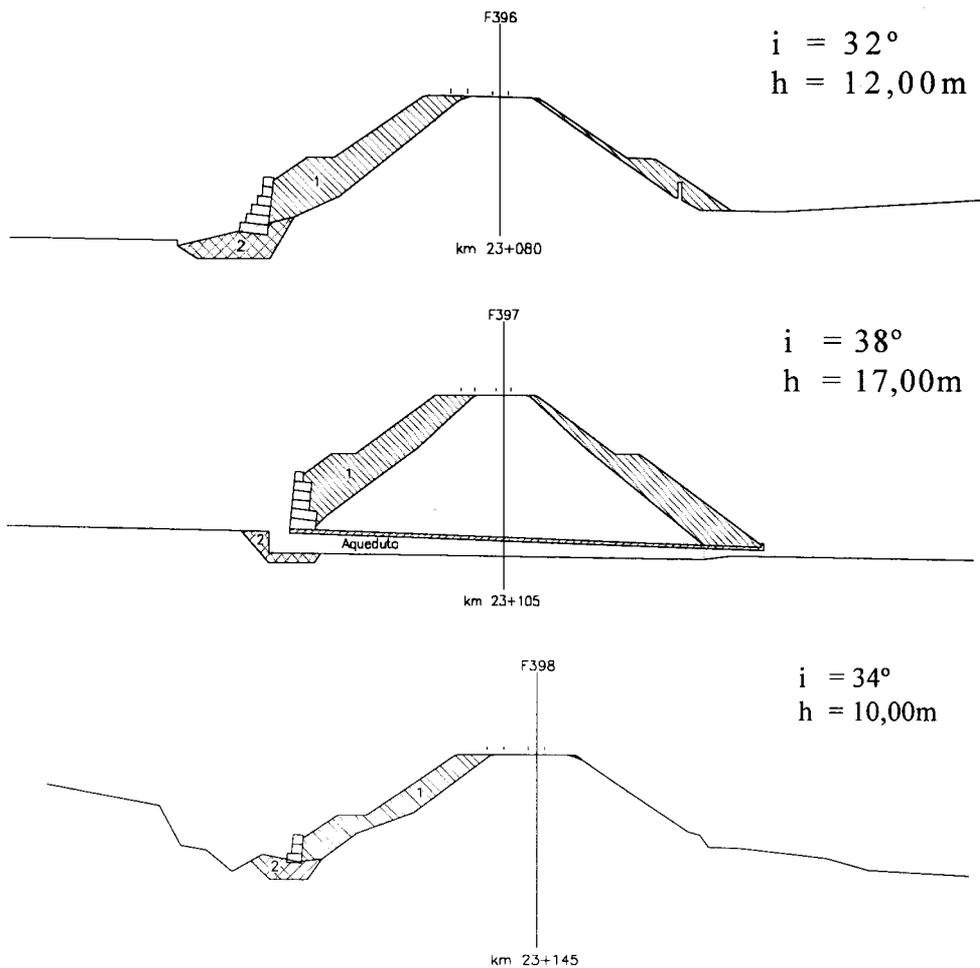
Num artigo recente (Mendonça e Cardoso, 1998) discute-se os efeitos hidrológicos/hidráulicos e mecânicos da vegetação, descreve-se o papel que esta desempenha na estabilização de taludes e desenvolve-se um modelo simples para atender à contribuição das raízes na resistência dos sistemas solo-raízes.

Na sequência desses estudos, no presente artigo analisa-se o papel desempenhado pelas raízes na estabilização de um talude de um aterro ferroviário antigo com evidentes sinais de degradação. Com efeito, nos taludes ferroviários antigos, construídos com técnicas que actualmente se consideram rudimentares e sujeitos a processos de degradação ao longo do tempo, a vegetação que entretanto se desenvolve pode constituir um factor importante para, por um lado, limitar essa degradação e, por outro lado, contrabalançar, através do seu efeito de reforço, a diminuição da segurança provocada pela degradação efectivamente ocorrida.

* Mestre em Engenharia Civil

** Doutor em Engenharia Civil, Professor Associado da FEUP

obras de melhoramento. Desses perfis retira-se os parâmetros geométricos do talude antigo que estão também indicados na Figura 2.



Legenda: 1 - Alargamento do aterro 2 - Saneamento de solos

Fig. 2 - Perfis transversais do talude estudado

Na zona do perfil F397 existe uma passagem hidráulica na base do aterro, em alvenaria de granito com a espessura de 0,40m e as dimensões interiores de 1,30x1,00m².

O corpo do aterro que constitui a plataforma actual do Caminho de Ferro é constituído por um conjunto de terras de composição muito heterogénea, provenientes das escavações efectuadas nos terrenos xistosos e graníticos do substrato. Ou seja, os aterros reflectem a litologia do substrato enquadrante.

No aterro estão representadas as diversas fracções granulométricas, com predomínio da siltosa e arenosa, e componente detrítica grosseira. Esta é de uma variabilidade notável, quer em termos de calibre, variando entre o seixo miúdo e o bloco de dimensão considerável, quer

em termos de constituição, com a presença de fragmentos de xisto, ardósia, grauvaque, quartzito, quartzo filoniano e, por vezes, granito (Geocontrolo, 1984).

Verificou-se que a encosta sul (direita) apresentava vegetação abundante constituída fundamentalmente por plantas herbáceas e arbustivas. Por outro lado, na encosta norte (esquerda) a pouca vegetação existente era herbácea.

No que concerne às deformações, elas eram evidentes na base do talude, muito em particular, do lado norte e no perfil F398 (ver Figura 2), provavelmente devido ao facto de, desse lado, a vegetação possuir muito menor desenvolvimento do que do lado sul.

Além das deformações, e logo no início dos trabalhos, sobretudo na encosta norte, detectaram-se zonas do talude onde era nítida uma carência de finos no aterro, hipoteticamente arrastados pela água que percola pelo interior do aterro. Este fenómeno é particularmente relevante nos aterros ferroviários visto que a sua plataforma não está, em regra, impermeabilizada.

3 - TRABALHOS REALIZADOS PARA CARACTERIZAÇÃO DO TALUDE

3.1 - Preâmbulo

Tendo em vista os objectivos principais dos estudos efectuados, isto é, avaliar a degradação ao longo do tempo da qualidade dos materiais do aterro com taludes razoavelmente inclinados e, sobretudo, estimar a importância do papel desempenhado pelas raízes na manutenção da estabilidade dos taludes, foi realizado um conjunto de ensaios, quer no campo, quer em laboratório.

O recurso a ensaios de campo era, obviamente, imprescindível, dadas as características dos materiais e a impossibilidade de, de outro modo, se poder estimar as propriedades das raízes e do sistema solo-raízes. Para tal houve que conceber e desenvolver equipamentos e metodologias apropriados, os quais são descritos em parágrafos subsequentes. No campo foram efectuados os seguintes trabalhos:

1. recolha de amostras para caracterização laboratorial;
2. ensaios de corte directo do conjunto solo-raízes com uma caixa de corte de grandes dimensões;
3. abertura de valas para inspecção e realização de ensaios;
4. ensaios de arranque de raízes;
5. medição das características geométricas das raízes.

Todos os ensaios na superfície do talude foram realizados na encosta sul (ver Figura 1). Esta decisão foi tomada por duas razões: para não interferir com os trabalhos de terraplanagem em execução na encosta norte e por esta encosta não possuir vegetação significativa, cujo efeito se pretendia quantificar.

Em laboratório foram executados alguns ensaios complementares, tais como ensaios de identificação (granulometria e limites) e de determinação do peso específico e do teor em água dos solos. Concebeu-se, ainda, um ensaio para avaliar o fenómeno de arrastamento de finos do aterro, cuja ocorrência *in situ* foi claramente identificada pela observação dos taludes.

A partir da caracterização efectuada obtiveram-se os dados para o programa de cálculo automático especialmente desenvolvido para a análise de estabilidade de taludes vegetalizados, o qual é descrito e aplicado em secções posteriores.

3.2 - Recolha de amostras

A recolha de amostras teve como objectivo a realização de ensaios laboratoriais de identificação (análises granulométricas e limites de Atterberg) dos materiais ocorrentes em diferentes zonas do aterro e a determinação do peso específico. Foram recolhidas, no total, cerca de 20 amostras em diferentes zonas do aterro. A recolha das amostras foi efectuada por recurso a 3 técnicas distintas:

1. recolha de amostras na superfície do talude;
2. cravação dinâmica de um amostrador no talude;
3. extracção de amostras do corpo dos aterros a partir da passagem hidráulica.

A recolha de amostras neste último caso exigiu que se procedesse à furação da parede de revestimento em alvenaria de granito com recurso a uma coroa diamantada, após o que se cravou estaticamente um amostrador no aterro com um macaco hidráulico.

3.3 - Ensaio de corte directo

Com vista à avaliação da resistência dos solos reforçados com raízes foi desenvolvido um equipamento e uma metodologia de ensaio apropriados, os quais atenderam ao que tem vindo a ser realizado por diversos autores (Endo e Tsuruta, 1969; O'Loughin, 1974; Ziemer, 1981). O equipamento consiste numa caixa de corte de grandes dimensões (0,75m x 0,75m x 0,50m) de modo a que a amostra seja representativa do material a ensaiar e seja perturbada o menos possível pelas operações de preparação do ensaio. A caixa foi executada em chapa de aço com 5mm de espessura.

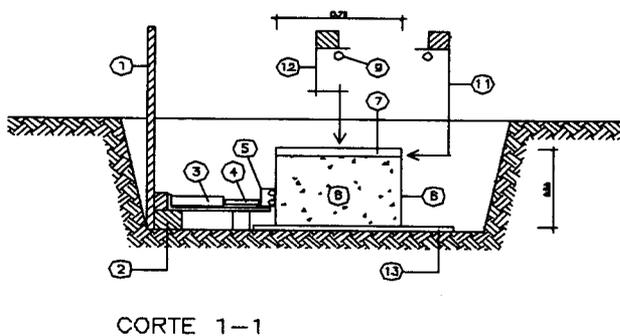
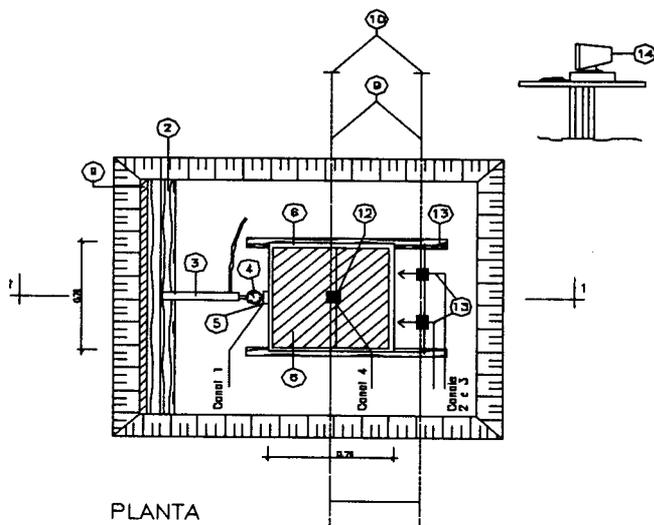
O ensaio foi montado de acordo com o esquema da Figura 3.

Após a desmontagem da superfície do talude na zona a ensaiar, colocou-se a caixa sobre o terreno, escavando-se cuidadosamente em torno do provete até uma profundidade superior a 50cm, sendo a caixa forçada a envolver o provete escavado. Nos casos em que se verificou a existência de sobreescavação os espaços vazios entre o provete e a caixa foram preenchidos com areia. Sob a caixa colocaram-se, segundo a pendente do talude, duas réguas de madeira lubrificadas com massa consistente, de modo a reduzir o atrito da chapa com o terreno.

Escavado o provete, regularizou-se superiormente, colocando-se em seguida uma tampa em aglomerado de madeira com as dimensões interiores da caixa de corte. A tampa destinava-se a uniformizar a parte superior do provete de modo a facilitar a leitura dos deslocamentos normais à superfície de corte.

A montante da caixa foi colocada uma protecção da escavação contra a queda de detritos sobre o equipamento. Junto à protecção foram colocadas vigas de madeira para servirem de reacção à força aplicada pelo macaco hidráulico que apoiava em calços sobre o terreno. Entre o macaco e a caixa de corte foram instalados uma célula de carga ligada a um transdutor e um apoio de roletes que permitia o movimento relativo da caixa e do macaco provocado pelas irregularidades do terreno.

Sobre o provete foram posicionados dois varões em aço $\phi 25$ soldados a cantoneiras na parte central do vão. Os varões apoiavam no terreno em pontos suficientemente afastados da zona a ensaiar de modo a não serem influenciados pelos deslocamentos do terreno. Sobre um dos varões foram fixados 2 deflectómetros para medir os deslocamentos segundo o talude (um à esquerda e outro à direita da caixa) e sobre o outro um deflectómetro para medir os deslocamentos normais ao plano do talude.



Legenda:

- | | | |
|---------------------------------|-----------------------------|------------------------|
| 1 - Protecção em madeira | 6 - Caixa de corte | 11 - Deflectómetro |
| 2 - Vigas de reacção em madeira | 7 - Tapa em madeira | 12 - Deflectómetro |
| 3 - Macaco hidráulico | 8 - Amostra | 13 - Réguas de madeira |
| 4 - Células de carga | 9 - Apoio dos extensómetros | Lubrificadas |
| 5 - Apoio de roletes | 10 - Ancoragem dos varões | 14 - Computador |

Fig. 3 - Esquema do ensaio de corte directo

Após a instalação do equipamento, a força era aplicada a uma velocidade aproximadamente constante, por recurso ao macaco hidráulico, sendo o seu valor medido na célula de carga com uma capacidade de 5000kgf. Tanto a carga como as deformações foram registadas, através de *software* específico, em quatro canais distintos, sendo a aquisição de resultados feita em intervalos de tempo de 1 segundo. Quando ocorreu a rotura verificou-se uma quebra da força para aumento dos deslocamentos lidos.

Após a realização de cada ensaio de corte o solo do interior da caixa foi retirado de modo a expor a totalidade das raízes tendo-se identificado as que romperam. As raízes exteriores à caixa também foram expostas e mapeadas. Efectuou-se a contagem e a medição das raízes e a recolha de amostras para realização de ensaios laboratoriais. Porém, devido à dimensão das partículas envolvidas foi tecnicamente impossível realizar ensaios de corte directo em laboratório sobre amostras recolhidas nos locais dos ensaios realizados *in situ*.

3.4 - Abertura de valas

Para se poder proceder à observação visual dos sistemas radiculares realizaram-se duas valas no talude com as dimensões aproximadas de 0,50 x 0,50m². Na Figura 1 estão localizadas as valas.

Nas valas efectuou-se uma caracterização visual da matriz, procedeu-se à recolha de amostras para realização de ensaios laboratoriais, executaram-se ensaios de arranque de raízes e efectuou-se a medição e a contagem de raízes.

3.5 - Ensaio de arranque de raízes

Tendo em vista a caracterização da resistência à tracção e da aderência das raízes ao solo envolvente realizaram-se, de uma forma aleatória, ensaios de arranque ao longo da superfície do talude da encosta sul, procurando ensaiar um número significativo de plantas de várias espécies.

O ensaio consistiu na aplicação de uma força às raízes até à rotura das mesmas. A força foi aplicada manualmente sendo o seu valor registado num dinamómetro ligado às raízes por um grampo metálico. O dinamómetro utilizado tinha uma capacidade máxima de 500kgf, sendo graduado em múltiplos de 5kgf. Sempre que possível também foi medido o deslocamento da raiz na rotura.

De modo a não romper a raiz na sua ligação ao dinamómetro usou-se um sistema de amarração constituído por duas chapas de aço com 20mm de largura, cerca de 100mm de comprimento e 2mm de espessura. Ambas as chapas possuíam 2 furos nas extremidades que recebiam dois parafusos e respectivas porcas para aperto. Portanto, a raiz a ensaiar era comprimida entre as duas chapas pelo aperto dos parafusos extremos e impedida de se deslocar relativamente ao dinamómetro.

A resistência à tracção, σ_{Ri} , de uma dada raiz foi calculada pela expressão:

$$\sigma_{Ri} = T_{Ri} / A_{Ri} = 4 T_{Ri} / \pi d_{Ri}^2 \quad (1)$$

sendo A_{Ri} a secção da raiz, suposta circular com diâmetro igual a d_{Ri} , e T_{Ri} a força de tracção medida. Por sua vez, a aderência da raiz ao solo envolvente, τ_{ai} , foi avaliada pela expressão:

$$\tau_{ai} = T_{Ri} / p_{Ri} L_{ai} = T_{Ri} / \pi d_{Ri} L_{ai} \quad (2)$$

em que p_{Ri} e L_{ai} representam, respectivamente, o perímetro médio da secção e o comprimento da parte enterrada da raiz. Consequentemente, após a realização de cada ensaio a parte enterrada da raiz era escavada de modo a determinar as suas dimensões.

3.6 - Medição de raízes

Efectuou-se a determinação do diâmetro e do comprimento das raízes num número elevado de pontos do talude. Por outro lado, analisou-se visualmente a forma das raízes tendo-se efectuado o seu levantamento ao longo das valas do talude.

Complementarmente, e com vista à determinação da densidade de raízes, efectuaram-se contagens, determinando-se o número de raízes por unidade de área, N_f .

4 - RESULTADOS E INTERPRETAÇÃO DOS TRABALHOS DE CAMPO

4.1 - Ensaio de corte directo

Os ensaios de corte directo foram realizados em zonas distintas da encosta sul com condições de vegetação diferentes (ver Figura 1). O ensaio 1 foi efectuado cerca do km 23+105, não havendo praticamente vegetação à superfície do talude. O ensaio 2 foi realizado aproximadamente ao km 23+130 numa zona com bastante vegetação arbustiva. O ensaio 3 foi realizado ao lado do 2 numa zona com elevado número de raízes de grande diâmetro (cerca de 8cm). A maioria das raízes foi detectada na camada superficial do terreno orgânico e na camada alterada a ela subjacente.

Na Figura 4 representa-se a variação da força aplicada com o deslocamento médio segundo o talude para os três ensaios realizados. O deslocamento médio é a média aritmética dos valores obtidos nos deflectómetros esquerdo e direito.

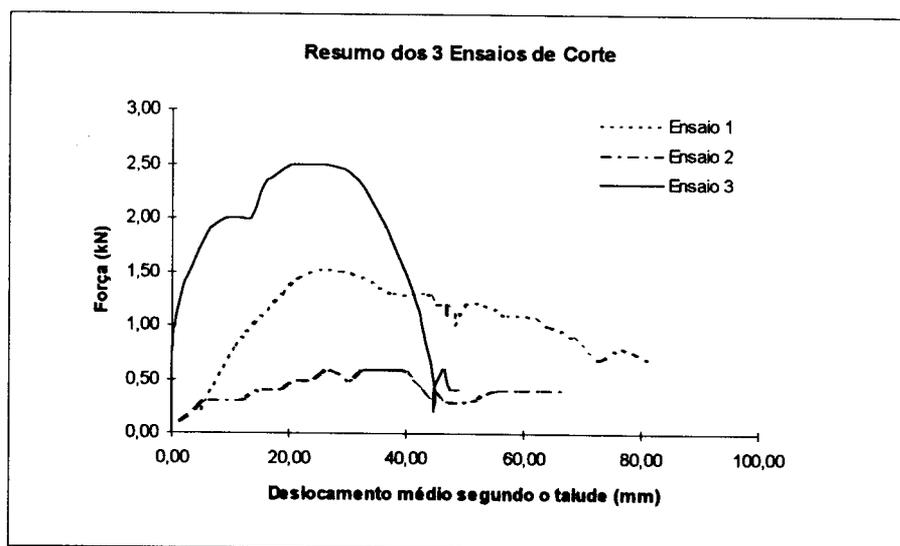


Fig. 4 - Resultados dos 3 ensaios de corte directo *in situ* - curvas força-deslocamento médio ao longo do talude

Na Figura 5 apresenta-se os resultados obtidos por Wu *et al.* (1988) em ensaios de corte directo realizados *in situ* usando um dispositivo proposto por Ziemer (1981).

Da análise global dos resultados conclui-se que, apesar dos métodos de ensaio serem distintos, existe coerência entre os agora obtidos e os referidos por Wu *et al.*. Ambos mostram um incremento da resistência ao corte do solo conferido pela existência de raízes.

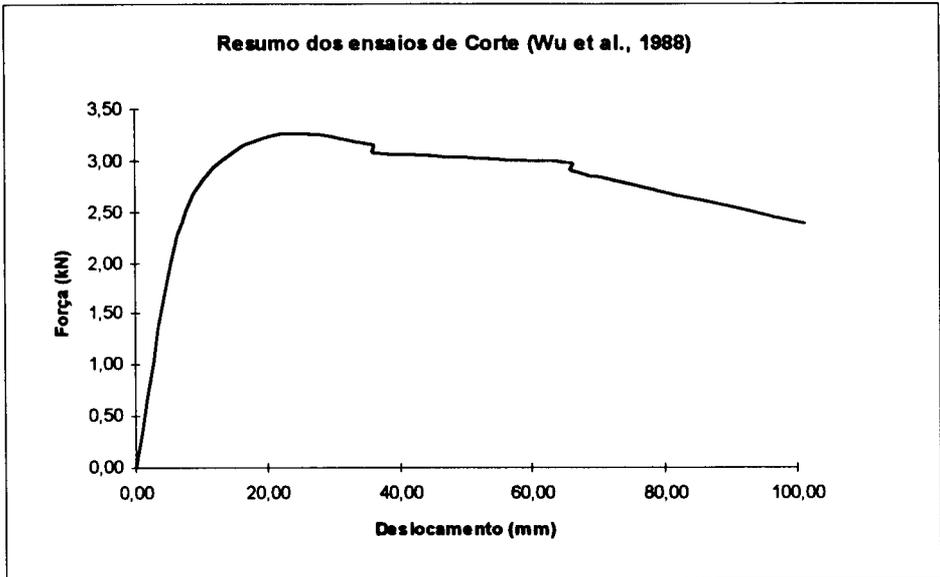


Fig. 5 - Ensaio de corte directo *in situ* - resumo dos resultados de Wu *et al.* (1988)

Na Figura 6 apresenta-se as resistências de pico e residuais *versus* o diâmetro equivalente. Para cada ensaio define-se diâmetro equivalente como sendo igual ao somatório dos diâmetros da totalidade das raízes intersectadas pela superfície de corte.

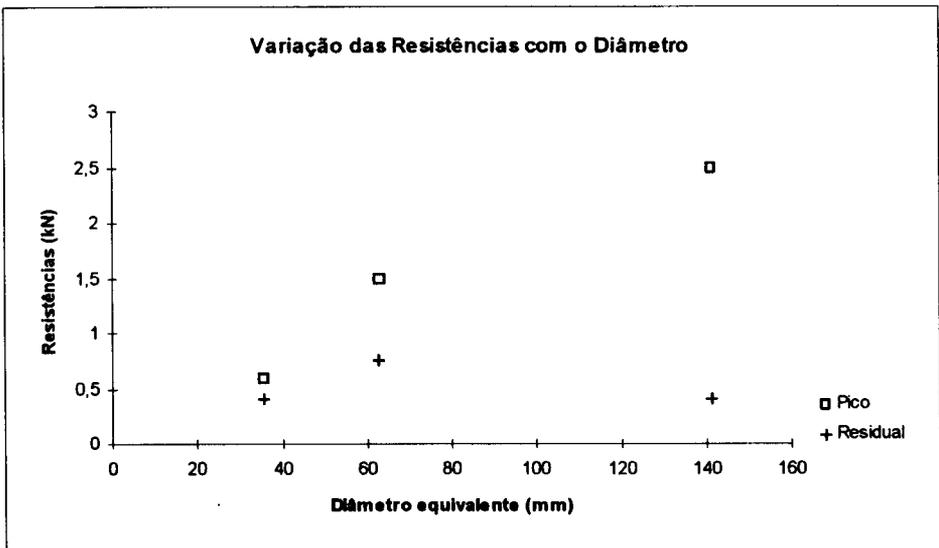


Fig. 6 - Variação da resistência de pico e residual com o diâmetro equivalente de raízes

4.2 - Caracterização do sistema radicular

Nas duas valas abertas ao longo da pendente do talude, cuja localização é indicada na Figura 1, procedeu-se à observação e ao levantamento cuidadoso dos sistemas radiculares existentes no local em estudo.

Na Figura 7 apresenta-se os sistemas radiculares observados e no Quadro 1 resume-se as características das diferentes zonas do terreno em função da penetração das raízes. Neste quadro indica-se ainda os diâmetros típicos das raízes em cada uma das zonas.

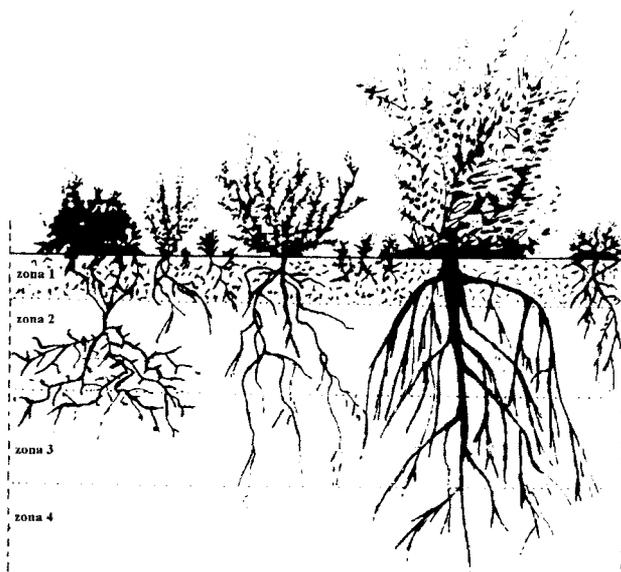


Fig. 7 - Perfil tipo dos sistemas radiculares observados

Quadro 1
Características das diferentes zonas do terreno em função da penetração das raízes

Zona (Fig. 7)	Descrição	Espessura (m)	Diâmetro das raízes (mm)
1	Camada superficial muito densamente ocupada	0,15	1 a 2
2	Camada intermédia de raízes curtas e troncos das raízes mais longas	0,30	5 a 15
3	Camada dos extremos das raízes médias	0,30	3 a 5
4	Camada dos extremos das raízes mais longas	até 1,0	2 a 4

4.3 - Ensaios de arranque de raízes

Nos ensaios de arranque das raízes verificou-se a ocorrência de rotura, nalguns casos, por tracção e, noutros, por arranque: do total de 52 ensaios efectuados, em 33 a rotura foi por tracção e em 19 foi por arranque.

Além da força de tracção também se mediu o diâmetro das raízes, o número e os comprimentos enterrados e o deslocamento das raízes nos casos de rotura por arranque. Os resultados globais obtidos são apresentados na Figura 8, onde também se incluem os obtidos por Wu *et al.* (1988).

A resistência à tracção foi calculada pela expressão (1). Na Figura 9 apresenta-se a evolução da tensão de rotura com o diâmetro das raízes, tendo-se aproximado os resultados

experimentais por uma curva exponencial. O valor médio de rotura é de cerca de 16,5 MPa para um diâmetro médio de 5,4mm.

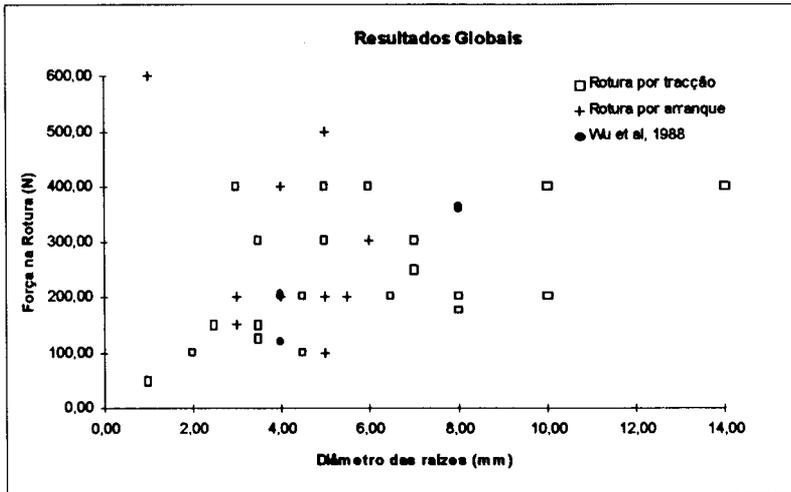


Fig. 8 - Apresentação dos resultados globais obtidos e dos referidos por Wu et al. (1988)

Da análise da Figura 9 verifica-se que a resistência à tracção é muito elevada para raízes finas diminuindo significativamente com o aumento do diâmetro. Esta conclusão confirma os estudos de O'Loughlin (1984).

A tensão tangencial de aderência das raízes ao solo envolvente foi calculada pela expressão (2). Na Figura 10 representa-se a evolução da tensão de rotura ao arranque com o produto do comprimento pelo diâmetro das raízes, tendo-se aproximado os resultados experimentais por uma curva exponencial. O valor médio de rotura foi de cerca de 60 kPa para um diâmetro médio de 4,0mm.

Os resultados da Figura 10 mostram que os valores da resistência ao arranque são mais dispersos do que os da resistência à tracção e, ao contrário do que acontece com estes em relação ao diâmetro, são pouco sensíveis à variação da superfície lateral (proporcional ao produto do comprimento pelo diâmetro, representado em abcissas) das raízes.

4.4 - Medição de raízes

Nas Figuras 11a e b mostra-se, respectivamente, as distribuições de frequência acumulada dos valores medidos dos diâmetros (92 valores) e dos comprimentos (70 valores) das raízes da vegetação existente no talude estudado.

Por sua vez, na Figura 11c representa-se a distribuição de frequência acumulada do número de raízes por unidade de área, N_f .

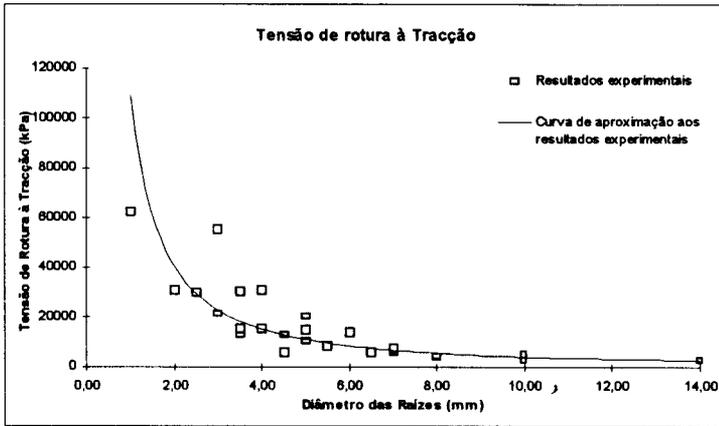


Fig. 9 - Variação da resistência à tracção das raízes com o diâmetro

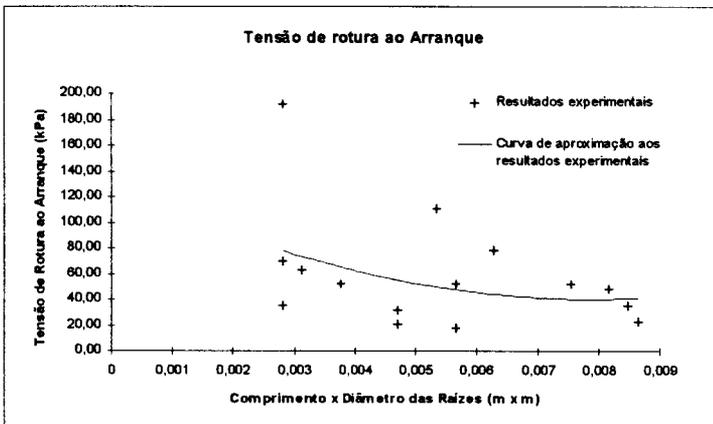


Fig. 10 - Variação da resistência ao arranque com o produto do comprimento pela diâmetro

5 – ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES VEGETALIZADOS

5.1- Preâmbulo

Para contabilizar o efeito das raízes adaptou-se um programa de cálculo automático existente na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (Cardoso *et al.*, 1991) para verificação da estabilidade de taludes pelos métodos de Fellenius e de Bishop simplificado.

A adaptação consistiu em introduzir na metodologia de avaliação da segurança o efeito da resistência das raízes. Além disso, dotou-se o programa da capacidade de realizar análises probabilísticas, seguindo procedimentos baseados no método de Monte Carlo.

5.2 - Determinação do factor de segurança

Como é usual nos métodos de equilíbrio limite, em que se incluem os métodos das fatias para análise de estabilidade de taludes, para uma dada superfície potencial de deslizamento o factor de segurança é igual à razão entre as forças ou momentos estabilizadores, resultantes das

resistências mobilizadas ao longo dessa superfície, e as forças ou momentos instabilizadores, devidos à acção do peso próprio e das sobrecargas.

No caso dos solos reforçados com raízes haverá que incluir na parcela estabilizadora a contribuição das raízes. Esta, de acordo com a do modelo simples descrito por Mendonça e Cardoso (1998), pode ser avaliada por

$$\tau_R = (\cos\theta \tan\phi' + \text{sen}\theta) \left(\sum_{i=1}^n T_{Ri} \right) / A_S \quad (3)$$

em que θ representa a inclinação em relação à normal à superfície de deslizamento da direcção, suposta constante, das n raízes intersectadas na área A_S , T_{Ri} são as forças de tracção mobilizadas nas raízes e ϕ' é o ângulo de atrito do terreno. Pondo

$$T_{Rk} = \left(\sum_{i=1}^n T_{Ri} \right) / n \quad (4)$$

e, atendendo a que

$$N_f = n / A_S \quad (5)$$

Vem

$$\tau_R = (\cos\theta \tan\phi' + \text{sen}\theta) N_f T_{Rk} \quad (6)$$

Naturalmente que tem que se garantir que T_{Rk} seja

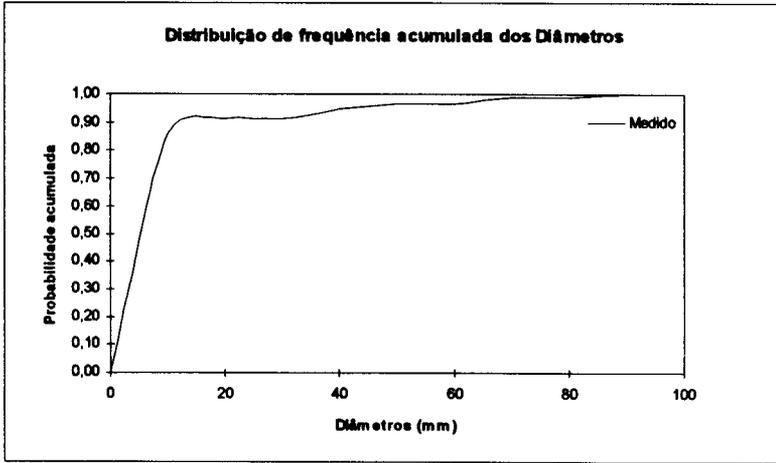
$$T_{Rk} = \text{Mín.} \{ \sigma_{Rk} \pi d_{Rk}^2 / 4; \tau_{ak} \pi d_{Rk} L_{ak} \} \quad (7)$$

em que os diversos símbolos têm o significado já mencionado.

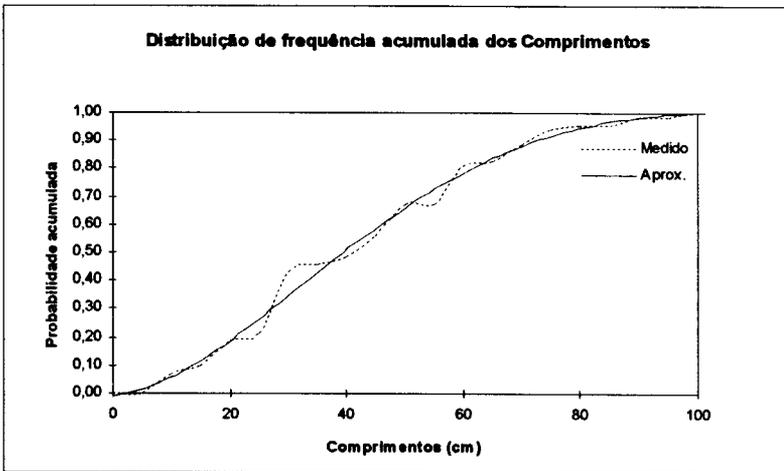
5.3 - Análises probabilísticas

Uma das principais razões a favor da utilização das análises probabilísticas na avaliação da segurança deriva da variabilidade e incerteza inerentes à caracterização geométrica e geomecânica dos taludes (Dinis da Gama, 1995). Para a realização desse tipo de análises, o método de Monte Carlo é provavelmente dos mais utilizados devido à sua grande versatilidade.

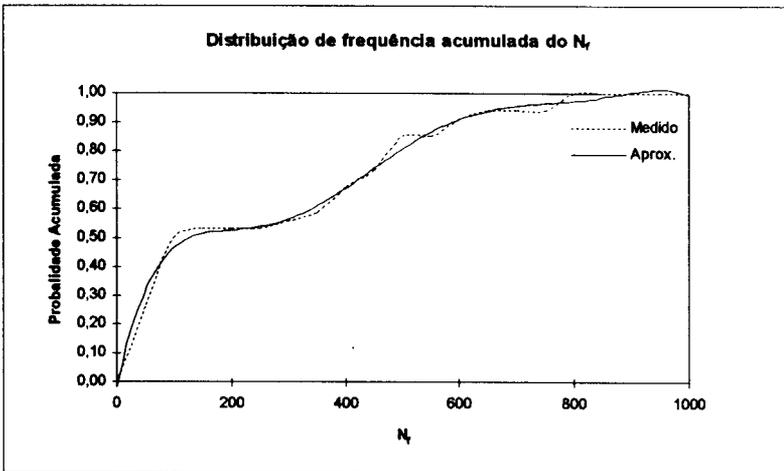
Este método possui grande potencialidade visto que é aplicável a distribuições de qualquer tipo e é de fácil implementação. Na aplicação do método usa-se as equações que traduzem o fenómeno em consideração, sendo a variabilidade dos diversos parâmetros nelas intervenientes caracterizada pelas respectivas funções de probabilidade acumulada, e recorre-se a uma sequência de números aleatórios gerados num elevado número de simulações numéricas.



a)



b)



c)

Fig. 11 - Distribuição da frequência acumulada: a) dos diâmetros; b) dos comprimentos; c) do número de raízes por unidade de área, N_f

Cada simulação é realizada com uma determinada combinação de números aleatórios entre 0 e 1, gerados automaticamente, cada um dos quais conduz a um valor particular da variável correspondente, determinado atendendo à respectiva função de distribuição acumulada; em seguida é calculado o factor de segurança associado. Após um número de simulações suficientemente elevado, determina-se a probabilidade de rotura ou de colapso, P_c , que é definida como sendo igual à frequência relativa dos casos em que o factor de segurança é menor que a unidade:

$$P_c = \frac{\text{N}^\circ \text{ de simulações em que } F_s < 1}{\text{N}^\circ \text{ total de simulações}} \quad (8)$$

5.4 - Dados necessários e resultados do cálculo

Os dados necessários à execução do programa de cálculo automático desenvolvido são os seguintes: i) parâmetros de controlo da resolução; ii) dados referentes à geometria do talude; iii) parâmetros característicos do terreno; iv) parâmetros característicos das raízes. Os diversos dados podem ser considerados, todos ou apenas alguns, constantes ou aleatórios.

Os dados respeitantes aos parâmetros aleatórios referem-se às respectivas funções de probabilidade acumulada, as quais são definidas por conjuntos de pares de valores da probabilidade acumulada e do correspondente valor da grandeza.

Todos os parâmetros aleatórios podem ser independentes ou dependentes entre si. No primeiro caso, para cada simulação, o número aleatório gerador dos valores particulares dos parâmetros é diferente, enquanto no segundo é comum para todos eles.

Os principais resultados obtidos pela execução do programa são as distribuições de frequência relativa e acumulada do coeficiente de segurança para a totalidade das superfícies e das simulações consideradas. Complementarmente calcula-se o valor médio, a moda e o desvio padrão da distribuição do coeficiente de segurança e o valor da probabilidade de rotura, definida pela expressão (8).

6 - ANÁLISE DA ESTABILIDADE DO TALUDE ESTUDADO

6.1 - Zonamento do talude. Modelações efectuadas

Na modelação considerou-se a geometria do talude no perfil F397, que, como se mostra na Figura 2, tinha cerca de 17,0m de altura e uma inclinação da ordem dos 38°.

Realçou-se na secção 2 que o talude em apreço apresentava evidentes sinais de degradação, traduzidos quer por deformações, concentradas sobretudo na base do talude, quer por falta da componente menos grosseira do aterro original.

Por isso, na elaboração dos estudos, admitiu-se a hipótese de, com o passar dos anos, devido à percolação da água através do corpo do aterro, facilitada pelo facto de a plataforma superior ser completamente permeável, tenha ocorrido um sucessivo transporte das partículas mais finas com a consequente diminuição do índice de vazios. Para além das evidências patentes na superfície do talude, constatou-se que na passagem hidráulica havia sinais desse arrastamento de partículas finas.

A ter ocorrido deste modo, a degradação do aterro antigo deve-se ter concentrado nas zonas exteriores do respectivo talude, afectando pouco significativamente o corpo do aterro, a menos das zonas em que a percolação da água tenha sido afectada pela presença da passagem hidráulica.

Para estabelecer o zonamento do maciço de acordo com a hipótese feita resolveu-se fazer alguns estudos da disposição das linhas de corrente do fluxo da água através do corpo do aterro (Mendonça, 1997). Como conclusão desses estudos definiu-se o zonamento esquematizado na Figura 12, admitindo-se que na zona superficial (Zona 1) as características mecânicas do material do aterro se foram degradando ao longo do tempo, sendo actualmente substancialmente inferiores às do corpo do aterro (Zona 2).

O efeito desfavorável para a estabilidade do talude resultante da degradação das propriedades resistentes do material constituinte do aterro foi contrabalançado pelo efeito favorável conferido pela resistência das raízes da vegetação que, entretanto, se fixou na superfície do talude.

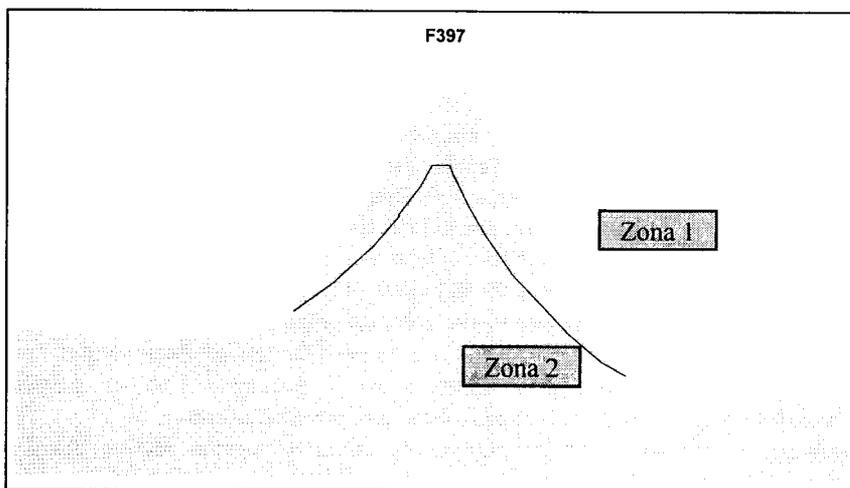


Fig. 12 - Zonamento das propriedades dos materiais do talude

No sentido de perceber a influência que a degradação do aterro, por um lado, e a contribuição das raízes, por outro, terão tido na segurança do talude, consideraram-se as três situações referenciadas no Quadro 2, a que correspondem os cálculos com as designações aí indicadas. Para cada uma das situações procedeu-se a uma análise determinística, usando os valores médios das variáveis, e a uma análise probabilística, em que aquelas são definidas pelas respectivas funções de distribuição de probabilidade. Nos cálculos probabilísticos as variáveis foram consideradas independentes umas das outras.

6.2 - Caracterização dos materiais

Os dados principais necessários para a aplicação do programa de cálculo automático foram obtidos a partir dos resultados dos ensaios executados, resumidos na secção 4, os quais permitiram caracterizar variáveis aleatórias definidas pelas suas distribuições de frequência acumulada, bem como os respectivos valores médios.

No que respeita às raízes, cuja contribuição para a estabilidade do talude é considerada através das equações (6) e (7), houve necessidade de definir todas as grandezas que intervêm nessas equações. No Quadro 3 indica-se os valores médios adoptados.

Quadro 2
Cálculos efectuados

Situação	Análise determinística	Análise probabilística
Inicial ⁽¹⁾ sem raízes	1D	1P
Actual ⁽²⁾ sem raízes	2D	2P
Actual ⁽²⁾ com raízes	2RD	2RP

⁽¹⁾ Resistência do solo da Zona 1 idêntica à do solo da Zona 2

⁽²⁾ Resistência do solo da Zona 1 inferior à do solo da Zona 2

Quadro 3
Valores médios dos parâmetros caracterizadores das raízes

Diâmetro d_R	Comprimento L_a	Número de raízes por unidade de área, N_f	Resistência à tracção, σ_R	Resistência ao arranque, τ_a	Distorção θ
0,01 m	0,45 m	264	16,5 MPa	59 kPa	55

Para proceder às análises probabilísticas foram definidas as distribuições de frequências acumuladas. Nas Figuras 11a, b e c apresenta-se as correspondentes, respectivamente, ao diâmetro, d_R , ao comprimento, L_a , e ao número de raízes por unidade de área, N_f . Nas Figuras 13a e b mostra-se, respectivamente, as da resistência à tracção, σ_R , e da resistência ao arranque, τ_a . Com excepção da primeira (Figura 11a) todas as restantes curvas obtidas foram aproximadas por outras de forma mais simples de modo a facilitar o seu tratamento.

No que concerne à distorção, θ , da consulta da bibliografia especializada concluiu-se que: a) resultados obtidos em ensaios *in situ* realizados por Waldron e Kessian (1977) mostram que θ varia entre 45 e 50°; b) Wu *et al.* (1979) observaram em roturas de taludes que aquele parâmetro varia entre 45 e 70°. Consequentemente, resolveu-se considerar para a distorção, θ , uma distribuição de frequência relativa constante entre os valores 40 e 70°.

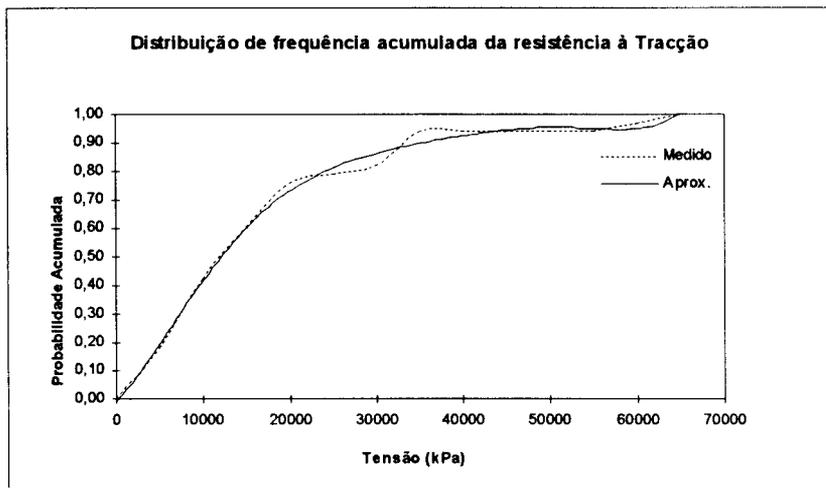
Devido ao reduzido número de determinações dos parâmetros de resistência do terreno complementou-se a gama de valores obtida com outras informações, nomeadamente, a correlação com a inclinação do talude. No Quadro 4 apresentam-se os valores usados nos cálculos.

6.3 - Resultados dos cálculos determinísticos. Comentários

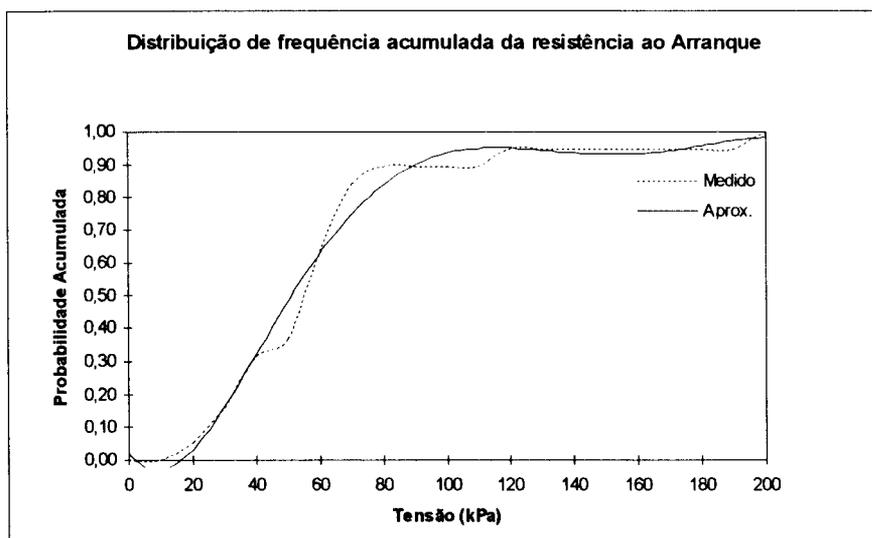
No Quadro 5 indica-se os factores de segurança obtidos nos três cálculos realizados. Nestes cálculos consideram-se os valores médios dos parâmetros relativos às raízes (Quadro 3) e às duas zonas do aterro (Quadro 4). Porém, para a Zona 1, quando a esta são atribuídas características inferiores às da Zona 2 (cálculos 2D e 2RD), supôs-se c' nulo em vez de igual aos 5kPa, indicados no Quadro 4.

No Quadro 5 inclui-se também os valores obtidos pela aplicação do programa comercial SLOPE/W, desenvolvido pela empresa Geo-Slope International Ltd.. Neste caso as características atribuídas foram exactamente as mesmas que foram consideradas na aplicação do programa desenvolvido pelos autores. Exceptua-se, naturalmente, o modo de considerar o

efeito das raízes, que foi feito atribuindo à porção de terreno afectado por elas uma coesão de 50kPa.



a)



b)

Fig. 13 - Distribuição de frequência acumulada da resistência: a) à tracção; b) ao arranque

Quadro 4
Gama de valores do material do aterro

Zona	Valor	Grandeza		
		γ (kN/m ³)	ϕ' (°)	C' (kPa)
1	Mínimo	16	30	0
	Médio	18	35	5
	Máximo	20	40	10
2	Constante	20	40	10

Quadro 5
Factores de segurança obtidos nos cálculos determinísticos

Programa aplicado	Cálculo		
	1D	2D	2RD
Desenvolvido pelos autores	1,75	0,90	1,20 ⁽¹⁾
SLOPE/W	1,76	0,90	1,22 ⁽²⁾

⁽¹⁾ O efeito das raízes é tido em conta através dos seus parâmetros

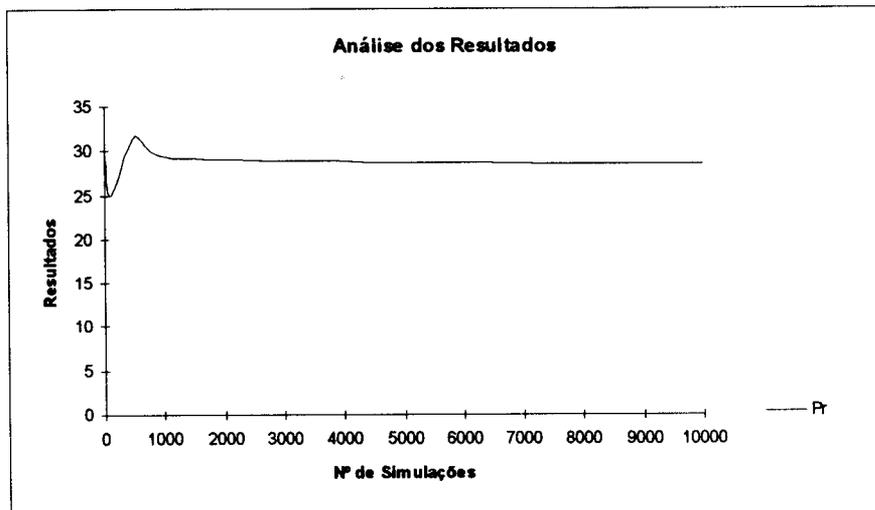
⁽²⁾ Atribui-se à zona vegetalizada uma coesão de 50kPa

Como seria de esperar, os resultados obtidos nos cálculos 1D e 2D pelas duas vias são praticamente coincidentes. Quanto aos cálculos 2RD, nos quais se entra em linha de conta com as raízes, constata-se que, no caso presente, a coesão de 50kPa simula de forma adequada o contributo daquelas para a segurança global.

6.4 - Resultados do cálculo probabilístico. Comentários

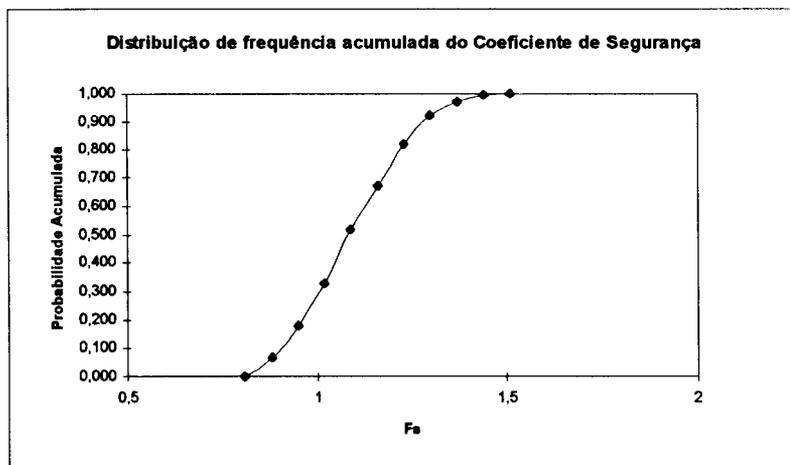
De modo a quantificar a influência do número de simulações nos resultados dos cálculos probabilísticos, a modelação 2RP (características aleatórias do terreno e das raízes) foi efectuada com 10, 100, 500, 1000, 5000 e 10000 simulações. Na Figura 14 apresenta-se a probabilidade de rotura em função do número de simulações, podendo afirmar-se que os resultados estabilizam para um número de simulações da ordem de um milhar.

No Quadro 6 resume-se os resultados da aplicação do programa para as três situações atrás definidas, considerando uma modelação com 100 simulações. No caso do cálculo 2RP também se apresenta os resultados obtidos com 1000 simulações que, como se viu, corresponde à quantidade para a qual os resultados estabilizam. Para este último caso, na Figura 15 mostra-se a distribuição de frequência acumulada do factor de segurança.



Quadro 6
Resultados dos cálculos probabilísticos

	Cálculo			
	1P	2P	2RP(100simulações)	2RP(1000simulações)
$F_{Smin} - F_{Smáx}$	1,32 - 2,12	0,79 - 1,16	0,84 - 1,38	0,81 - 1,51
$F_{Smédio}$	1,73	0,99	1,10	1,09
Desvio padrão, σ_{FS}	0,16	0,11	0,14	0,14
Probab. de rotura, P_c (%)	0,00	49,00	25,00	29,40



Comparando os factores de segurança médios obtidos nas análises probabilísticas com os retirados das análises determinísticas conclui-se que:

1. nos cálculos 1P ($F_{Smédio} = 1,73$) e 1D ($F_S = 1,75$) eles são praticamente iguais;
2. no cálculo 2P ($F_{Smédio} = 0,99$) obteve-se um valor superior ao do 2D ($F_S = 0,90$) porque, enquanto neste se supôs nula a coesão na Zona 1, naquele se considerou para este parâmetro os valores indicados no Quadro 4;
3. no cálculo 2RP ($F_{Smédio} = 1,09$) obteve-se um valor inferior ao do 2RD ($F_S = 1,20$) apesar de, para a Zona 1, a coesão atribuída ser superior no primeiro caso; tal é devido ao facto de as distribuições de frequência relativa das variáveis aleatórias que caracterizam as raízes serem não simétricas, sendo portanto diferentes as respectivas médias e medianas (valores para os quais as distribuições de frequência acumulada são iguais a 0,5), tendo sido considerados nas análises determinísticas os valores médios.

Os valores obtidos da probabilidade de rotura são muito elevados mas, na verdade, não correspondem à realidade. Isto porque nos cálculo se usaram directamente as distribuições de probabilidade obtidas nos ensaios, o que supõe uma variabilidade muito maior do que a real. Com efeito, como na análise da segurança intervêm superfícies de deslizamento com uma certa extensão, interessando, por isso, zonas do terreno onde as propriedades assumem diversos valores, quer baixos, quer elevados, a variabilidade dos valores médios dos parâmetros ao longo dessas extensões é, obviamente, substancialmente inferior à obtida nos ensaios, tanto mais quanto maior for o desenvolvimento das superfícies de deslizamento.

Sendo F_{Sm} e σ_{FS} , respectivamente, o valor médio e o desvio padrão da distribuição do factor de segurança, pode definir-se o índice de fiabilidade, β , pela seguinte expressão

$$\beta = (F_{Sm} - 1) / \sigma_{FS} \quad (9)$$

No cálculo 2RP obteve-se $\beta = 0,64$, para uma confiança de $(1 - P_c) = 0,71$. Por outro lado, considerando uma distribuição obedecendo à lei normal, a um $\beta = 0,64$ corresponde uma confiança de aproximadamente 0,74. Infere-se, assim, que a distribuição do coeficiente de segurança está próxima desse tipo de lei, apesar de ser obtida a partir de distribuições que se afastam mais ou menos, conforme os casos, da lei normal.

7 - CONCLUSÕES

Usou-se o caso de um aterro ferroviário antigo para ilustrar a contribuição da cobertura vegetal para a estabilidade desse tipo de taludes, construídos com técnicas rudimentares e muito degradados pela passagem do tempo. Foi levada a cabo uma campanha experimental com aspectos peculiares, adaptados aos fins em vista. Em termos de ferramentas de cálculo, adaptou-se um modelo baseado em metodologias de equilíbrio limite de modo a incorporar o efeito das raízes e a permitir também a realização de análises probabilísticas, baseadas no método de Monte Carlo.

Os resultados dos ensaios efectuados, a aplicação do modelo numérico e a análise dos respectivos resultados permitem retirar as seguintes conclusões:

- 1) os aterros ferroviários antigos encontram-se, em muitos casos, degradados, apresentando, sobretudo as camadas superficiais, características mecânicas reduzidas em relação às do corpo dos aterros; essa degradação é devida em grande medida à percolação da água, facilitada pela permeabilidade da plataforma superior;

- 2) essa degradação pode fazer com que os coeficientes de segurança dos taludes sejam inferiores à unidade, se apenas for tido em conta os parâmetros intrínsecos dos materiais de aterro;
- 3) nestas circunstâncias a vegetação pode desempenhar um papel fundamental na estabilidade dos taludes; no caso estudado, a consideração da cobertura vegetal do talude incrementa o respectivo coeficiente de segurança em cerca de 25%;
- 4) o incremento da resistência conferido pela cobertura vegetal pode ser interpretado como uma coesão adicional de uma camada de solo superficial;
- 5) a análise probabilística efectuada permitiu balizar os coeficientes de segurança e a probabilidade de rotura do talude tendo em conta a variabilidade das características do terreno e da vegetação.

8 - 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

- CARDOSO, A. S.; TORRES, F.; FREITAS, F.; VIANA, A.; CABRAL, M. - *Programa de análise da estabilidade de taludes usando superfícies de deslizamento circulares*. (Não publicado) Departamento de Engenharia Civil, FEUP, Porto, 1991.
- DINIS DA GAMA, C. - *Reprojecto de dois taludes com abordagem probabilística da estabilidade*. 5º Congresso Nacional de Geotecnia, Coimbra, Vol. 1, pp. 85-95, 1995.
- ENDO, T.; TSURUTA, T. - *The effect of tree roots upon the shearing strength of soil*. Annual Report nº 18, Hokkaido Branch, Forest Experiment Station, Tokyo, pp. 168-179, 1969.
- GEOCONTROLE - *Linha do Douro: Valongo-Cête, Rel. Geológico-Geotécnico*. Lisboa, 1984.
- MENDONÇA, A. A. - *Um estudo sobre aterros ferroviários antigos*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Estruturas de Engenharia Civil, FEUP, Porto, 1997.
- MENDONÇA, A. A.; CARDOSO, A. S. - *Vegetalização de taludes. O efeito de reforço das raízes*. (Enviado para publicação) Geotecnia, SPG, 1998.
- O'LOUGHLIN, C. L. - *The effect of timber removal on the stability of forest soils*. Journal of Hydrology, New Zealand, nº 13, pp. 121-134, 1974.
- O'LOUGHLIN, C. L. - *Effectiveness of introduced forest vegetation for protecting against landslides and erosion in New Zealand's steep lands*. Symposium on effects of forest land use on erosion and slope stability, Honolulu, Hawaii, 1984.
- WALDRON, L. J.; KESSIAN, S. D. - *The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil*. Soil Science American Journal, Vol. 41, pp. 843-849, 1977.
- WU, T. H.; BEAL, P. E.; LAN, C. - *In-situ shear test of soil-root systems*. Journal of the Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol. 114, nº 12, pp. 1375-1394, 1988.
- WU, T. H.; MCKINNELL, W. P.; SWANSTON, D. N. - *Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska*. Canadian Geotechnical J., nº 16, pp. 19-33, 1979.
- WU, T. H.; MCOMBER, R. M.; ERB, R. T.; BEAL, P. E. - *Study of soil-root interaction*. Journal of the Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol. 114, nº 12, pp. 1351-1375, 1988.
- ZIEMER, R. R. - *Roots and the stability of forested slopes*. International Association of Hydrology, nº 132, pp. 343-361, 1981.