



Daniela Pratas Mariano

Licenciada em Engenharia Geológica

Efeito do coberto vegetal no reforço e na proteção de taludes

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Geológica (Geotecnia)

Orientador: Prof. Doutor Pedro Calé da Cunha Lamas,
FCT/UNL

Co-orientador: Doutor Eng.º Carlo Bifulco, CEABN - ISA/UL,
APENA



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro 2015



Daniela Pratas Mariano

Licenciada em Engenharia Geológica

Efeito do coberto vegetal no reforço e na proteção de taludes

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Geológica (Geotecnia)

Orientador: Prof. Doutor Pedro Calé da Cunha Lamas,
FCT/UNL

Co-orientador: Doutor Eng.º Carlo Bifulco, CEABN - ISA/UL,
APENA



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro 2015

Efeito do coberto vegetal no reforço e na proteção de taludes

Copyright ©2015: Daniela Pratas Mariano, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Pedro Lamas pela orientação, amizade e disponibilidade demonstrada para a execução deste trabalho. Igualmente agradeço o fornecimento da documentação inicial necessária à execução do mesmo, bem como a revisão crítica do texto, à qual dou muito valor.

Ao Doutor Carlo Bifulco, agradeço todo o apoio prestado no capítulo da Engenharia Natural, nomeadamente por facultar informação sobre bibliografia adequada, pelas úteis indicações versando matérias que para mim foram novidade e pela revisão crítica do texto.

Ao Engenheiro Aldo Freitas, pela pronta disponibilidade em colaborar, facultando importantes dados de cariz teórico e prático.

Às Infraestruturas de Portugal e à empresa Ecosalix, pela disponibilização de informação indispensável à realização desta dissertação.

Ao colega João Santos, pela sua amizade, boa disposição, prontidão em ajudar e motivação dada ao longo de toda a minha vida académica.

À Joaquina Candeias pela amizade demonstrada que considero de valor inestimável, não tendo palavras para exprimir o apreço que tenho por esta grande amiga.

Por fim, mas com importância primordial, agradeço aos meus pais, à minha irmã e ao meu cunhado, sem dúvida os meus melhores amigos, que com amor, carinho e paciência me têm ajudado em todas as fases da minha vida a ultrapassar as minhas dificuldades e receios, o que me permitiu chegar até aqui. A todos vocês um Muito Obrigada!

À minha família

RESUMO

A vegetação afeta o comportamento dos taludes sob a ação dos agentes da geodinâmica externa. Neste pressuposto, analisam-se no presente trabalho os seus efeitos no reforço e na proteção de taludes, com destaque para o papel das raízes para atingir esses objetivos.

Numa segunda fase e tendo em conta a necessidade do uso da vegetação para reconstruir habitats, valorizar paisagisticamente o território e aumentar a segurança dos espaços, é abordado o assunto da Engenharia Natural. Trata-se de um acervo de técnicas que utilizam as plantas vivas como elementos principais do processo construtivo. São referidas as principais problemáticas desta ferramenta, as metodologias empregues e o modo como são aplicadas na proteção, estabilização e contenção dos taludes.

Para que a aplicação de tais técnicas seja viável, é importante selecionar para cada situação geoambiental e climática o tipo mais apropriado de espécies vegetais. Por isso, numa terceira fase, enumeram-se as espécies consideradas mais adequadas em Portugal para esta finalidade e são dados a conhecer alguns casos de aplicação no referido país de técnicas de Engenharia Natural em taludes.

Palavras-chave: vegetação, talude, proteção, estabilidade, Engenharia Natural

ABSTRACT

Vegetation affects the behavior of slopes under the action of the external geodynamic agents. Starting from this assumption, the effects of vegetation on slope stabilization and protection are analyzed, highlighting the role of roots to achieve these goals.

In a second phase, taking into account the need for the application of vegetation to rebuild habitats, enhance landscape and improve safety, the subject of Soil Bioengineering is attended. It is an assortment of techniques which employs living plants as key elements of the construction process. The main goals of this tool are reported, so as the selected methodologies and the way they are applied in order to protect, stabilize and consolidate hill slopes.

In order to make possible the application of such techniques, it is important to select for each geo-environmental and climatic conditions the most appropriate type of vegetable specimens. Therefore, in a third and final stage, the most suitable species used in Portugal for this purpose are cited and a few cases of applications of Soil Bioengineering techniques on slopes in the country are reported.

Keywords: vegetation, slope, protection, stabilization, Soil Bioengineering

ÍNDICE DE MATÉRIAS

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO DO TEMA	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
2 A VEGETAÇÃO COMO ELEMENTO DE ESTABILIZAÇÃO E DE PROTEÇÃO DE TALUDES.....	5
2.1 ASPETOS GERAIS SOBRE O COBERTO VEGETAL	6
2.2 INFLUÊNCIA DAS RAÍZES NAS CONDIÇÕES DE ESTABILIDADE.....	14
2.2.1 EFEITOS MECÂNICOS	18
2.2.1.1 REFORÇO.....	18
2.2.1.2 ANCORAGEM E ARQUEAMENTO	23
2.2.2 EFEITOS HIDROLÓGICOS.....	25
2.2.2.1 INFILTRAÇÃO	25
2.2.2.2 EVAPOTRANSPIRAÇÃO	26
2.2.2.3 FENDAS DE DESSECAÇÃO.....	26
2.3 PROTEÇÃO CONTRA A EROÇÃO.....	26
2.4 PROTEÇÃO CONTRA A QUEDA E ROLAMENTO DE BLOCOS	32
2.5 REMOÇÃO DA VEGETAÇÃO POR CAUSAS NATURAIS E ANTRÓPICAS	34
2.5.1 INCLINAÇÃO DO TALUDE	35
2.5.2 SOBRECARGA	37
2.5.3 AÇÃO DO VENTO	37
2.5.4 CAUSAS ANTRÓPICAS.....	38
3 A ENGENHARIA NATURAL NA ESTABILIZAÇÃO E REABILITAÇÃO DE TALUDES	41
3.1 ENQUADRAMENTO.....	41
3.2 DOMÍNIOS DE APLICAÇÃO.....	42
3.3 VANTAGENS E LIMITAÇÕES DA ENGENHARIA NATURAL	43
3.4 TÉCNICAS DE ENGENHARIA NATURAL	45
3.4.1 PROTEÇÃO CONTRA A EROÇÃO	49
3.4.2 ESTABILIZAÇÃO	51
3.4.3 CONTENÇÃO	55
3.4.4 DRENAGEM	60
3.5 MANUTENÇÃO DAS TÉCNICAS DE ENGENHARIA NATURAL	62
3.6 CASO DE ESTUDO DA APLICAÇÃO DE FAIXAS DE VEGETAÇÃO	63
3.6.1 ASPETOS GERAIS.....	63
3.6.2 DESCRIÇÃO DO ENSAIO	64
4 APLICAÇÃO EM PORTUGAL DO COBERTO VEGETAL NA ESTABILIZAÇÃO E PROTEÇÃO DE TALUDES	69
4.1 MATERIAIS VIVOS UTILIZADOS EM ENGENHARIA NATURAL	69
4.1.1 SEMENTES.....	71
4.1.2 ESTACAS	77
4.1.3 PLANTAS	77

4.2 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO.....	81
5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	87
5.1 CONCLUSÕES.....	87
5.2 TRABALHOS FUTUROS	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Aspeto das árvores e dos arbustos.....	6
Figura 2.2 - Aspeto das gramíneas e das herbáceas.....	7
Figura 2.3 - Efeitos hidrológicos e mecânicos da vegetação.....	8
Figura 2.4 - Secção de um talude infinito em condições não saturadas	11
Figura 2.5 - Secção de um talude infinito saturado, com percolação	12
Figura 2.6 - Efeito da coesão aparente conferida pelas raízes ao solo	13
Figura 2.7 - Variação do fator de segurança com o ângulo de talude nos casos com e sem vegetação.....	14
Figura 2.8 - Padrões de crescimento das raízes	15
Figura 2.9 - Classificação das raízes em classes.....	16
Figura 2.10 - Esquema de classificação dos taludes baseado no reforço e ancoragem pelas raízes..	18
Figura 2.11 - Resistência ao corte das raízes em solo arenoso.....	19
Figura 2.12 - Esquema do ensaio de resistência ao corte <i>in situ</i> de um solo reforçado por raízes.....	19
Figura 2.13 - Variação da resistência ao corte de uma areia fina com o número de raízes de pinheiro.....	20
Figura 2.14 - Modelo de reforço de raiz perpendicular.....	21
Figura 2.15 - Modelo de reforço de raiz inclinada	22
Figura 2.16 - Variação da resistência ao corte com o ângulo de inclinação inicial das raízes	23
Figura 2.17 - Representação da ação de ancoragem, suporte de contenção e arqueamento	24
Figura 2.18 - Esquema de situação de deslizamento potencial	24
Figura 2.19 - Ensaio de erodibilidade.....	29
Figura 2.20 - Erosão do solo, com e sem cobertura vegetal, em função da inclinação da rampa	30
Figura 2.21 - Erosão do solo sem cobertura vegetal, em função do tempo de pluviosidade.....	31
Figura 2.22 - Modelos de movimento de queda de blocos de rocha	33
Figura 2.23 - Aspeto do pinhal na encosta da Trafaria.....	34
Figura 2.24 - Bloco rochoso destacado do topo da encosta da Trafaria, imobilizado junto ao muro exterior do forte	34
Figura 2.25 - Variação do coeficiente de segurança global devido à desflorestação	35
Figura 2.26 - Efeito do ângulo de talude na ocorrência de movimentos de massa	36
Figura 2.27 - Aspeto das cavidades abertas pelo desenraizamento	36
Figura 2.28 - Efeito da sobrecarga do peso das árvores.....	37
Figura 2.29 - Variação do reforço total das raízes do Lilás da Califórnia após a desflorestação	38
Figura 3.1 - Comparação entre a eficiência das intervenções de Engenharia Natural e as tradicionais.....	44
Figura 3.2 - Conjuntos de técnicas de Engenharia Natural	46
Figura 3.3 - Esquema explicativo do princípio do nível mínimo de energia.....	48
Figura 3.4 - Hidrossementeira	49

Figura 3.5 - Manta orgânica	50
Figura 3.6 - Geomalha tridimensional	50
Figura 3.7 - Estacas vivas	51
Figura 3.8 - Faxinas vivas como reforço de taludes de margem de ribeira	52
Figura 3.9 - Secção transversal de um talude estabilizado com faxinas vivas.....	52
Figura 3.10 - Entrançado vivo	53
Figura 3.11 - Faixa de vegetação.....	54
Figura 3.12 - Biorolo.....	54
Figura 3.13 - Gabião cilíndrico.....	55
Figura 3.14 - Paliçada viva.....	55
Figura 3.15 - Muros de suporte vivos	56
Figura 3.16 - Aspeto construtivo de um muro de madeira tipo <i>cribwall</i> em secção transversal	56
Figura 3.17 - Muro vivo armado	57
Figura 3.18 - Muro de betão tipo <i>cribwall</i> plantado.....	57
Figura 3.19 - Enrocamento vivo	58
Figura 3.20 - Gabião vivo	58
Figura 3.21 - Aspetos construtivos de um gabião vivo	59
Figura 3.22 - Aplicação de terra reforçada em talude de autoestrada, Itália	59
Figura 3.23 - Grade viva.....	60
Figura 3.24 - Representação de um dreno de faxina viva do tipo escova viva.....	61
Figura 3.25 - Colchões vivos com desenvolvimento de estacas de salgueiro.....	62
Figura 3.26 - Aspeto das faixas de vegetação	63
Figura 3.27 - Equipamento para ensaios de arrancamento (ou rotura por tração) de estacas	65
Figura 3.28 - Exemplos dos resultados dos ensaios para diferentes valores de σ_n	65
Figura 3.29 - Alguns parâmetros utilizados no cálculo do coeficiente de segurança global	66
Figura 3.30 - Fator de segurança global num talude de areia mal graduada ($c=0$, $\varphi'=32^\circ$, $\gamma =19\text{kN/m}^3$) estabilizado por faixas de vegetação	67
Figura 4.1 - Principais propriedades das plantas tendo em vista a sua utilização na Engenharia Natural.....	69
Figura 4.2 - Aspeto da aplicação de sementeiras em taludes de auto estradas nacionais	76
Figura 4.3 - Desenvolvimento de raízes numa estaca enterrada	77
Figura 4.4 - Aspeto geral do trecho da ribeira intervencionado	81
Figura 4.5 - Sequência de trabalhos da obra de Rio de Couros.....	82
Figura 4.6 - Aspeto da aplicação de manta orgânica e sementeira.....	82
Figura 4.7 - Aspeto geral do trecho da ribeira intervencionado	83
Figura 4.8 - Talude da ZPE	83
Figura 4.9 - Aspeto do talude da A21, nó da Malveira	84
Figura 4.10 - Local a ser intervencionado com técnicas de Engenharia Natural.....	85

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Efeitos da vegetação na estabilidade de taludes	9
Tabela 2.2 - Resistência à tração de raízes de abeto-de-Douglas em função do seu diâmetro e localização.....	16
Tabela 2.3 - Valores da resistência à tração para diferentes grupos de plantas.....	17
Tabela 2.4 - Parâmetros estruturais das raízes com influência nos processos erosivos e de instabilidade dos terrenos.....	28
Tabela 3.1 - Vantagens e desvantagens da utilização das plantas e de materiais inertes.....	43
Tabela 4.1 - Adequação dos tipos de plantas a aplicações de engenharia.....	70
Tabela 4.2 - Exemplos de misturas de sementes aplicadas em taludes íngremes	71
Tabela 4.3 - Critérios de distinção de três tipos de sementeira.....	76
Tabela 4.4 - Espécies adequadas para aplicação nas obras de Engenharia Natural	78
Tabela 4.5 - Técnicas aplicadas na obra do Nó da Malveira.....	84
Tabela 5.1 - Síntese das intervenções de Engenharia Natural realizada em Portugal nos últimos anos.....	88

SÍMBOLOS

ALFABETO LATINO

A_R	Área total das secções transversais de todas as raízes numa dada fração de solo de área A
A	Área de solo considerada
a_i	Área da secção transversal das raízes da classe de tamanho i
c'	Coesão efetiva
c_a	Coesão aparente
CSA	Área de secção transversal
H	Efeito hidrológico
i	Ângulo inicial de inclinação da raiz
L	Comprimento da raiz
l_1	Espaçamento vertical entre degraus de faixas vegetativas
M	Efeito mecânico
m	Nível freático
NR	Número de raízes
RAR	Razão de área radicular
RD	Densidade do sistema radicular
RLD	Densidade de comprimento da raiz
$R_{po}(z)$	Resistência total ao arranque das estacas (em função da profundidade, z)
RSD	Taxa de degradação relativa do solo
k	Razão de distorção cisalhante
K_g	Erodibilidade em barrancos
K_i	Erodibilidade laminar
K_r	Erodibilidade em sulcos
N	Força normal da faceta elementar
n	Número de estacas vivas por metro de faixa
n_i	Número de raízes da classe de tamanho i
S	Resistência ao corte do solo não reforçado por raízes
S_R	Resistência ao corte do solo reforçado por raízes
T	Força tangencial da faceta elementar
T_i	Resistência à tração das raízes de classe de tamanho i
T_R	Resistência à tração média das raízes por unidade de área de solo
t_R	Resistência à tração média das raízes por unidade de área
W	Peso da faceta elementar
z	Profundidade
ZPE	Zona de proteção especial

ALFABETO GREGO

α	Ângulo de inclinação da superfície de corte
β	Ângulo de inclinação do talude
γ	Peso volúmico natural
γ_w	Peso volúmico da água
γ_s	Peso volúmico peso volúmico saturado
γ'	Peso volúmico submerso
ΔS	Variação da resistência ao corte
θ	Ângulo de distorção na zona cisalhante
σ'	Tensão normal efetiva
σ_n	Tensão de confinamento
τ	Tensão tangencial
τ_R	Tensão de resistência ao corte
φ'	Ângulo de resistência ao corte em tensões efetivas

SIGLAS E ABREVIATURAS

<i>et al.</i>	<i>et alii</i> – e outros
<i>e.g.</i>	<i>exempli gratia</i> – por exemplo
FS	fator (coeficiente) de segurança
<i>op. cit.</i>	<i>opus citatum</i> – obra citada
s.d.	sem data

1 INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO DO TEMA

A cobertura vegetal desempenha um papel importante na estabilização e proteção de taludes. A sua remoção pode envolver impactos negativos relevantes nas áreas declivosas mais sujeitas à ação dos agentes da geodinâmica externa.

Os profundos cortes abertos no terreno aquando da execução de obras rodoviárias, por exemplo, são quase sempre acompanhados pela execução de taludes de escavação e de aterro que, em fases preliminares das obras, apresentam um forte impacto visual devido ao contraste profundo atribuído à ausência de vegetação.

Porém, aquele impacto visual está longe de ser o único aspeto negativo a ter em conta. Ainda no caso dos taludes de escavação de uma rodovia, o acréscimo da inclinação produzido pelas obras altera as condições de estabilidade dos terrenos, tornando-os propícios a mecanismos de rotura, para os quais as águas de infiltração desempenham papel importante, e ao desencadeamento de movimentos de terrenos. Por outro lado, no seguimento às primeiras chuvas, a superfície previamente nivelada dos taludes que ladeiam a via sofre erosão hídrica, tanto pelo impacto direto no solo das gotas da chuva como pelo arrastamento de partículas pelas águas de escorrência superficial. Os taludes, para além de instáveis, sofrem ravinamento passando a apresentar sulcos mais ou menos profundos, o que resulta na acumulação do material arrastado junto ao sopé, preenchendo a valeta.

É precisamente devido à sua ação contra a erosão e algum efeito na estabilização de taludes terrosos, para além do efeito estético conferido à paisagem, que a vegetação tem sido empregue em diversas obras de engenharia onde se criem taludes tanto de escavação como de aterro, incluindo a sua utilização na estabilização de aparelhos dunares e, portanto, em taludes naturais.

Relativamente à erosão, o efeito protetor do coberto vegetal faz-se a três níveis distintos, descritos do nível superior ao inferior por Henesal, 1993: a uma primeira camada viva, de interseção, pairando a certa distância do solo (alguns metros, no caso de árvores), segue-se um estrato pouco espesso, que contacta diretamente a superfície do solo. Subjacente a este, a camada mais superficial do solo é composta por uma mistura de partículas minerais, raízes vivas e diversos detritos vegetais num estado de decomposição mais ou menos avançado. Conforme se verificará no segundo capítulo do presente trabalho, a vegetação baixa, de tipo herbáceo, joga um papel protetor contra a erosão diferente do da arbustiva e arbórea, mais alta.

Quanto ao efeito estabilizador dos terrenos que constituem os taludes, esse será devido essencialmente à presença das plantas lenhosas. De facto, estas últimas são as mais favoráveis para aumentar a resistência ao corte dos solos, diminuindo o seu teor em água e/ou reforçando-o mecanicamente ao envolve-lo com as raízes, retendo os terrenos que deslizam de montante e, quando em grande número, produzindo uma barreira eficaz contra a queda de pedras e blocos de rocha. Por outro lado as lenhosas, nomeadamente as de grande porte, oferecem alguns efeitos contrários à estabilidade ao imporem sobrecargas ao talude com componente instabilizadora eventualmente importante, ao transmitirem vibrações pelo efeito do vento contra as copas e, no caso de taludes rochosos, são importantes agentes desagregadores do maciço onde assentam por alargamento das fissuras pelas raízes.

1.2 OBJETIVOS

A presente dissertação insere-se no âmbito do Mestrado em Engenharia Geológica (Geotecnia) pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Tem como objetivo desenvolver a temática da proteção e/ou estabilização de taludes com vegetação, principalmente com base na pesquisa bibliográfica sobre os estudos de vários autores realizados até à atualidade, destacando os seguintes assuntos:

- Função de proteção dos taludes contra a erosão;
- Função de estabilização dos taludes contra movimentos de terrenos;
- Função de proteção de pessoas e bens contra a queda e rolamento de blocos de rocha encosta abaixo;
- As plantas como elementos a empregar nas técnicas de engenharia para proteger e estabilizar os taludes.

Relativamente a este último ponto salienta-se que, dentro do contexto deste trabalho, o objetivo foi referir o papel das plantas enquanto elementos de construção, não sendo, pois, tecidas considerações aprofundadas de assuntos associados à botânica. Tais considerações não deixarão de ter relevância em trabalhos de índole mais prática, nos quais certas características intrínsecas das espécies utilizadas deverão ser analisadas.

Para complementar as informações obtidas pela pesquisa bibliográfica, estabelece-se contacto com empresas ligadas à área da Engenharia Natural, e da botânica.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos a que correspondem os seguintes conteúdos:

O capítulo 1 introdutório, onde constam os seguintes elementos: interesse do tema, enquadramento teórico dos assuntos tratados, referência aos objetivos do trabalho e indicação da sua estrutura geral.

O capítulo 2, em que são abordados aspetos sobre como o coberto vegetal interfere na estabilização e proteção de taludes, nomeadamente através das raízes, aludindo aos efeitos mecânicos e hidrológicos destas. É também referido de que modo a vegetação atua como elemento protetor contra a erosão das encostas, bem como de pessoas contra a queda e rolamento de blocos de rocha.

O capítulo 3, que trata do papel da Engenharia Natural na estabilização e proteção de taludes e no qual se descreve o conceito, os domínios de aplicação, as vantagens e limitações e o elenco de técnicas aplicadas. A estas considerações segue-se a apresentação de um caso de estudo sobre o recurso a uma técnica específica de Engenharia Natural, as faixas de vegetação, onde se discutem formas de aumentar a sua eficácia em estabilizar os taludes aquando da sua implementação.

O capítulo 4, onde são dados a conhecer os materiais vivos utilizados em Engenharia Natural, bem como casos em que estes foram empregues nas diversas técnicas executadas, até ao momento, em Portugal.

O capítulo 5, em que se apresentam as considerações finais, referindo-se aspetos passíveis de ser aprofundados em trabalhos futuros.

2 A VEGETAÇÃO COMO ELEMENTO DE ESTABILIZAÇÃO E DE PROTEÇÃO DE TALUDES

A remoção da cobertura vegetal dos taludes aumenta a sua erodibilidade e os efeitos instabilizadores, independentemente da intensidade dos agentes geodinâmicos envolvidos. Por outro lado, o revestimento vegetal dos taludes, quando associado à abertura de escavações ou à construção de aterros, beneficia a sua integração paisagística e diminui o impacto ambiental das alterações do meio provocadas pelo homem. Por estas razões, a presença e o tipo apropriado de vegetação nos taludes tem vindo a assumir cada vez maior importância nas obras de engenharia.

Desde que se passou a colocar este assunto na prática com Krabel, em 1936, a recorrer à vegetação para projetar, nos Estados Unidos, construções designadas por solo reforçado biologicamente (Mendonça & Cardoso, 1998), têm surgido várias considerações sobre o recurso ao coberto vegetal como elemento estabilizador e de proteção de taludes. A este respeito, algumas contribuições históricas, de acordo com Greenway (1987), foram dadas por:

- Terzaghi (1925), que enunciou o princípio das tensões efetivas, o qual influenciou os conceitos que se seguiram sobre estabilidade de taludes;
- White (1949), e Coaldrake (1954) que se referem à vegetação como elemento instabilizador;
- Croft & Adams (1950), que verificaram que a perda de suporte mecânico das raízes, provocada pela desflorestação no Estado do Utah, aumentou a frequência dos escorregamentos em taludes;
- Hudson (1971), que se referiu à vegetação como um fator importante contra a erosão;
- McLaughlin & Brown (1942) e Bache & MacAskill (1984), que estudaram o papel da vegetação na estabilização de dunas.

Em Portugal, tem sido dada maior importância ao efeito do coberto vegetal como elemento estabilizador e de proteção de taludes, apenas em anos mais recentes. Um dos precursores desta temática foi o arquiteto paisagista Francisco Caldeira Cabral (1908-1992) que abordou o assunto do revestimento dos taludes no contexto da integração da estrada na paisagem, referindo que tal revestimento tem-se tornado “uma exigência não apenas estética mas também técnica” (Cabral, 2003).

O recurso às plantas para fins de engenharia realça bem a importância de conhecer e tirar proveito de critérios de seleção considerados relevantes tendo em vista o objetivo de estabilização e/ou proteção de taludes. Assim, justifica-se que se faça uma abordagem introdutória na qual se distingam os diferentes tipos vegetais e a maneira como se desenvolvem.

2.1 ASPETOS GERAIS SOBRE O COBERTO VEGETAL

As plantas possuem diferentes formas e estruturas, sendo constituídas pelos seguintes elementos (Coppin & Richards, 2007):

- Raízes, que ancoram no terreno e absorvem água e nutrientes do solo;
- Caule para suportar as plantas no solo;
- Folhas, para realizar a fotossíntese;
- Flores, para os processos reprodutivos.

Árvores e arbustos possuem caule lenhoso (duro) (Figura 2.1). Diferem no facto de uma árvore ter um caule principal (tronco) e uma copa muito ramificada, ao passo que um arbusto apresenta vários caules. A altura atingida pelas árvores é, em geral, superior a 3 m. Já os arbustos são inferiores em altura, podendo exibir formações muito densas (CEF, 2009). Algumas espécies crescem a uma altura menor, da ordem dos 30 a 40 cm, ao passo que outras crescem a uma altura maior, acima dos 2 m (*op. cit.*, 2007)

Do ponto de vista de engenharia, destaca-se o papel dos sistemas radiculares dos arbustos e das árvores de menor porte em minimizar os efeitos causados pelas águas de escorrência superficial, bem como em maximizar a resistência dos solos, ao absorverem as águas das chuvas que neles se infiltram e ao promoverem um efeito agregador nos solos onde se inserem.

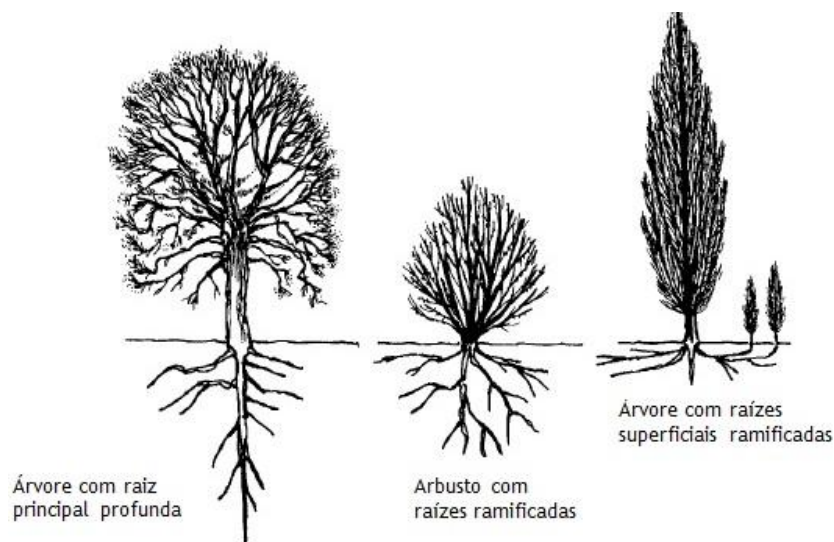


Figura 2.1 - Aspeto das árvores e dos arbustos (Coppin & Richards, 2007)

As herbáceas são plantas normalmente rasteiras, de caule não lenhoso, maleável, que não engrossa ao longo do seu crescimento (*op. cit.*, 2009) – Figura 2.2. As espécies herbáceas podem dividir-se nos grupos das gramíneas e das não gramíneas (e.g. as leguminosas e outras famílias).

Caracterizam-se pela sua capacidade de rápida disseminação no solo, promovendo um eficaz efeito anti erosivo, o que torna estas espécies úteis para aplicação em diferentes técnicas de engenharia.

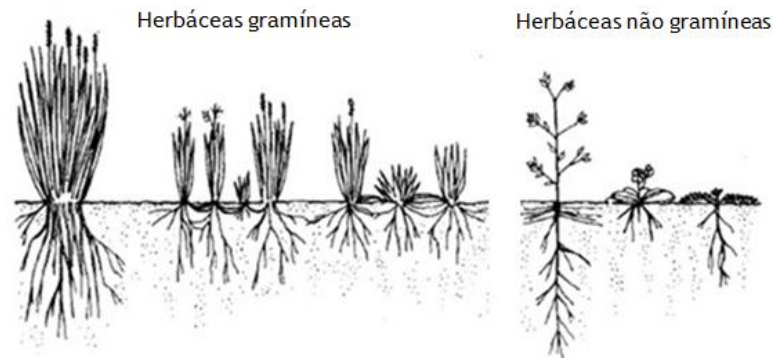


Figura 2.2 - Aspeto das gramíneas e das herbáceas (adaptado de Coppin & Richards, 2007)

Das espécies referidas, uma das características que melhor as distingue é o seu sistema radicular. Em geral, árvores e arbustos são portadores de raízes grandes (comparativamente às herbáceas), profundas e que constituem o esqueleto de fixação no solo. No entanto, esta particularidade não significa que, por si só, as árvores e arbustos fixem o solo, já que necessitam do auxílio das herbáceas e gramíneas para fixar as camadas superficiais de solo, por onde começa a erosão (Cabral, 2003). O sistema radicular das plantas pode desempenhar bem o seu papel de fixar o terreno desde que, sem descuidar outros fatores, as espécies a plantar sejam adequadas ao tipo de solo. Por exemplo, a relva proporciona uma melhor fixação mas em terrenos arenosos, ao passo que nas argilas tal já não acontece. Assim, a fixação dos taludes depende das raízes das plantas e não apenas da sua parte aérea, por isso Cabral (2003) defende que “um talude inteiramente revestido pode não estar nada fixado”.

As ações mecânicas e hidrológicas das plantas são fatores que influem na escolha e maneira como devem ser executadas determinadas obras de engenharia. Um dos investigadores que se debruçou sobre esta temática foi Greenway (1987) que considerou que os efeitos mecânicos e hidrológicos do coberto vegetal são os principais que influenciam a estabilidade de taludes (Figura 2.3). Os fatores mecânicos são determinados pelas interações das folhas ou das raízes com a superfície do talude e os hidrológicos são determinados pelo ciclo hidrológico, isto é, pela forma como a água entra e é retirada do solo (*op. cit.*).

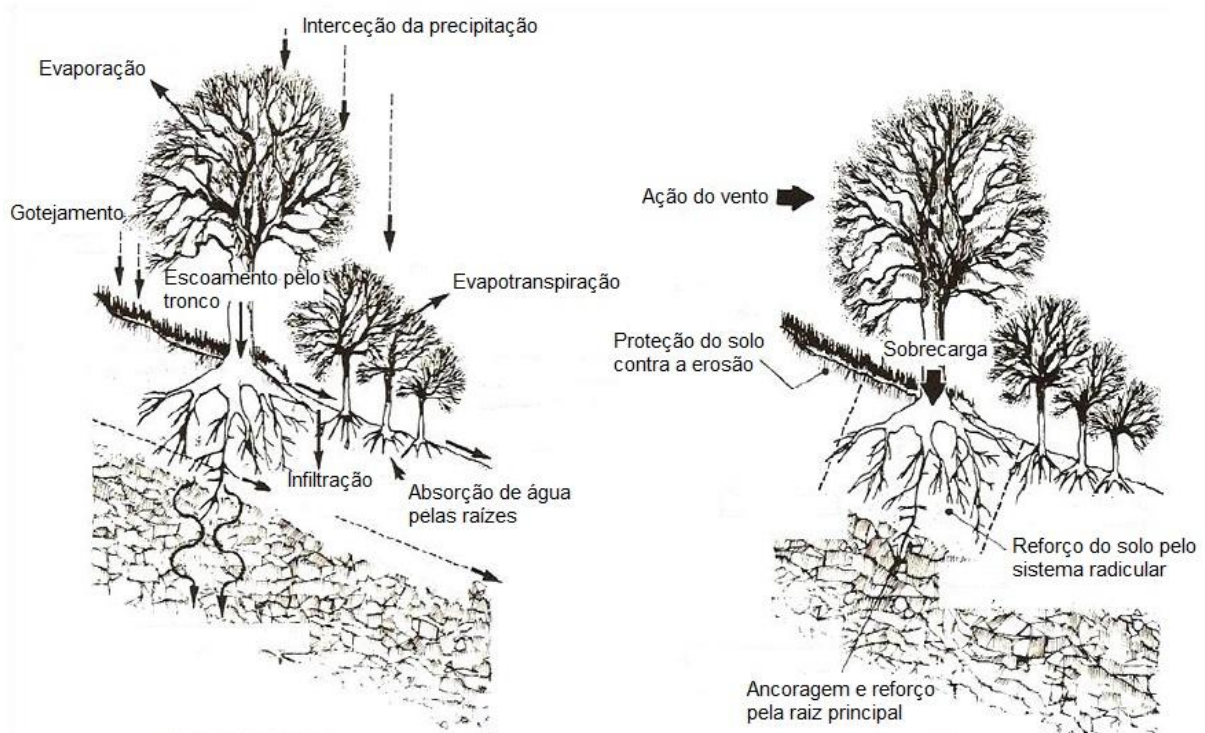


Figura 2.3 - Efeitos hidrológicos e mecânicos da vegetação (Coppin & Richards, 2007 in Sousa, 2015)

De entre os dois efeitos mencionados, Greenway (1987) distingue os positivos dos negativos, conforme a Tabela 2.1. Esta apresenta diferentes formas de como as raízes, o caule e as folhas das plantas influenciam a estabilidade dos taludes. Relativamente às raízes, vários autores afirmam que a penetração das mesmas nos maciços pode ter efeito tanto favorável como desfavorável. É o caso de Mendonça e Cardoso (1998) que consideram como efeito favorável a absorção de água por parte das raízes, uma vez que conduz à diminuição do teor em água nos maciços terrosos e como efeito desfavorável a abertura de fissuras e sua progressão, o que potencia a infiltração da água.

Quanto à folhagem, tal como no caso das raízes pode contribuir ou não para a estabilidade dos taludes. A este respeito Mendonça e Cardoso (*op. cit.*) distinguem os contributos da folhagem da vegetação arbórea e da que cobre a superfície. No caso da folhagem da vegetação de grande porte, ao intersestar as gotas da chuva, por um lado impede o seu impacto direto no solo e por outro possibilita que parte da água nas folhas se evapore, reduzindo, respetivamente, o efeito erosivo e de infiltração da água. Contudo, a acumulação da água da chuva nas folhas das copas promove a criação de gotas de grande volume que, ao caírem, provocam erosão por efeito *splash* arrancando pequenas partículas do solo. Quanto à folhagem que cobre a superfície do terreno a sua acumulação pode ter efeito benéfico uma vez que promove uma maior rugosidade superficial o que tem como consequência a diminuição da velocidade de escoamento de água.

Tabela 2.1 - Efeitos da vegetação na estabilidade de taludes (adaptado de Greenway, 1987; Donat, 1995)

Fatores hidrológicos	A folhagem intersecta as gotas de chuva, o que leva a perdas por absorção e evapotranspiração, reduzindo a água disponível para infiltração	Efeito positivo
	Raízes e caules levam ao aumento da rugosidade e da permeabilidade do solo, o que aumenta a capacidade de infiltração	Efeito negativo
	Raízes penetram nas fraturas do substrato rochoso, alargando-as, aumentando a permeabilidade no substrato	Efeito negativo
	Raízes retiram humidade do solo, a qual é lançada para a atmosfera por evapotranspiração	Efeito positivo
	A perda de humidade pode acentuar a abertura de fendas de dessecação na superfície do solo, facilitando a infiltração	Efeito negativo
Fatores mecânicos	As raízes das árvores suportam a camada de solo ao ancorarem num estrado firme	Efeito positivo
	O peso das árvores sobrecarrega o talude e com o seu aumento, aumentam as suas componentes normal, estabilizadora e tangencial, instabilizadora	Efeito positivo/ negativo
	Vegetação exposta a ventos transmite forças dinâmicas ao talude, exercendo efeito de alavanca	Efeito negativo
	Raízes agregam as partículas de solo aumentando a sua resistência ao corte	Efeito positivo
	Alargamento e aprofundamento das fissuras pelo desenvolvimento radicular através de maciços rochosos	Efeito negativo

A influência das raízes e da folhagem poderá fazer-se sentir especialmente em locais onde a pluviosidade é maior, já que aí o potencial para haver rotura do talude também é maior. De facto, desde Terzaghi (1950), atribui-se ao excesso de água nos solos o papel principal no desencadeamento de movimentos de massa em taludes ao promover, por um lado, o aumento do peso dos terrenos e, por outro, o acréscimo das pressões intersticiais, ambas causas de rotura dos taludes. Assim, analisa-se em seguida o efeito da pressão da água nos poros, considerando-se o caso de um talude “infinito”.

Define-se “talude infinito” como um talude de extensão ilimitada com condições geométricas constantes e propriedades do solo constantes a qualquer distância abaixo da superfície do talude (Taylor, 1948 *in* O’Loughlin, 1974). Condições ideais nunca estão aplicadas em taludes naturais, porém o talude é designado infinito se a espessura da camada de solo for pequena em comparação com a altura do talude. Considera-se um plano de rotura na interface entre aquela camada de solo e o maciço subjacente.

A resistência do solo à rotura é descrita pela lei de Coulomb e apresenta-se como:

$$\tau_R = c' + \sigma' \cdot \operatorname{tg} \varphi' \quad (1)$$

Onde τ_R = tensão de resistência ao corte do solo (kPa)
 c' = coesão efetiva (kPa)
 σ' = tensão normal efetiva (kPa)
 φ' = ângulo de resistência ao corte em tensões efetivas (em °)

Nesta análise o solo é considerado coesivo devido ao envolvimento da rede de raízes no próprio, a qual lhe confere uma coesão aparente (c_a). Nos casos de talude infinito sem ou com percolação assume-se que o solo não possui verdadeira coesão efetiva (c'), mas sim uma coesão aparente pelo que, adiante neste capítulo, c_a substitui c' nas equações de equilíbrio.

TALUDE INFINITO SEM PERCOLAÇÃO

Na Figura 2.4, que representa um talude infinito não saturado e, portanto, sem percolação, as componentes da tensão por unidade de comprimento na base do talude à profundidade z , são:

$$\tau = \gamma \cdot z \cdot \operatorname{sen} \alpha \cdot \operatorname{cos} \alpha \quad (2)$$

$$\sigma' = \gamma \cdot z \cdot \operatorname{cos}^2 \alpha \quad (3)$$

Onde τ = tensão tangencial (kPa)
 γ = peso volúmico natural (kN/m^3)
 α = ângulo de inclinação do talude

Assume-se que o talude é dividido em fatias elementares nas quais as forças normais f_i e f_{i+1} e as forças de corte t_i e t_{i+1} , atuantes nas respetivas faces verticais (com largura a e peso W), têm igual intensidade e equilibram-se mutuamente ($f_i = f_{i+1}$ e $t_j = t_{j+1}$).

Recorrendo às expressões (1) e (2) e (3) determina-se o coeficiente (ou fator) de segurança global, valor utilizado como índice de estabilidade que, no caso de um solo não saturado de floresta com raízes, pode ser dado por:

$$\frac{\text{Tensão de resistência ao corte}}{\text{Tensão de corte}} = \frac{c_a + (\gamma \cdot z \operatorname{cos}^2 \alpha) \cdot \operatorname{tg} \varphi'}{\gamma \cdot z \cdot \operatorname{sen} \alpha \cdot \operatorname{cos} \alpha} \quad (4)$$

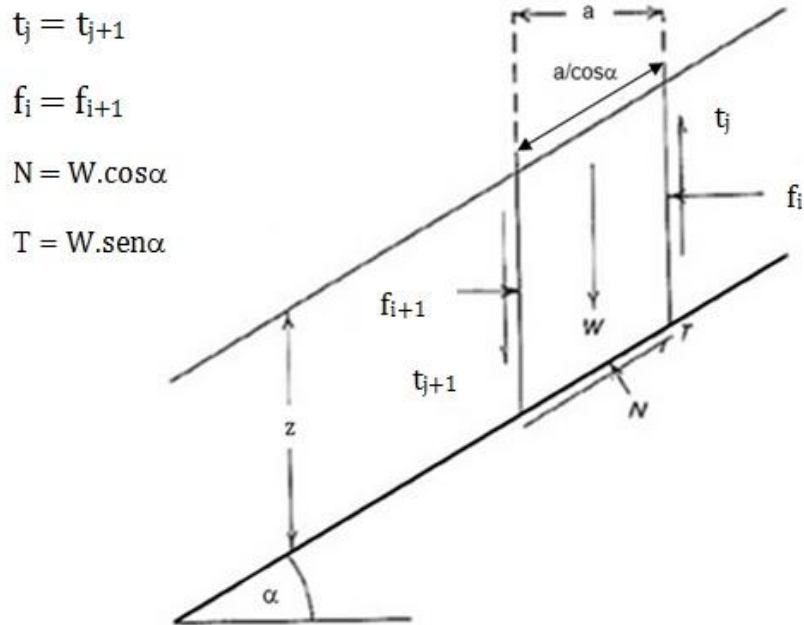


Figura 2.4 - Secção de um talude infinito em condições não saturadas (adaptado de O'Loughlin, 1974)

Se o coeficiente de segurança global for superior a 1,0 o talude é considerado estável mas se estiver abaixo de 1,0, a rotura é iminente. Um coeficiente de segurança unitário corresponde à situação de equilíbrio limite.

Sem coesão, aquele índice passa a ser:

$$\frac{tg\varphi'}{tg\alpha} \quad (5)$$

Em condições de equilíbrio limite determina-se a coesão aparente (c_a) a partir da equação (4):

$$c_a = \gamma \cdot z \cdot \cos^2\alpha \cdot (tg\alpha - tg\varphi') \quad (6)$$

TALUDE INFINITO COM PERCOLAÇÃO

A Figura 2.5 mostra um talude de solo saturado em que a água percola no seu interior. O nível freático coincide com a superfície da camada de solo que, por sua vez, assenta num substrato impermeável. A superfície potencial de rotura é a que separa a camada de solo potencialmente instável do substrato impermeável. Assume-se que o solo é isotrópico ou que a máxima permeabilidade do solo ocorre paralelamente ao talude, permitindo a construção de um diagrama de fluxo com linhas de corrente, paralelas ao mesmo, e linhas de equipotencial perpendiculares.

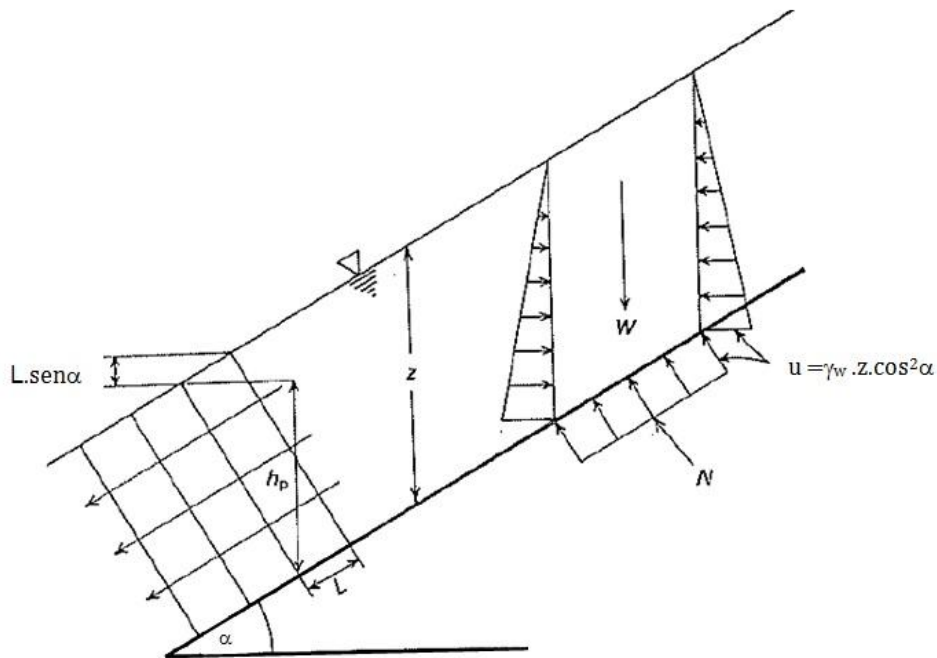


Figura 2.5 - Seção de um talude infinito saturado, com percolação (O'Loughlin, 1974)

Aquelas condições introduzem a contribuição da pressão da água como fator a ter em conta na análise de estabilidade do talude. Este novo parâmetro tem grande influência na tensão normal atuante no plano de ruptura, por produzir forças de levantamento hidráulico (*uplift*). A pressão da água nos poros (u) à profundidade z é:

$$u = \gamma_w \cdot z \cdot \cos^2 \alpha \quad (7)$$

Onde γ_w = peso volúmico unitário da água (kN/m^3)

A tensão normal efetiva e a tensão tangencial atuantes na base do talude são:

$$\sigma' = \gamma' \cdot z \cdot \cos^2 \alpha \quad (8)$$

$$\tau = \gamma_s \cdot z \cdot \cos \alpha \cdot \text{sen} \alpha \quad (9)$$

Onde γ_s = peso volúmico saturado (kN/m^3)

γ' = peso volúmico submerso (kN/m^3)

As águas de infiltração provocam tensões tangenciais proporcionais ao peso volúmico saturado, ao passo que a tensão normal efetiva (σ') é proporcional ao peso volúmico submerso.

Considerando a camada de solo potencialmente instável com raízes que lhe conferem uma coesão aparente, o coeficiente de segurança para o talude infinito saturado com percolação paralela à superfície é, com base nas expressões (1), (8) e (9):

$$\frac{c_a + \gamma' \cdot z \cos^2 \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi'}{\gamma_s \cdot z \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{sen} \alpha} \quad (10)$$

Na situação de equilíbrio limite, determina-se a coesão aparente (c_a) a partir da equação (10):

$$c_a = \gamma_s \cdot z \cdot \cos^2 \alpha \cdot \left[\operatorname{tg} \alpha - \left(\frac{\gamma'}{\gamma_s} \right) \cdot \operatorname{tg} \varphi' \right] \quad (11)$$

As equações (6) e (11) permitem determinar o valor da coesão aparente conferida pelas raízes das plantas para lá do qual o talude vegetado se encontre em condições de estabilidade. O'Loughlin (1974) dá como exemplo o de um solo puramente arenoso e saturado, sem qualquer reforço por raízes, em que o coeficiente de segurança é cerca de metade do que teria o mesmo solo em condições não saturadas. Na sua análise o autor comprova a importância da coesão aparente conferida pelas raízes para inverter aquela descida no coeficiente de segurança (Figura 2.6).



Figura 2.6 - Efeito da coesão aparente conferida pelas raízes ao solo (Alvarenga, 2013)

Uma vez considerados os efeitos da presença de água no solo e do reforço pelas raízes no valor do coeficiente de segurança, analisa-se agora outro efeito na estabilidade, o da inclinação do talude. A Figura 2.7 relaciona o ângulo de inclinação de um talude com o fator de segurança global tendo em conta tanto a presença como a ausência de vegetação. Paralelamente, consideram-se as situações de solo saturado e não saturado. A relevância dos fatores presença/ausência de vegetação e grau de saturação relativamente às condições de estabilidade encontram-se bem ilustradas.

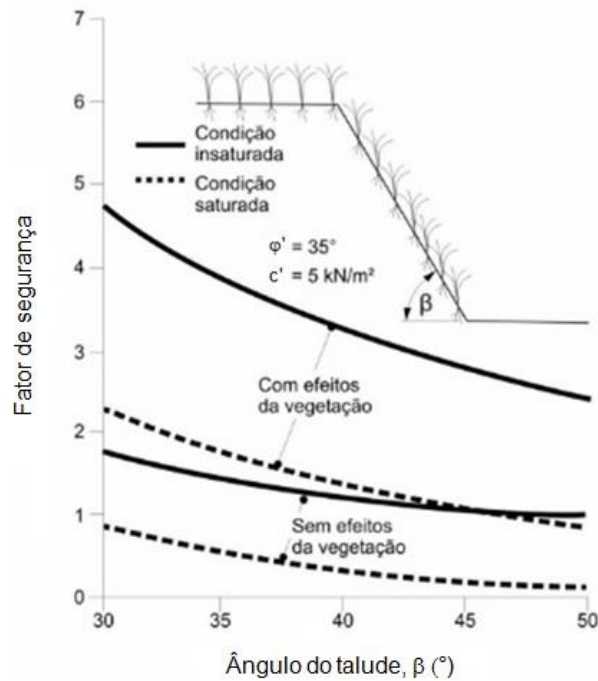


Figura 2.7 - Variação do fator de segurança com o ângulo de talude nos casos com e sem vegetação (Alvarenga, 2013)

Na Figura 2.7 considera-se um talude com ângulo de atrito interno efetivo (ϕ') de 35° e coesão efetiva (c') de 5 kN/m^2 . Realça-se que, a nível de estabilidade do mesmo, aumentado a sua inclinação, a situação mais favorável é a de solo não saturado com coberto vegetal. Já a menos favorável é a de solo saturado sem coberto vegetal. As condições de estabilidade pioram se o solo, mesmo numa condição não saturada, não estiver sujeito aos efeitos do coberto vegetal. Esta verificação vai ao encontro das observações de Greenway (1987) sobre os efeitos positivos da presença de coberto vegetal nos taludes.

A abordagem introdutória sobre o modo como a presença de coberto vegetal controla as condições de estabilidade dos taludes permite antecipar que as raízes são os principais elementos responsáveis por tal controlo, embora a influência do caule e das folhas também deva merecer atenção.

2.2 INFLUÊNCIA DAS RAÍZES NAS CONDIÇÕES DE ESTABILIDADE

As raízes são órgãos que se encontram na parte inferior das plantas e cujas principais funções são fixar a planta ao solo e extrair dele água e sais minerais. No geral as plantas, desde as herbáceas até as árvores de grande porte, exibem dois tipos de sistemas de crescimento das raízes. Um deles é o sistema extensivo, segundo o qual as raízes se desenvolvem em profundidade, as mais pesadas tendem a orientar-se verticalmente e expandem-se para fora da planta. O outro é o sistema intensivo, em que as raízes são mais pequenas, finas e localizadas (Donat, 1995). A raiz que, em muitas espécies, apresenta uma localização central designa-se por raiz principal (*op. cit.*).

Os sistemas radiculares são de particular interesse para os engenheiros devido à influência que exercem nas várias funções do coberto vegetal, nomeadamente nas de estabilização e proteção de taludes (Coppin & Richards, 2007). A Figura 2.8 ilustra as formas mais comuns de crescimento das raízes.

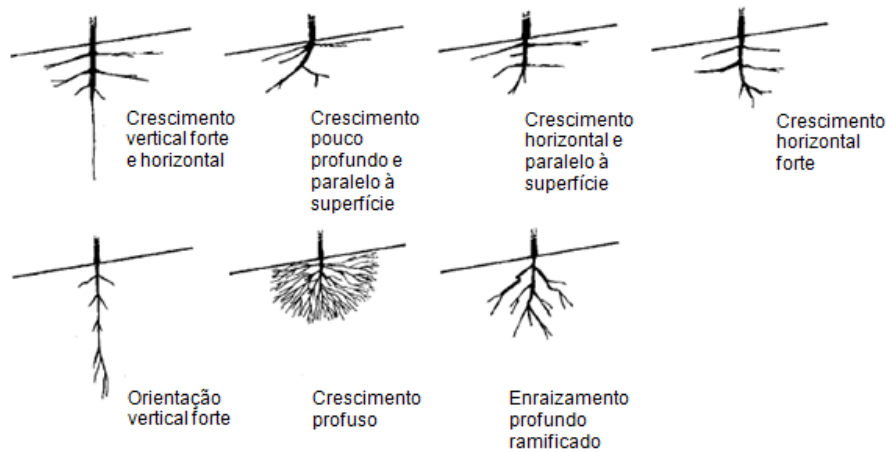


Figura 2.8 - Padrões de crescimento das raízes (Coppin & Richards, 2007)

Em relação à profundidade que as raízes podem atingir considera-se, no geral, estar entre 1 e 3 m (Kozlowski, 1971 *in* Greenway, 1987), visto ser este o intervalo de valores encontrado mais frequentemente nas observações levadas a cabo por Kozlowski (*op. cit.*). Porém, vários outros estudos apontam para a existência de espécies cuja profundidade de enraizamento pode ir até 22 m, no caso de alguns eucaliptos encontrados na África do Sul (Coastworth & Evans, 1984 *in* Greenway, 1987) e 30m, no caso de espécies encontradas nas escavações do canal do Panamá (Davis & DeWeist, 1966 *in* Greenway, 1987). Às vezes, a profundidade de enraizamento é limitada pelo firme rochoso, por isso a capacidade das raízes penetrarem na camada rochosa depende da frequência e do tipo de discontinuidades da rocha.

Quanto à extensão, as raízes podem desenvolver-se lateralmente a distâncias consideráveis. Kozlowski (1971 *in* Greenway, 1987) refere como exemplo as raízes de choupo que se estendem mais do que 65 m em solo arenoso. A extensão da propagação da raiz é, no geral, expressa relativamente à altura da árvore ou ao raio da coroa. O mesmo autor refere pinheiros, em solo arenoso, cujas raízes se estendem lateralmente cerca de 7 vezes a altura média das árvores. Por sua vez, Greenway (1987) menciona a existência de árvores frutíferas, em solo argiloso, com raízes que se estendem cerca de 1,5 vezes o raio da coroa e, em margas, com raízes que se alargam até 2 vezes o raio da coroa.

Vários autores definem raízes finas como as que têm diâmetro menor ou igual a 3 mm e grossas como as que têm diâmetro maior que 3 mm. As raízes finas são encaradas como mais importantes na fixação do solo, comparativamente às grossas, situação que se verifica principalmente aquando da

ocorrência de erosão hídrica (Gyssels *et al.*, 2005 *in* Reubens, 2007). Neste caso, uma rede de raízes superficial mas densa, tem como efeito contrariar a possibilidade de rotura do talude.

Do ponto de vista da estrutura das raízes, destaca-se ainda aquela que é considerada a ideal para estabilizar os taludes ou controlar os processos erosivos onde a água tem o papel principal. Styczen e Morgan (1995 *in* Reubens, 2007) propõem, assim, três classes de raízes referindo a(s) que consideram mais apta(s) para estabilizar encostas (Figura 2.9) ou protege-las contra a erosão.

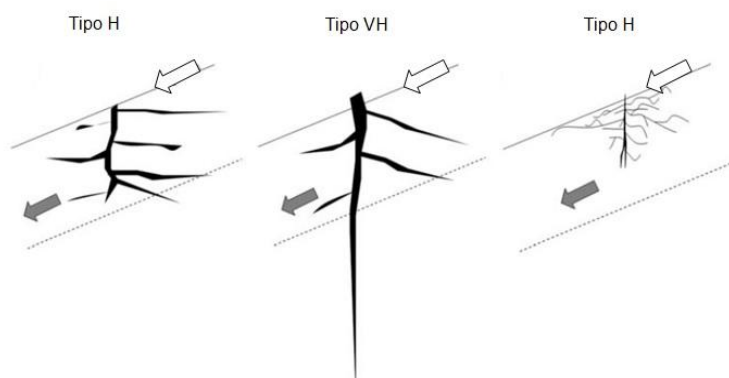


Figura 2.9 - Classificação das raízes em classes (Styczen and Morgan, 1995 *in* Reubens, 2007)

Na Figura 2.9 a seta a cinzento representa a direção de deslizamento e a seta a branco representa o escoamento superficial. A superfície (potencial) de rotura é representada pela linha a tracejado. De acordo com os referidos autores, as estruturas tipo H e VH são as mais aptas para estabilizar taludes e as estruturas H e M são as que melhor controlam a erosão.

Um fator importante do papel das raízes na estabilização dos taludes é a sua resistência à tração. Sobre este fator, Greenway (1987) considera que a mesma varia com o ambiente em que se desenvolvem, a orientação, o diâmetro, as espécies e as estações do ano. Os valores da Tabela 2.2 são exemplo de como este fator varia com o diâmetro das raízes (Schiechtl, 1973 *in* Donat, 1995).

Tabela 2.2 - Resistência à tração de raízes de abeto-de-Douglas em função do seu diâmetro e localização (adaptado de Greenway, 1987)

Espécies/localização	Diâmetro das raízes (mm)	Resistência à tração (MPa)
Abeto-de-Douglas das Montanhas Rochosas	2	22.7
	4	22.3
	6	17.8
	8	16.2
	10	14.8
Abeto-de-Douglas da cadeia costeira	2	56.7
	4	58.7
	6	47.2
	8	44.7
	10	43.1

Os dados da tabela comprovam a conclusão a que diversos autores, mencionados por Greenway (1987), chegaram de que a resistência à tração das raízes diminui à medida que aumenta o seu diâmetro, entre os quais Wu (1976) e Burroughs e Thomas (1977).

Sob a perspectiva das espécies, a Tabela 2.3 indica como varia a resistência à tração consoante se trate de plantas herbáceas ou lenhosas.

Tabela 2.3 - Valores da resistência à tração para diferentes grupos de plantas (adaptado de Schiechl, 1973 in Donat,1995)

Grupos de plantas	Resistência à tração
Herbáceas não gramíneas	5 – 10 MPa
Arbustos	3 – 60 MPa
Árvores	10 – 70 MPa (máx. 160)

Segundo Greenway (1987), o desenvolvimento das raízes depende de fatores como:

- A dureza relativa do solo;
- A posição e oscilações do nível freático;
- A disponibilidade de nutrientes e de ar;
- A capacidade do solo para reter humidade;
- A presença de elementos tóxicos no solo.

São vários os autores que atribuem às raízes a importância no papel positivo da vegetação em estabilizar taludes terrosos. Prandini, *et al.* (1977) sustentam que a presença de um sistema de raízes contribui para a estabilidade de taludes. De acordo com esta ideia está Ziemer (1981-a) que defende que esse contributo se deve ao facto das raízes das plantas poderem-se “ancorar nas fraturas do maciço rochoso, atravessar zonas de fraqueza para solo mais estável e fornecer um bloqueio como aglomerados de fibras dentro de uma massa de solo menos resistente”.

Apesar de, com o tempo, terem surgido estudos que permitem tirar conclusões mais assertivas no que respeita ao papel das raízes na estabilidade de taludes, ainda há caminho a percorrer. Daí que, presentemente, alguns autores se refiram ao estudo dos sistemas radiculares e estabilidade de taludes como um assunto desafiador e abrangente e cujos dados, do ponto de vista empírico, são difíceis de obter. Baseando-se nesta problemática, Ip (2011) aponta três limitações a este estudo:

- Dificuldade em amostrar as raízes, pois podem atingir grandes profundidades e estender-se por grandes áreas;
- As raízes das árvores e dos arbustos têm dimensões variáveis e estão interligadas de modo complexo;
- A complexidade das interações entre fatores bióticos e abióticos, como pedras e outros detritos.

2.2.1 EFEITOS MECÂNICOS

2.2.1.1 REFORÇO

Ip (2011) e Reubens *et al.* (2007) apoiam a ideia de que as raízes facilitam a estabilização mecânica por reforçar o solo devido à sua resistência à tração, propriedades de atrito e flexibilidade, daí Ip (2011) afirmar que um talude ideal deverá incluir raízes finas e grossas, pois ambos os tipos oferecem vantagens diferentes. No caso das raízes finas consideram-se como vantagens a sua maior resistência à tração e a maior eficácia na estabilização das camadas superiores do solo e no caso das raízes grossas, o facto de se estenderem a maiores profundidades e auxiliarem na ancoragem de grandes volumes de solo (*op. cit.*). Contudo, segundo Greenway (1987), o efeito do reforço das raízes depende da profundidade das superfícies potenciais de deslizamento no interior do talude. Por esta razão, Tsukamoto & Kusakabe (1984 *in* Greenway, 1987) propõem uma classificação dos taludes em quatro tipos distintos baseada na profundidade das superfícies críticas de deslizamento relativamente à camada radicular (Figura 2.10).

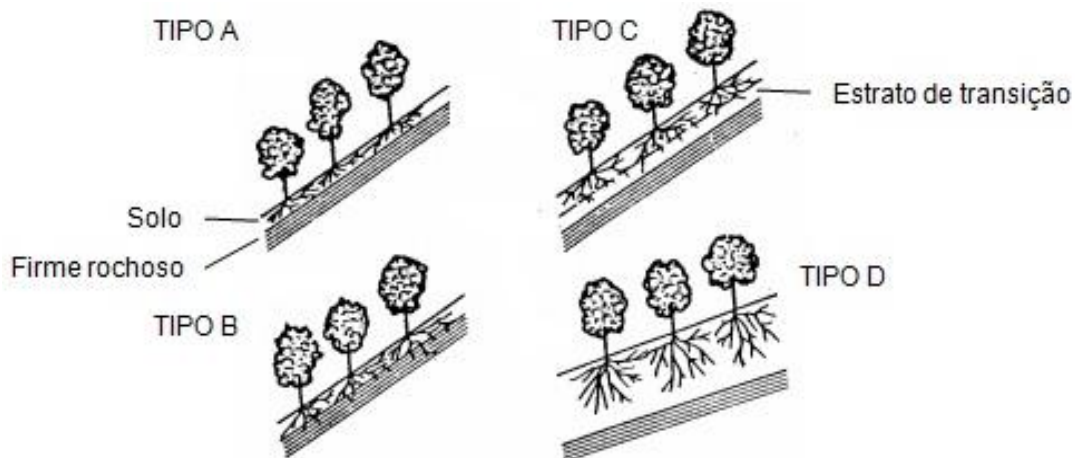


Figura 2.10 - Esquema de classificação dos taludes baseado no reforço e ancoragem pelas raízes (adaptado de Tsukamoto & Kusakabe, 1984 *in* Greenway, 1987)

O tipo A é constituído por um plano de rotura na interface solo/maciço rochoso e por um estrato fino de solo totalmente reforçado pelas raízes das árvores, que não penetram na rocha. O tipo B é semelhante ao do tipo A salvo no aspeto em que o estrato rochoso contém descontinuidades, permitindo a penetração das raízes, pelo que, a presença de árvores deverá ser mais benéfica neste caso que no A. O tipo C possui um estrato terroso mais espesso, comparado aos casos A e B e tem um estrato de transição a partir do qual a densidade do solo e a resistência ao corte aumentam com a profundidade e onde a penetração das raízes, que não atingem o estrato rochoso, favorece a estabilização do talude. O talude tipo D é o que tem a camada de solo mais espessa, considerando-se que o potencial para movimento de terrenos é maior abaixo da camada radicular. Neste caso “as árvores estão a ‘flutuar’ e deverão ter uma pequena influência mecânica na estabilidade” (*op. cit.*).

Do ponto de vista da resistência ao corte do solo¹, um defensor de que as raízes reforçam o solo por aumentá-la é Ziemer (1981-a), tal como ilustra a Figura 2.11, baseada em ensaios de campo, onde a biomassa (B) corresponde ao peso volúmico seco das raízes vivas num dado volume de solo.

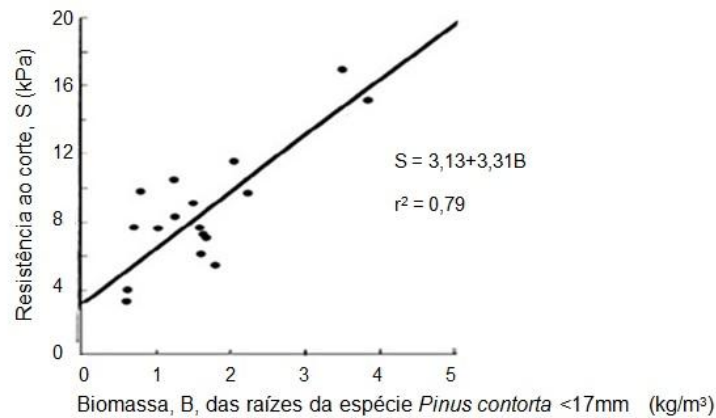


Figura 2.11 - Resistência ao corte das raízes em solo arenoso (adaptado de Ziemer, 1981-a)

Segundo a Figura 2.11, a tensão de corte aumenta com o aumento da biomassa radicular. Citados por Ziemer (1981-a), os autores Endo & Tsuruta (1969) reportaram a mesma conclusão, desenvolvendo uma caixa de corte com o objetivo de medir o contributo das raízes da espécie *Alnus glutinosa* (amieiro) para a resistência ao corte do solo. Por sua vez, baseado em trabalhos anteriores, O'Loughlin (1972 *in* Ziemer, 1981-a) também recorreu a um modelo de caixa de corte, similar ao desenvolvido por Endo e Tsuruta (1969 *in* Ziemer, 1981-a), para estudar as florestas costeiras de mais idade da Colúmbia Britânica.

Uma representação do que é um dos modelos de caixa de corte utilizados com o objetivo de compreender o efeito de reforço das raízes é o da Figura 2.12. Este modelo foi utilizado para medir a resistência ao corte de um solo reforçado com raízes de vetiver (*Chrysopogon zizanioides*), de acordo com ensaios referidos por Mickovski e Beek (2009).

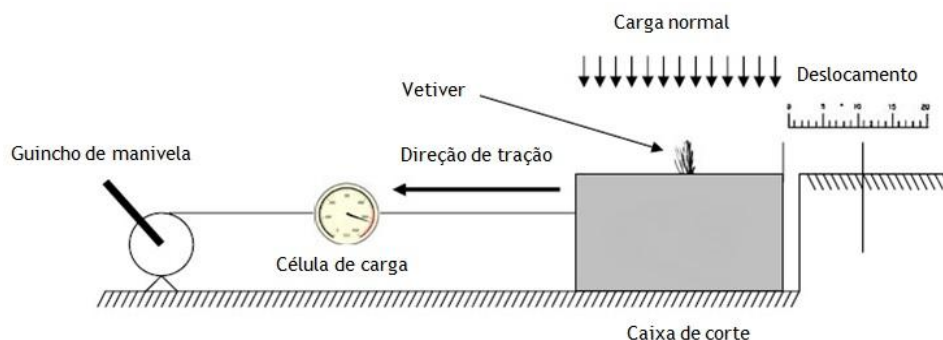


Figura 2.12 - Esquema do ensaio de resistência ao corte *in situ* de um solo reforçado por raízes (adaptado de Mickovski & Beek, 2009)

¹ Resistência interna por unidade superfície de que o solo dispõe de modo a resistir à rotura e, conseqüentemente ao deslizamento ao longo de qualquer superfície no seu interior (Folque, 1987).

Um guincho, ligado à caixa de corte por um cabo, permite exercer a força (com componente horizontal) responsável pelo corte da amostra de solo com as raízes de vetiver. Por sua vez, o deslocamento associado à rotura do solo é medido por uma fita graduada ligada à caixa de corte.

Este e outros ensaios semelhantes têm permitido quantificar o efeito de reforço das raízes, o qual é indissociável da resistência dos solos. Daí que vários autores, como Abe e Ziemer (1991) se tenham reportado à importância de compreender os mecanismos por meio dos quais as raízes reforçam os solos, para prever e mitigar os efeitos de escorregamentos potenciados pela remoção da vegetação. Estes, referindo-se à vegetação de maior porte, afirmam inclusive que “as raízes das árvores reforçam o solo” e, conseqüentemente a estabilidades dos taludes. Para chegar a tais conclusões, Abe e Ziemer (1991) basearam-se num estudo de um solo constituído por areia fina com raízes de pinheiro da espécie *Pinus contorta Douglas*, encontrado na costa Oeste da América do Norte, cujo resultado é indicado na Figura 2.13.

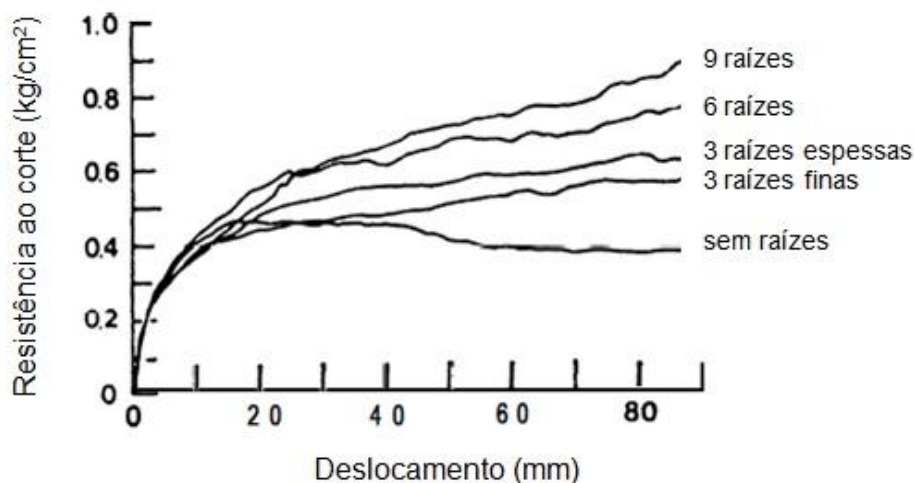


Figura 2.13 - Variação da resistência ao corte de uma areia fina com o número de raízes de pinheiro (adaptado de Abe & Ziemer 1991)

Nos ensaios realizados sem a presença de raízes, foi observado que a máxima resistência ao corte ocorria para um deslocamento de 17 mm, valor após o qual a resistência diminuiu para um valor residual e correspondente a um deslocamento de 70 mm (*op. cit.*). Foi possível apurar também que a resistência ao corte do solo ensaiado aumentou com o incremento do número de raízes.

São vários os modelos teóricos de reforço do solo por raízes para prever valores da resistência ao corte devido à presença destas. Greenway (1987) faz referência as dois casos, sendo um deles o modelo de reforço perpendicular de raízes (Figura 2.14) e o outro o de reforço de raízes inclinadas que atravessam uma zona de cisalhamento.

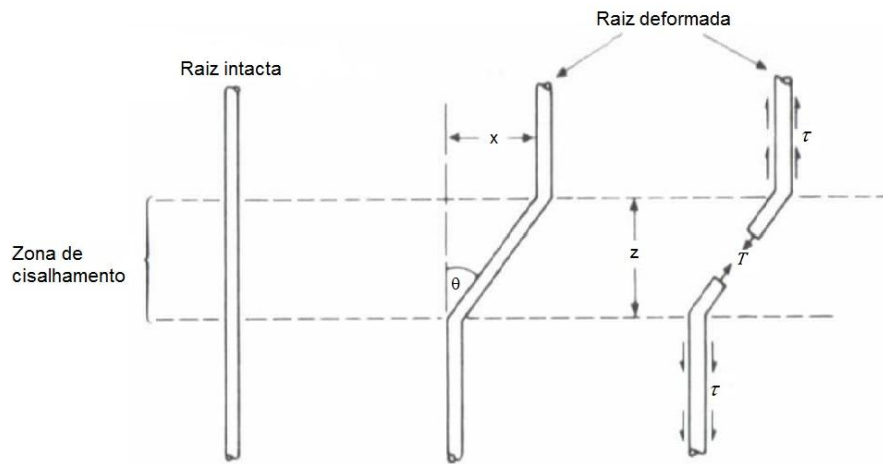


Figura 2.14 - Modelo de reforço de raiz perpendicular (adaptado de Greenway, 1987)

Neste modelo as variáveis utilizadas são: a espessura da zona de cisalhamento (z), o deslocamento de corte (x), o ângulo de distorção na zona de cisalhamento (θ), a resistência à tração média das raízes por unidade de área de solo (t_R) e o atrito lateral ao longo da raiz (τ).

Este modelo fundamenta que as raízes aumentam a resistência ao corte do solo por transferência das tensões de corte que se desenvolvem na matriz do mesmo, para as fibras, por meio do atrito na interface ao longo da extensão das fibras que estão fixas na zona de solo inferior, não cisalhada. Quando o corte ocorre a fibra deforma-se, alongando-se, o que mobiliza a sua resistência à tração (Greenway, 1987; Gray & Barker, 2004).

No modelo proposto considera-se uma raiz elástica e flexível que se estende por uma zona de cisalhamento e que a distorção da raiz desenvolve nesta zona uma dada tensão de tração.

Matematicamente, a mobilização da resistência ao corte das raízes traduz-se num aumento da resistência ao corte do solo, dado por:

$$\Delta S = t_R \cdot (\text{sen}\theta + \text{cos}\theta \cdot \text{tg}\varphi) \quad (12)$$

Onde ΔS = variação da resistência ao corte do solo
 θ = ângulo de distorção cisalhante (dado por: $\theta = \text{tg}^{-1} \cdot (x/z)$)
 t_R = resistência à tração média das raízes por unidade de área de solo
 φ = ângulo de resistência ao corte

Sendo:

$$t_R = T_R \cdot \left(\frac{A_R}{A} \right) \quad (13)$$

Onde T_R = resistência à tração média das raízes
 A_R = área total das secções transversais de todas as raízes numa dada fração de solo de área A (dado por: $A_R = \sum n_i \cdot a_i$)
 A = área de solo considerada

Na equação (14) T_R é dado por:

$$T_R = \frac{\sum T_i \cdot n_i \cdot a_i}{\sum n_i \cdot a_i} \quad (14)$$

Onde T_i = resistência à tração das raízes da classe de tamanho i
 n_i = número de raízes da classe de tamanho i
 a_i = área da secção transversal das raízes da classe de tamanho i

Gray e Leiser (1982 *in* Greenway, 1987) consideram o modelo de reforço de raízes inclinadas (Figura 2.15):

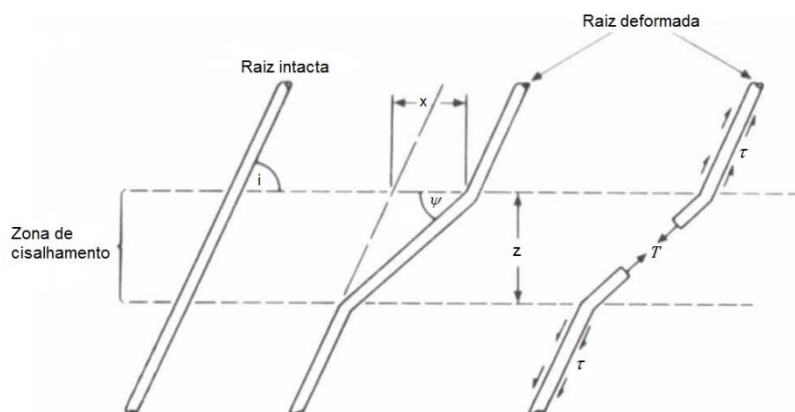


Figura 2.15 - Modelo de reforço de raiz inclinada (adaptado de Greenway, 1987)

Neste caso, a variação da resistência ao corte do solo é dada por:

$$\Delta S = t_R \cdot [\text{sen}(90 - \psi) + \cos(90 - \psi) \cdot \text{tg}\phi] \quad (15)$$

Com: $\psi = \text{tg}^{-1} \cdot \frac{1}{k + (\text{tgi})^{-1}}$

Onde k = razão de distorção cisalhante (= x/z)
 i = ângulo inicial de inclinação da raiz
 ψ = ângulo de distorção na zona de cisalhamento

A situação esquematizada na Figura 2.14 é um caso particular da que se representa na Figura 2.15, uma vez que a esmagadora maioria das raízes de um mesmo sistema radicular apresenta alguma inclinação. Da Figura 2.16 verifica-se que o facto das raízes serem perpendiculares à direção de corte não corresponde à situação ótima de acréscimo de resistência ao corte. Este acréscimo atinge o seu

valor máximo para inclinações das raízes inferiores a 90°. Já para inclinações superiores a este valor, a resistência ao corte conferida pelas raízes ao terreno diminui.

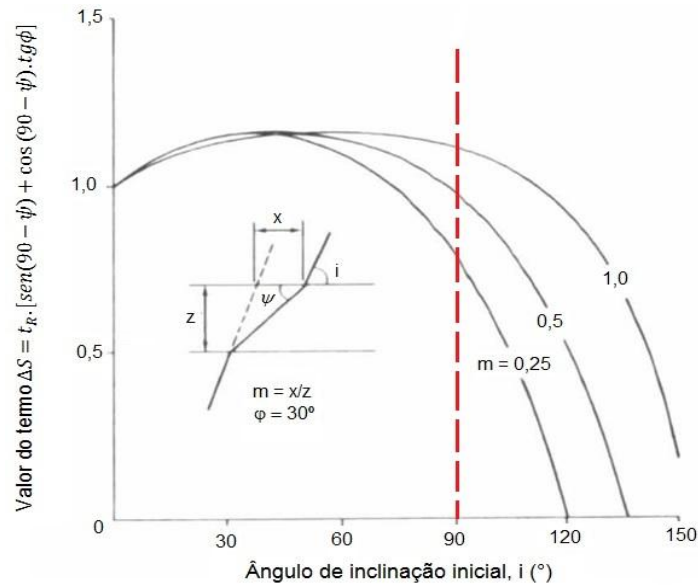


Figura 2.16 - Variação da resistência ao corte com o ângulo de inclinação inicial das raízes (adaptado de Gray e Leiser, 1982 in Greenway, 1987)

Com base nos modelos apresentados e entrando em conta com o efeito da presença de raízes na variação resistência ao corte do solo (ΔS), Greenway (1987) e, mais tarde, Abe e Ziemer (1991) defenderam que a resistência ao corte do solo reforçado por raízes é a soma da resistência ao corte do solo não reforçado (S) com a variação da resistência ao corte (ΔS), isto é:

$$S_R = S + \Delta S \quad (16)$$

Onde S = resistência ao corte do solo (não reforçado por raízes)
 S_R = resistência ao corte do solo reforçado por raízes

Abe & Ziemer (1991), da equação (16), observam que a resistência ao corte do solo reforçado (S_R) é superior à resistência ao corte do solo não reforçado devido à capacidade que as raízes evidenciaram de esticar em vez de deslizar.

2.2.1.2 ANCORAGEM E ARQUEAMENTO

O efeito de ancoragem é similar ao de reforço das raízes, exceto no aspeto que Greenway (1987) menciona do mecanismo de ancoragem ocorrer em maior escala. Em resposta a solicitações de corte as raízes deformam-se, tendem a alongar e a ancorar no terreno, evitando que saiam do lugar por arrancamento. A ação de ancoragem é mais relevante no caso das raízes da vegetação de maior porte (arbórea), favorecendo o efeito de reforço ou contenção de deslizamentos superficiais. O arqueamento é um efeito que ocorre em consequência da tendência do solo se mover em torno de fileiras de árvores ancoradas no terreno. Esta ancoragem induz a formação de um “cilindro vertical”

de solo e raízes que penetram nas descontinuidades da rocha. Tal situação leva a que surja uma faixa de solo arqueado entre duas fileiras de árvores (Figura 2.17).

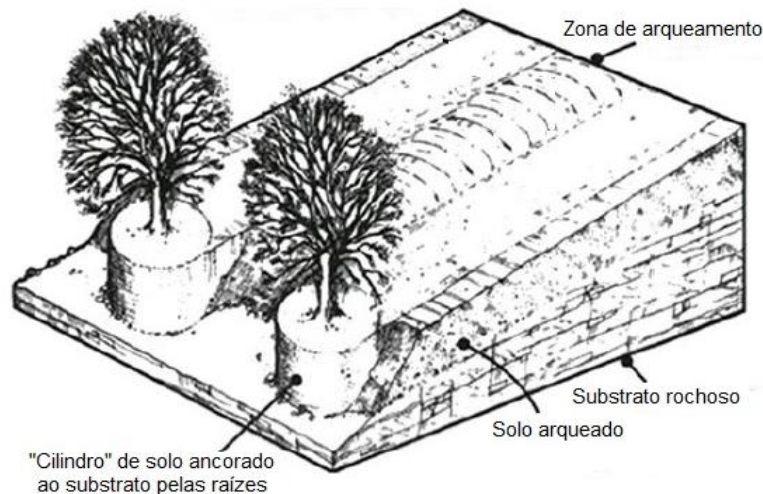


Figura 2.17 - Representação da ação de ancoragem, suporte de contenção e arqueamento (adaptado de Wang & Yeng, 1974 in Sousa, 2015)

Reubens (2007) sugere que árvores que tenham uma raiz principal vertical grande ou com várias raízes (não principais) desenvolvendo-se em profundidade, reforçam menos os taludes do que árvores com uma vasta gama de raízes verticais ou oblíquas (relativamente aos troncos) que conseguem segurar firmemente o “cilindro” de solo.

Na situação representada na Figura 2.18 o sistema radicular é densamente ramificado, possui uma raiz principal e raízes secundárias que penetram em profundidade no terreno, exercendo efeito de ancoragem. A superfície de rotura potencial pode aparecer atravessada por um grande número de raízes, quer na sua parte superior, quer na inferior.

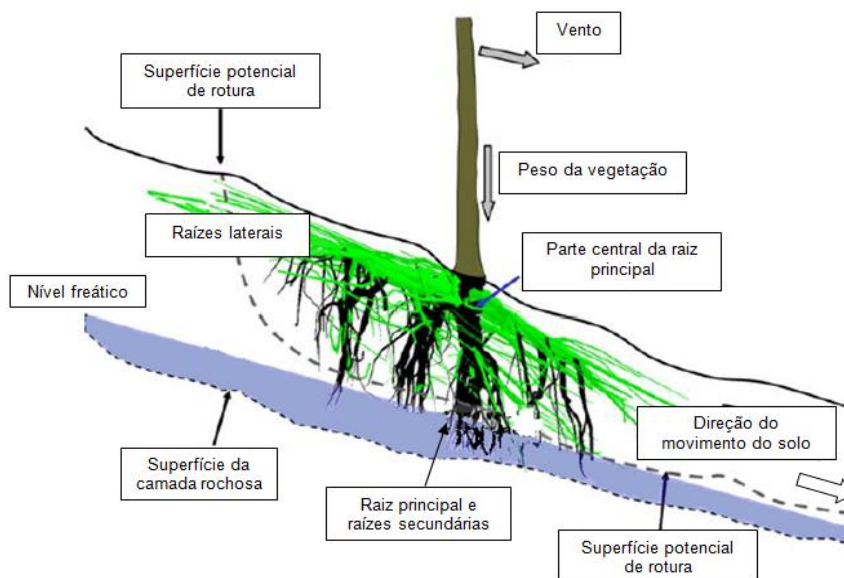


Figura 2.18 - Esquema de situação de deslizamento potencial (Reubens et al., 2007)

2.2.2 EFEITOS HIDROLÓGICOS

A presença de água no solo tem um efeito significativo no comportamento deste, podendo contribuir para problemas de instabilidade de taludes. Por este motivo, torna-se necessário compreender de que forma se manifesta a influência da água. O ponto de partida é a lei da tensão efetiva de Terzaghi:

$$\sigma = \sigma' + u \quad (17)$$

A tensão total representa-se por σ e é a força por unidade de área que atua sobre um solo. A tensão efetiva representa-se por σ' e é a tensão que determina a resistência ao corte, coincidindo com a parte da tensão tomada pelo esqueleto sólido (pressão intergranular). A pressão intersticial, u , é a parte da tensão imposta ao solo que é absorvida pela água (Folque, 1987).

O excesso de água no solo é geralmente aceite como o principal fator causador da rotura dos taludes uma vez que, como é do conhecimento geral, a pressão da água nos poros num solo saturado diminui a sua resistência ao corte. Isto acontece porque se a pressão aumenta acima do admissível para dado tipo de solo, a sua tensão efetiva diminui, produzindo um efeito de *uplift* (levantamento), que potencia a rotura. Este efeito é tanto mais evidente quanto mais frequentes e prolongados forem os períodos de pluviosidade. Apesar disso, Gray (1973) sustenta que taludes florestados podem tolerar um episódio de pluviosidade mais intensa antes de se desenvolver uma condição saturada crítica.

Greenway (1987) considera que os processos associados à ação hidrológica das raízes são: a infiltração, a evapotranspiração e a abertura de fendas.

2.2.2.1 INFILTRAÇÃO

Vários autores atribuem à presença de raízes o aumento da permeabilidade e infiltração no solo por adicionarem rugosidade à superfície do terreno e criarem macroporos, incrementando a percolação em profundidade. (*op. cit.*). Contudo, uma taxa crescente de infiltração também conduz à subida do nível freático, aumentando as pressões de escoamento o que, na perspetiva de Ruebens (2007), aumenta o risco de deslizamentos. Por outro lado, num talude vegetado as raízes extraem a humidade do solo, conduzindo à diminuição do conteúdo de água infiltrada. Diminuições do teor em água do solo diminuem a pressão da água nos poros, efeito que pode ser revelado pela descida do nível freático.

Uma cadeia contígua de macroporos constitui um tubo de fluxo onde circula a água da camada sob o coberto vegetal. Durante períodos de intensa pluviosidade, tubos de fluxo fechados podem provocar a instabilidade do talude por impedir a dissipação da água, aumentando a sua pressão nos poros e diminuindo a tensão efetiva do solo. Quando entra no tubo de fluxo, a água acelera arrastando as partículas de solo e se a infiltração ocorrer a velocidade alta, pode intensificar o processo erosivo. Isto

leva a parede do tudo a colapsar, dando-se uma descarga de sedimentos. Se a infiltração for baixa, Uchida *et al.* (2001 *in* Ip, 2011) indica que os tubos de solos contribuem para a estabilidade do talude, melhorando a drenagem e reduzindo as pressões da água nos poros. O fator tempo deve ser tido em conta pois, caso a erosão promovida pela circulação da água nos tubos de fluxo e apesar de lenta, ocorra por períodos prolongados, o talude pode romper.

2.2.2.2 EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Designa-se por evapotranspiração o processo de perda de água na forma de vapor pelas plantas através das folhas. Num talude vegetado, a transpiração ocorre por as raízes extraírem água do solo, lançando-a para a atmosfera. Deste modo, o conteúdo de água no estrato radicular diminui, o que resulta numa alteração da distribuição da água além desta zona. Os processos envolvidos neste caso verificam a ideia expressa por Ziemer (1981-b) de que “as florestas podem remover (...) humidade do solo por evapotranspiração”. Se o solo estiver saturado, desta remoção poderá derivar uma resultante negativa da pressão da água nos poros (ou tensão de capilaridade), o que aumenta a pressão intergranular e, por consequência, a resistência ao corte do solo. No caso da vegetação ser removida subitamente, a transpiração cessa, resultando num aumento do nível das águas subterrâneas.

2.2.2.3 FENDAS DE DESSECAÇÃO

A transpiração das árvores, principalmente nos solos argilosos, pode acelerar a abertura de fendas de dessecação, em especial durante a estação seca, pois o comportamento nestes solos é fortemente influenciado pelo teor em água. A abertura de fendas de dessecação possibilita a circulação da água, com as consequências relacionadas com o processo hidráulico da infiltração permitido pelas raízes.

Embora as fendas de dessecação não sejam um fator significativo nas roturas de encostas, elas devem ser mencionadas por serem bastante comuns. Primeiro, quando está presente uma fenda de dessecação e a superfície de deslizamento intercepta a sua base, a água entra na fenda e passa a circular ao longo dessa superfície. Segundo, quando uma fenda é preenchida com água, é gerada uma pressão hidrostática em toda a sua profundidade. Assim, a fenda de dessecação permite o escoamento da água através do talude e também das camadas de solo subjacentes, situação que pode induzir forças de infiltração que comprometem a estabilidade.

2.3 PROTEÇÃO CONTRA A EROSÃO

Erosão é o processo pelo qual os materiais terrosos e rochosos são removidos da superfície do terreno por ação de agentes naturais, como o vento e a água, que os transportam e depositam noutros locais. O solo vai-se degradando devido, segundo alguns autores, tanto a causas naturais como antrópicas, como a desflorestação, os incêndios florestais, as explorações mineiras e a

agricultura. De acordo com as marcas deixadas no terreno, a erosão divide-se em três tipos: laminar, em sulcos e em barrancos (Del Val, 1987).

A erosão laminar manifesta-se quando as condições de inclinação e natureza do terreno são favoráveis. Consiste na remoção de camadas finas de solo, distribuídas pela superfície de solo, por ação da chuva e escorrência superficial generalizada. Os efeitos mais importantes desenvolvem-se em locais sem vegetação, solos de fraca coesão e pouca matéria orgânica, favorecendo a existência de um substrato impermeável.

A erosão em sulcos, ou em ravinas, ocorre quando correntes de água com potencial erosivo abrem, inicialmente, pequenas incisões no terreno, aleatórias e com alguns centímetros de profundidade que se vão gradualmente aprofundando. É favorecida por aguaceiros fortes e ocorre principalmente em terrenos inclinados e recentemente cultivados.

Quanto à erosão em barrancos, trata-se de um processo que cria incisões no terreno que atingem algumas dezenas de metros. Os barrancos recolhem as águas de escorrência da área envolvente, tornando-os instáveis. Tende a ocorrer em locais previamente afetados por algum dos tipos anteriores de erosão.

Os processos erosivos podem ser intensificados ou reduzidos por efeito dos parâmetros estruturais das raízes. A Tabela 2.4 enumera alguns desses parâmetros e a maneira como influenciam os processos erosivos e de instabilidade dos terrenos. Os parâmetros em causa são:

- RD - Densidade do sistema radicular;
- RLD - Densidade de comprimento da raiz (ou comprimento da raiz por unidade de volume de solo);
- RSD - Taxa de degradação relativa do solo;
- NR - Número de raízes;
- RAR – Razão de área radicular;
- CSA - Área de secção transversal;
- L - Comprimento da raiz;
- K_l - Erodibilidade laminar;
- K_r - Erodibilidade em sulcos;
- K_g - Erodibilidade em barrancos;
- M - Efeito mecânico;
- H - Efeito hidrológico.

Tabela 2.4 - Parâmetros estruturais das raízes com influência nos processos erosivos e de instabilidade dos terrenos (adaptado de Gyssels et al., 2005 in Reubens, 2007)

Parâmetros estruturais das raízes	Ações	Principais processos erosivos	Principais efeitos
RD	M-H	Laminar Laminar, em sulcos e barrancos Sulcos e barrancos Laminar e em sulcos Laminar e em sulcos	Reduz K_i Reduz K_i , K_r e K_g Reduz RSD Reduz a perda de solo Reduz K_i e K_r
RLD	M-H	Laminar Sulcos e barrancos Laminar e em sulcos Sulcos e barrancos	Reduz K_i Reduz K_r e K_g Reduz K_i e K_r Reduz RSD
Porcentagem de solo descoberto com raízes finas	M-H	Laminar e em sulcos	Reduz as perdas de solo
NR	M-H	Sulcos e barrancos Movimentos de massa	Reduz a quantidade de sedimentos Reforço do solo/superfície potencial de rotura
RAR	M	Movimentos de massa Movimentos de massa	Reforço do solo/superfície potencial de rotura Reforço do solo/superfície potencial de rotura
CSA ou diâmetro basal	M		Influencia a rigidez da raiz
Inclinação	M	Movimentos de massa	Influencia no reforço do solo
Profundidade máxima da raiz	M	Movimentos de massa	Influencia no reforço do solo/capacidade de ancoragem
Comprimento médio da raiz acima do plano de rotura	M	Movimentos de massa	Influencia no reforço do solo
Comprimento total da raiz abaixo do plano de rotura	M	Movimentos de massa	Influencia no reforço do solo
Padrão de ramificação	M-H	Movimentos de massa	Influencia a rigidez da raiz/reforço do solo

Entre os aspetos estruturais que influenciam o modo como a erosão atua refere-se o comprimento da raiz (L) que, como alguns autores defendem, quanto maior for, maior é a resistência ao desenraizamento por ação do vento. Desta forma a ação da erosão eólica no terreno é menos significativa.

Por seu lado, características que influenciam as propriedades mecânicas das raízes como o diâmetro basal, número, comprimento das raízes laterais e ângulos de ramificação, afetam o modo como a

erosão hídrica atua nos taludes. A direção das raízes superficiais mais grossas é outra característica que controla esta forma de erosão. Um exemplo disso é o descrito em Reubens *et. al* (2007), que consideram que as raízes que se desenvolvem paralelamente à superfície do terreno tendem a formar uma barreira ao escoamento superficial, ao passo que as que se desenvolvem perpendicularmente àquela tendem a ter um efeito menor sobre o fluxo de água. Outro aspeto a ter em conta no controlo da erosão hídrica é a densidade das raízes, relevante sobretudo no caso das espécies gramíneas.

A diminuição da intensidade da erosão é um dos objetivos que se pretende alcançar com a revegetação dos taludes. Foi sob esta perspetiva que Falcão-Neves *et al.* (2006) realizaram um estudo no qual compararam o grau de erosão dos solos com e sem cobertura vegetal. O objetivo daquele estudo foi o de tirar conclusões sobre o efeito do coberto vegetal em dois tipos de solo, em função da inclinação do talude e do tempo de precipitação. Para tal recorreu-se a um erodímetro (Figura 2.19) construído para o efeito e dois provetes de solo: solo A, arenoso, formado de detritos de pedra de granito porfiroide (região de Viseu) e solo B, areno-siltoso, com matéria orgânica (dos terrenos do Instituto Superior Técnico).



Figura 2.19 - Ensaio de erodibilidade (Falcão-Neves *et al.*, 2006)

O erodímetro é um equipamento formado por uma plataforma em acrílico com 100 cm de comprimento e 18 cm de largura, fixa sobre um tampo basculante de uma mesa, por um dispositivo de contenção do provete de ensaio (amostrador) com 4 cm de profundidade e área de 15×13 cm, por medidor de inclinações da rampa, por dois dispositivos de distribuição e medição de caudais de água e por uma caixa de recolha do solo arrastado. Associados ao equipamento estão uma bomba aspirante e três depósitos para a água com capacidade de 50 litros cada.

Dos solos A e B ensaiaram-se provetes com diferentes inclinações da rampa. Do solo A prepararam-se dois grupos de provetes com relva: um com densidade de 200 pés de relva por dm² e o outro com densidade 80 pés de relva por dm². Do solo B, os provetes com relva tinham densidade de 120 pés por dm².

Como se considera que a erosão dos taludes, ao estarem expostos a pluviosidade intensa, é composta de duas fases, o erodímetro utilizado dispõe de dois dispositivos de distribuição da água. Um é uma caixa de fundo perfurado que lança gotas de água diretamente sobre o provete para simular o efeito da desagregação das partículas de solo por ação do impacto das gotas da chuva. O outro é um tubo perfurado (8 furos) que lança água no topo superior da rampa, que escorre e galga o provete para simular o arraste das partículas de solo ao longo do talude.

Para quantificar o solo erodido durante o ensaio, deixaram-se secar e pesaram-se as partes arrastada e não arrastada do provete ensaiado.

Os resultados obtidos estão, indicados nas Figuras 2.20 e 2.21:

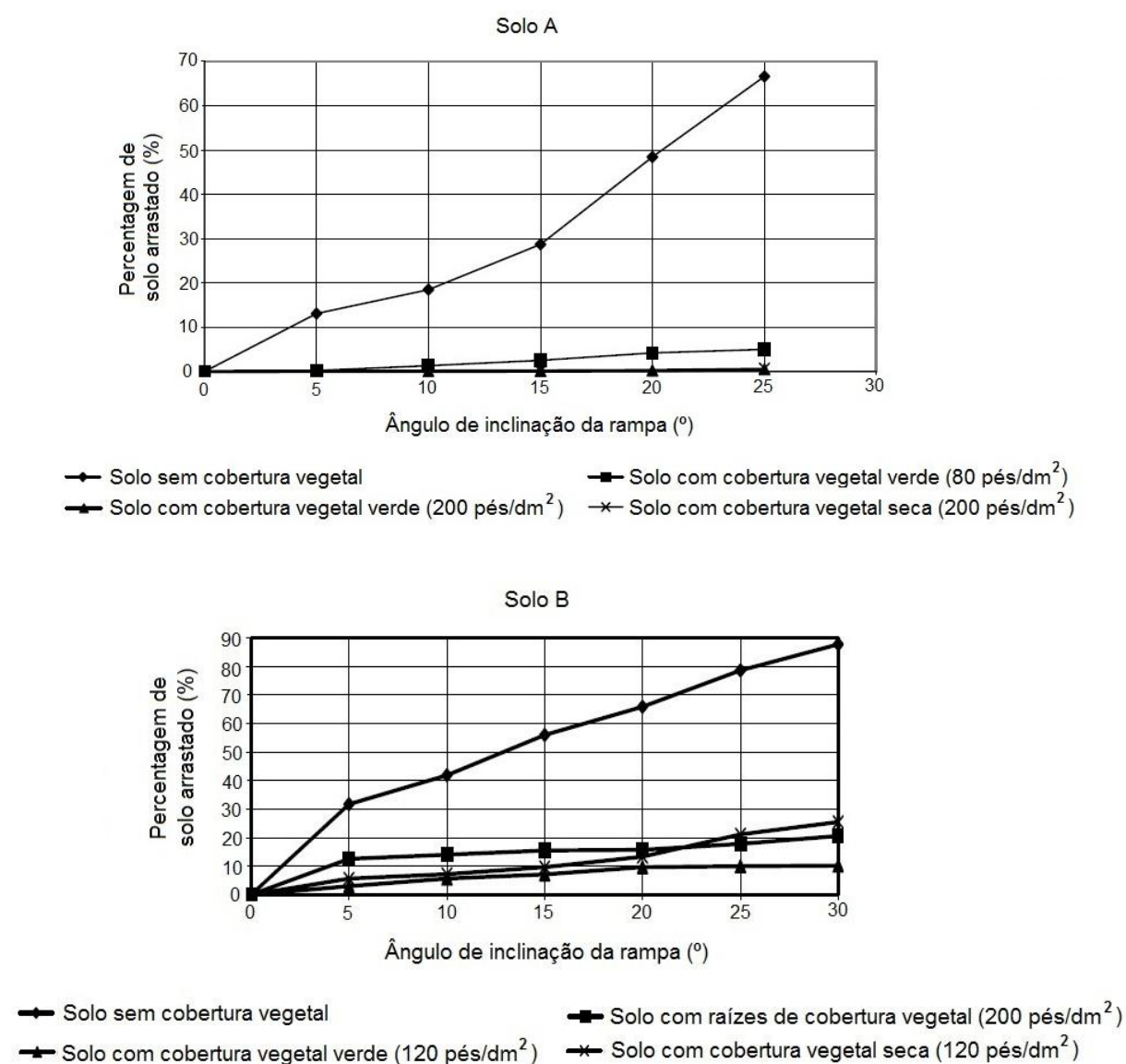


Figura 2.20 - Erosão do solo, com e sem cobertura vegetal, em função da inclinação da rampa (Falcão-Neves *et al.* 2006)

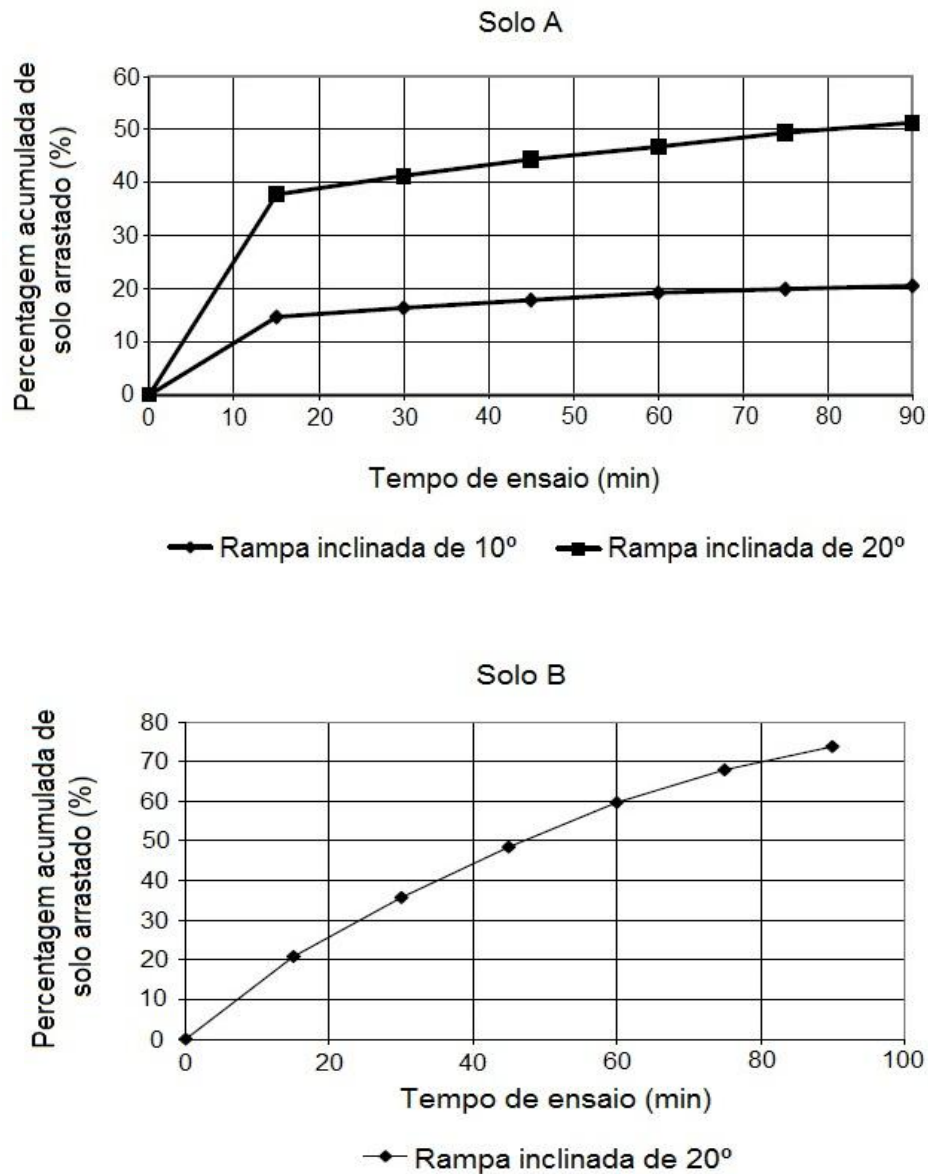


Figura 2.21 - Erosão do solo sem cobertura vegetal, em função do tempo de pluviosidade (Falcão-Neves *et al.* 2006)

No caso de solos sem qualquer cobertura vegetal, os resultados mostram que:

- Para a mesma inclinação do talude e mesmo caudal de precipitação, os solos constituídos por partículas de granulometria grosseira (solo A) apresentam maior resistência à erosão do que solos de granulometria fina (solo B);
- Para o mesmo caudal de precipitação e tempo, a quantidade de solo erodido aumenta marcadamente com a inclinação do talude;
- Para a mesma inclinação, caudal de precipitação e período de tempo, a quantidade de solo erodido na fase inicial da precipitação é superior à quantidade erodida nas fases seguintes, pois os constituintes mais finos são removidos logo no início da precipitação.

No caso dos solos com cobertura vegetal, os resultados mostram que:

- Para os mesmos tipos de solo, inclinação da rampa, caudal de água e tempo de ensaio, a quantidade de solo arrastado em provetes com cobertura vegetal (verde ou seca) é muito reduzida relativamente à quantidade de solo arrastado nos provetes sem cobertura vegetal;
- Sob as mesmas condições de ensaio, para o mesmo tipo de solo, com densidades diferentes de relva, as diferenças entre as quantidades de solo erodido são baixas.

As conclusões do ensaio realizado mostram que, na proteção contra a erosão é necessário ter em conta o fator tempo. Um motivo é que, atuando em conjunto com outros fatores, o tempo afeta a reação dos solos a este processo geológico. Outro motivo é que, no caso de muitas espécies, a estrutura do sistema de raízes pode mudar. Em geral, quando as espécies se tornam maduras, o seu sistema de raízes torna-se mais complexo.

Tendo em conta o modo como o coberto vegetal atua na proteção contra erosão, ao destruir a vegetação o Homem contribui, de uma maneira geral, para acentuar o processo erosivo. A este respeito, são atribuídos à vegetação efeitos importantes na defesa do solo contra a erosão pelo vento e pela água, impedindo o impacto direto das gotas da chuva e dificultando a escorrência superficial.

2.4 PROTEÇÃO CONTRA A QUEDA E ROLAMENTO DE BLOCOS

A queda de blocos consiste num movimento muito rápido, total ou parcialmente em queda livre de blocos de rocha ou solo a partir de um ponto elevado de uma escarpa ou vertente muito inclinada. Este processo sucede ao destaque dos blocos, fenómeno que consiste na separação de uma massa rochosa de um talude através de uma superfície de corte (Ayala *et al.*, 1987) ou de tração.

Numa sucessão alternada de camadas mais e menos competentes, o que desencadeia o processo de destaque dos blocos é a erosão diferencial. A progressão do desgaste da camada inferior mais branda conduz a uma concentração de tensões na base da camada superior mais competente, levando ao desenvolvimento de fenda de tração e conseqüente queda do bloco destacado. O trajeto do bloco pela encosta toma diferentes formas, seja em queda livre, saltação ou rolamento. Estes tipos de movimentos de queda de blocos (Figura 2.22) foram distinguidos em 1963 por Ritche, mencionado por Hagiwara *et al.* (2004), no contexto do desenvolvimento de modelos de simulação numérica.

Os locais com encostas em consola, os locais sujeitos a ciclos de gelo-degelo em que se encontram com frequência blocos fraturados e aqueles onde existem pedreiras em poço são alguns dos mais suscetíveis à ocorrência de queda de blocos (Highland & Bobrowsky,2008).

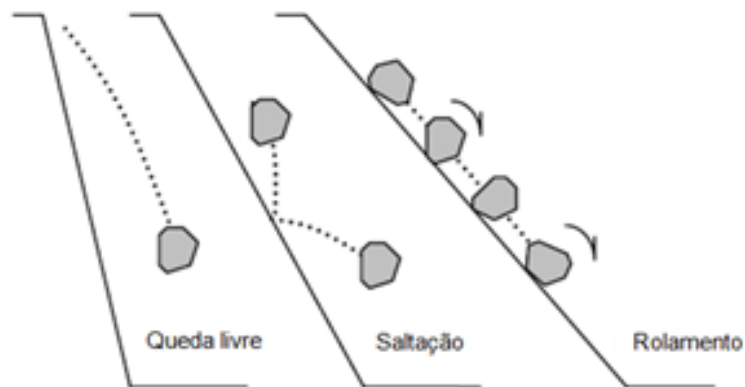


Figura 2.22 - Modelos de movimento de queda de blocos de rocha (adaptado de Hagiwara et al., 2004)

No projeto de um sistema de proteção é importante conhecer e prever o comportamento do material em movimento para que o sistema cumpra a sua função. Para tal, os principais fatores a ter em conta são a velocidade adquirida pelos blocos e a altura atingida pelos ressaltos (Hagiwara *et al.*, 2004)

Com o desenvolvimento dos modelos de simulação, têm surgido estudos que apontam para o efeito protetor da vegetação contra a queda de blocos. Um desses é o mencionado por Hagiwara *et al.* (2004) que consistiu numa simulação de um caso real da queda de um bloco de rocha num talude vegetado, após a ocorrência de um sismo. Os movimentos simulados foram os de saltação e rolamento, baseados nas marcas de movimento observadas no terreno. Consideraram-se diversos parâmetros com destaque para o fator de viscosidade, que corresponde a uma força de resistência e representa o efeito do contacto entre o bloco em queda e a vegetação. Os resultados evidenciaram que quando o fator de viscosidade é maior, a energia cinética do bloco tende a ser menor.

A conclusão anterior sugere que a presença de vegetação num talude tem um efeito redutor da energia cinética de blocos em queda, atenuando ou eliminando a ação desses blocos quando atingem o sopé do talude. Um exemplo concreto do que foi referido tem sido observado na encosta sobranceira à vila da Trafaria (Almada, Portugal), local propenso à ocorrência de quedas de blocos onde, segundo testemunho de habitantes locais, o pinhal aí existente tem atuado como elemento protetor de pessoas e bens ao intersectar os blocos provenientes de uma camada rochosa aflorando próximo da crista do talude, que rolam pela encosta abaixo (Figura 2.23). A Figura 2.24 mostra um bloco rochoso de dimensão métrica proveniente daquela camada, encostado ao muro do forte da Trafaria. Segundo Lamas (1989) a queda desse bloco tem origem no sismo de 1969, época em que o talude em causa apresentava uma muito menor densidade arbórea do que atualmente, o que em parte justifica a sua não interseção.



Figura 2.23 - Aspeto do pinhal na encosta da Trafaria: (a) vista de perfil; (b) vista de frente (arquivo pessoal)

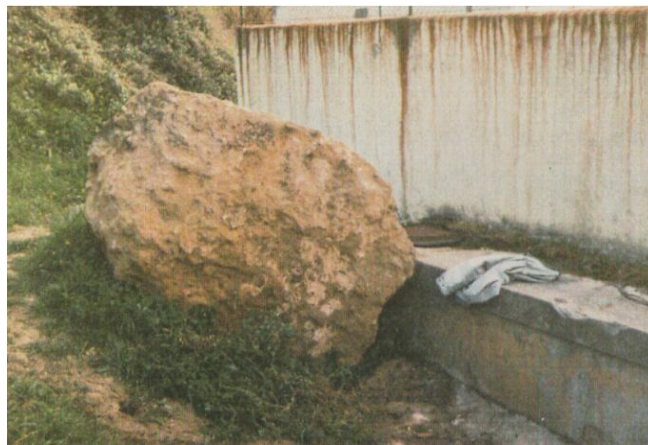


Figura 2.24 - Bloco rochoso destacado do topo da encosta da Trafaria, imobilizado junto ao muro exterior do forte (Lamas, 1989)

2.5 REMOÇÃO DA VEGETAÇÃO POR CAUSAS NATURAIS E ANTRÓPICAS

Tem-se discutido que a presença de cobertura vegetal exerce uma ação estabilizadora nos taludes, tanto para grandes como para pequenos movimentos de terrenos (Mendonça & Cardoso, 1998). Este efeito resulta da atuação das raízes como elementos de reforço do solo (Gray & Barker, 2004; Greenway, 1987; Ip, 2001; Ziemer, 1981-a) e tem maior relevância nos taludes cobertos por vegetação de grande porte. No entanto, Brown e Sheu (1975 *in* Mendonça & Cardoso, 1998) admitiram a possibilidade da presença do coberto vegetal, principalmente do arbóreo, não contribuir para a estabilização e proteção de taludes. A sua opinião é apoiada pelo facto de, na região de Queensland (Austrália), se terem observado ocorrências de instabilidade atribuídas à presença de árvores. Por seu lado, em certas regiões da Nova Zelândia constatou-se que a desflorestação não provocava deslizamentos (Brown & Sheu, *op.cit.*). Esta aparente divergência de opiniões não deixa de ter a sua justificação. Uma é que a remoção da vegetação diminui a intensidade de fendilhação, o que contribui para aumentar as condições de estabilidade. A outra justificação relaciona-se com dois

efeitos que, em geral, se fazem sentir com maior frequência na presença de coberto arbóreo. São eles os efeitos da sobrecarga e do vento sobre as copas, aspetos abordados adiante.

A opinião dos mesmos autores é tornada clara em averiguações que permitiram concluir que, durante um curto intervalo de tempo após a remoção da vegetação, o talude podia tornar-se mais estável (Prandini *et al.*, 1977). Em termos de coeficiente de segurança, índice que permite avaliar a estabilidade relativa dos taludes, o efeito positivo imediato da desmatação corresponde a um ligeiro aumento, conforme a Figura 2.25. A longo prazo este incremento na estabilidade tende a diminuir o que corresponde à diminuição do coeficiente de segurança global, podendo até mesmo cessar. Ziemer (1981-a) atribui esta ocorrência à deterioração do sistema radicular.

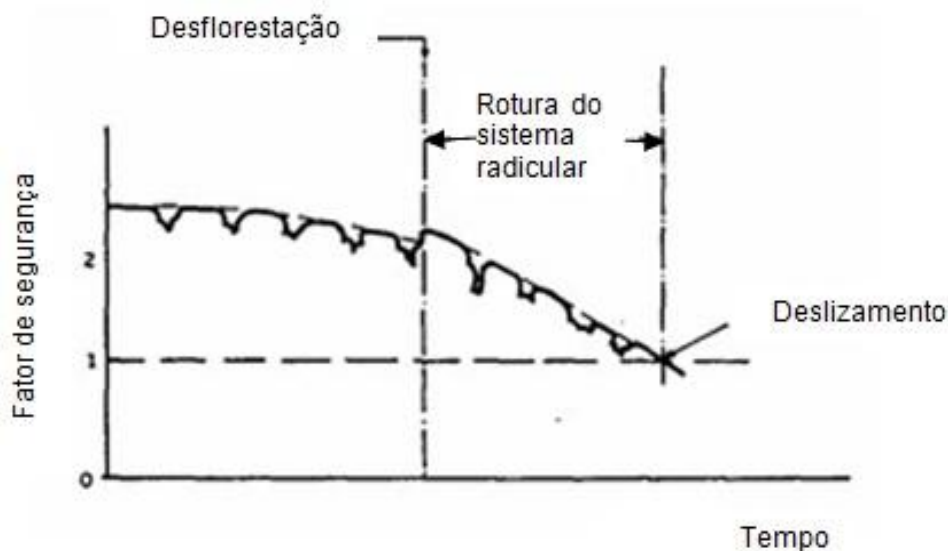


Figura 2.25 - Variação do coeficiente de segurança global devido à desflorestação (adaptado de Prandini *et al.*, 1977)

A exposição do coberto vegetal às ações do meio e do Homem coloca à prova a sua capacidade de resistência o que, em última análise, tem como consequência a remoção da vegetação. Neste contexto, enumeram-se como principais ações intervenientes na remoção do coberto vegetal os efeitos do ângulo de talude, da sobrecarga, do vento e os efeitos antrópicos, adiante descritos.

2.5.1 INCLINAÇÃO DO TALUDE

Este efeito foi analisado num estudo realizado por Norman *et al.* (1995) que consistiu em considerar três terrenos de diferentes inclinações (íngreme, suave e horizontal) e a incidência de queda de árvores igual em todos. O comportamento dos taludes diante do desenraizamento do ponto de vista das perdas de massa é resumido na Figura 2.26.

O desenraizamento das árvores em cada talude resulta na formação de pares de montículos e covas. No caso do talude íngreme (40° a 90°), uma grande quantidade de material desliza, formando um grande montículo e uma cova larga que permite estimar com maior precisão o volume inicial do

aglomerado de raízes da árvore arrancada. No caso do talude suave, com o tempo a cova volta a ser preenchida ao passo que as raízes da árvore arrancada se decompõem, formando um par montículo/cova menos marcado que no caso do talude íngreme. Esta análise permitiu verificar que quanto maior for a inclinação do talude, maior é a possibilidade de ocorrência de movimentos de terrenos por via da remoção do coberto arbóreo.

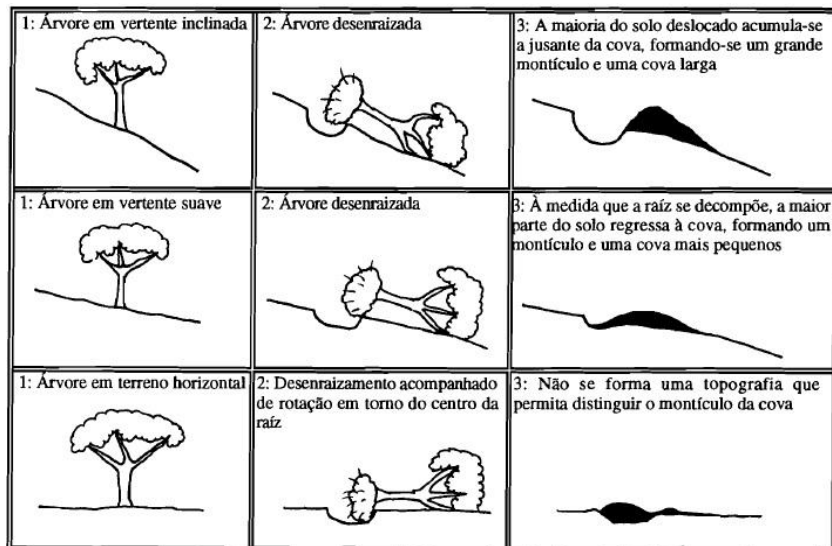


Figura 2.26 - Efeito do ângulo de talude na ocorrência de movimentos de massa (adaptado de Norman *et al.*, 1995)

Às causas anteriormente apontadas por Brown e Sheu (1975 *in* Mendonça & Cardoso, 1998) para justificar o efeito instabilizador da vegetação associa-se, agora, a ação do ângulo de talude. Assim, uma vez reunidas as condições para a ocorrência de episódios de instabilização, a presença do coberto vegetal nos taludes pode colocar em causa o seu efeito protetor. Esta situação deve-se, em boa parte, ao tombamento das árvores e ao desenraizamento (Figura 2.27) dos respectivos troncos o que, quando ocorre em número significativo numa mesma área, pode reduzir ou até anular os efeitos positivos das raízes, caules e folhas na proteção e estabilização dos taludes.



Figura 2.27 - Aspeto das cavidades abertas pelo desenraizamento: (a) arquivo pessoal; (b) Alvarenga, 2013

2.5.2 SOBRECARGA

O peso adicionado ao terreno pelo coberto vegetal, especialmente o arbóreo, é uma fonte de sobrecarga. Esta é gerada pelo peso imposto das árvores de grande porte, atuando segundo as suas componentes tangencial, instabilizadora, dirigida no sentido do talude, e normal, estabilizadora (Lamas, 1998), de acordo com a Figura 2.28.

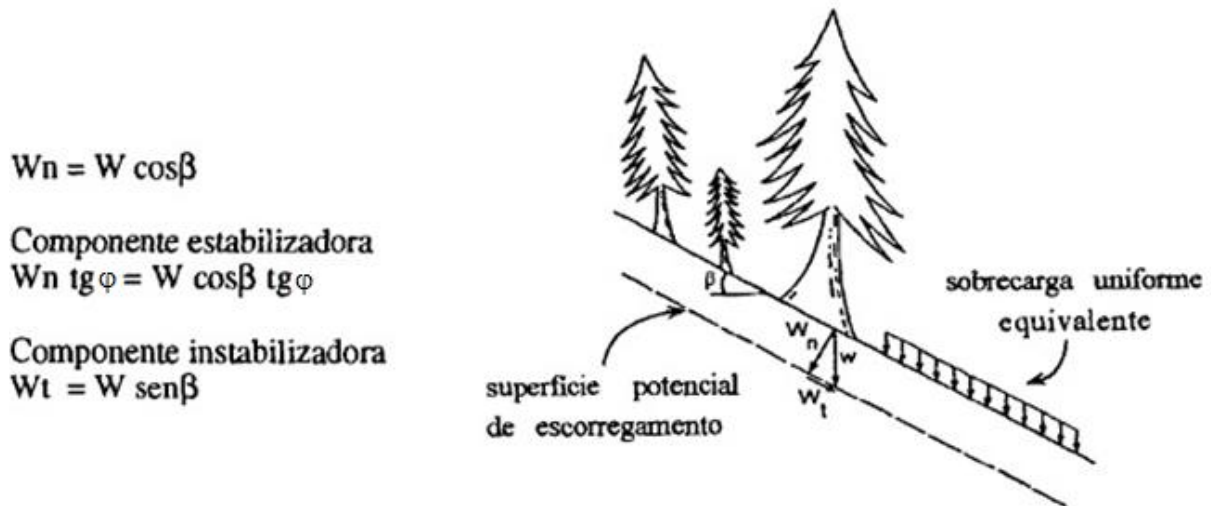


Figura 2.28 - Efeito da sobrecarga do peso das árvores (adaptado de Greenway, 1987)

Com base no modelo dos taludes infinitos, Gray & Megahan (1981 *in* Greenway, 1987) foram da opinião que a sobrecarga pode exercer uma ação estabilizadora desde que os solos estejam totalmente saturados, sejam pouco coesivos, tenham elevado ângulo de atrito e as vertentes sejam pouco inclinadas, isto é:

$$c < \gamma_w \cdot H_w \cdot tg\varphi' \cdot \cos^2\beta \quad (18)$$

Onde c é a coesão e φ' é o ângulo de atrito interno do solo; γ_w é o peso volúmico da água; β é a inclinação da vertente e da superfície potencial de rotura; e H_w é a altura da toalha freática acima daquela superfície de rotura.

Para taludes com um declive superior ao valor do ângulo de atrito interno do solo, a regra geral é a de que o efeito do peso das árvores poderá contribuir para os instabilizar (Prandini *et al.*, 1977; Greenway, 1987).

2.5.3 AÇÃO DO VENTO

O vento exerce um efeito vibratório no coberto vegetal que pode resultar na sua remoção. Um caso particular é o das árvores, em que o vento atua nas copas, gerando forças que são transmitidas às raízes através dos troncos. Tais forças provocam vibrações que aumentam a sobrecarga, diminuindo a resistência do solo. Em resultado, as árvores tombam e desenraízam.

Rodgers (1991) reportou-se a esta ação recorrendo a um dispositivo de agitação mecânico simulador do efeito do vento nas árvores. O objetivo foi o de tirar conclusões sobre o comportamento das camadas radiculares e das árvores quando sujeitos ao referido efeito. O local selecionado tinha uma história de instabilidade de árvores e o solo subjacente à camada radicular era areia siltosa. Os caules das árvores foram agitados até à rotura das camadas radiculares. Como resultado disso, houve um aumento das pressões intersticiais durante o carregamento dinâmico das árvores. Esse aumento provocou liquefação e fracturação hidráulica do solo, ocorrências que terão sido responsáveis pelo colapso do estrato radicular, na situação de derrube pelo vento. O resultado obtido vai ao encontro do que Swanston (1969) afirmou, considerando o vento como agente desencadeador de movimentos de terreno. Daí que a redução da sua ação, pela remoção do coberto vegetal, contribua para melhorar a estabilidade dos taludes.

2.5.4 CAUSAS ANTRÓPICAS

Um exemplo de ação antrópica é o que Ziemer (1981-a) relatou através de uma avaliação sobre o que ocorre, em termos da resistência conferida pelas raízes ao solo, aquando da remoção da vegetação por via da exploração madeireira. Entre as espécies vegetativas que foram avaliadas, (Figura 2.29), estavam os arbustos da espécie *Ceanothus sp.* (lilás da Califórnia).

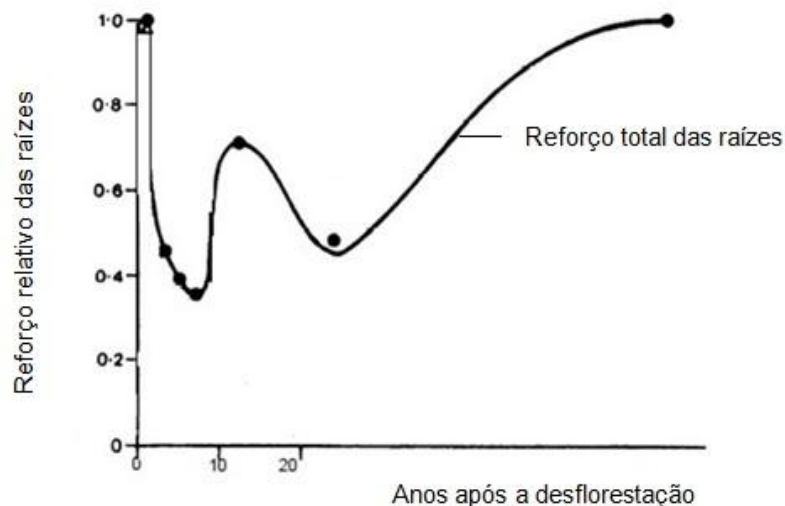


Figura 2.29 - Variação do reforço total das raízes do Lilás da Califórnia após a desflorestação (adaptado de O'Loughlin & Ziemer, 1982)

Neste caso verificou-se que, sete anos após a desflorestação, o reforço total diminuiu para 35% do reforço do local com vegetação. Ao fim de 12 anos após o corte e com a revegetação por arbustos da mesma espécie, o reforço total aumentou até 70%. Porém, durante certo tempo, o reforço voltou a diminuir devido ao amadurecimento das raízes de *Ceanothus sp* e ao declínio progressivo de um certo número residual de coníferas que ficaram no local. Passado tempo suficiente sem que houvesse remoção da vegetação, a percentagem de reforço pelas raízes aumentou.

Esta consideração sobre as principais ações intervenientes na remoção da vegetação termina com uma alusão às desvantagens da desflorestação que, segundo Prandini *et al.* (1977), são:

- Interrupção imediata do efeito estabilizador da vegetação, com consequências negativas no comportamento dos solos sujeitos a novas tensões;
- Interrupção imediata das funções de interseção, retenção e evapotranspiração das plantas, aumentando o nível freático e a quantidade de água que se infiltra para o interior do talude;
- Aumento da taxa de erosão e da infiltração;
- Subida do nível freático com possíveis efeitos na saturação superficial do solo;
- Perda dos efeitos mecânicos do sistema de raízes, com consequência na resistência ao corte do solo.

3 A ENGENHARIA NATURAL NA ESTABILIZAÇÃO E REABILITAÇÃO DE TALUDES

3.1 ENQUADRAMENTO

“Engenharia Natural é um sub-domínio da Engenharia Civil que prossegue objetivos técnicos, ecológicos, criativos, construtivos e económicos através sobretudo da utilização de materiais construtivos vivos, ou seja, sementes, plantas, partes de plantas e associações vegetais. Estes objetivos são atingidos através de métodos de construção próximos do natural, utilizando as diferentes vantagens que a utilização das plantas garante” (Hugo Schiechtl, 2007 *in* Fernandes & Freitas, 2011).

As primeiras experiências bem sucedidas de Engenharia Natural remontam ao século XIX, particularmente na Alemanha e na Suíça. Na segunda metade do século XX, surge a Engenharia Natural como área independente de Engenharia Civil através dos trabalhos do Eng.^o Hugo Meinhard Schiechtl (1922-2002), nos Alpes orientais austríacos. A vegetação usada por Schiechtl era adaptada às condições do local, o que veio a facilitar a sua aplicação em locais com características similares às do ambiente alpino. Com o tempo, da necessidade crescente de controlar os processos erosivos, os métodos de Engenharia Natural passaram a ser utilizados com maior frequência também noutras regiões, entre as quais a zona mediterrânica, os países da Europa Central e Atlântica (França, Suíça, Áustria, Alemanha, Norte de Itália e Inglaterra) e a América do Norte. Esta expansão da Engenharia Natural a outras regiões colocou em evidência o princípio orientador de que, preferencialmente, devem usar-se espécies de plantas autóctones pela sua maior facilidade de adaptação às condições locais e pela contribuição que dão para a biodiversidade do local e da sua vizinhança.

Em anos recentes, os conhecimentos adquiridos no âmbito da aplicação das técnicas de Engenharia Natural em ambiente mediterrânico têm permitido a sua adaptação à realidade portuguesa. Apesar de ser ainda pouco conhecida em Portugal, tem-se vindo a recorrer à Engenharia Natural na construção de muros de suporte ecológicos, na prevenção de deslizamentos de terra, na requalificação de linhas de água, no controlo da erosão, entre outras aplicações (Interaço, 2013).

O objetivo principal da Engenharia Natural é a construção de estruturas que, de forma natural, contribuam para a resolução de problemas de controlo da erosão, estabilização de solos, taludes e margens fluviais (*op. cit.*), bem como a maximização da funcionalidade ecológica e a reconstrução dos *habitats* característicos do local. Tal é conseguido à custa de técnicas em que se usam plantas e partes de plantas para, através do seu desenvolvimento em articulação com o solo e substrato geológico, contribuírem para a segurança duradoura contra as várias formas de erosão.

É com base no conhecimento das principais características das plantas que são definidos os objetivos a atingir com a Engenharia Natural, os quais, segundo Cornellini e Sauli (2012), são de natureza:

- **Técnico-funcional:** eficácia na proteção e contenção de um talude sujeito a erosão ou deslizamentos.
- **Ecológica:** intervenções de Engenharia Natural promovem a qualidade ambiental, reconstruindo ecossistemas, pela aplicação de espécies autóctones nas suas várias fases de desenvolvimento.
- **Paisagística/estética:** correção de danos na qualidade estética da paisagem com intervenções de Engenharia Natural.
- **Económica:** possibilidade de recultivar áreas sem vegetação a custos materiais e energéticos reduzidos, pela implementação de métodos alternativos aos tradicionais.

As intervenções de Engenharia Natural exibem um carácter multidisciplinar, combinando diversas matérias como as mecânicas dos solos e das rochas, a biologia, a engenharia civil, hidráulica e de ambiente, a fitossociologia, a arquitetura paisagista, entre outras (Interaço, 2013). É, pois, de salientar que as plantas são, não só um material comum à engenharia natural e arquitetura paisagista como aquele a que deve ser dada a primazia (Cabral, 2003).

3.2 DOMÍNIOS DE APLICAÇÃO

De acordo com Bloemer *et al.* (2015) a Engenharia Natural comporta vários domínios de aplicação. Relativamente aos taludes, atua na prevenção e impedimento da erosão superficial e profunda e na estabilização de zonas em risco de rotura por reposição do coberto vegetal, particularmente através do efeito de ancoragem pelas raízes e da drenagem do solo com a transpiração das plantas. Quanto às linhas de água, a Engenharia Natural intervém no reforço de diques, represas e margens ameaçadas pela erosão e na reneutralização de linhas de água degradadas ou muito alteradas. Do mesmo modo, contribui para a consolidação das áreas e margens marítimas e lagunares ameaçadas pela erosão, para além da estabilização de diques, dunas e terrenos envolventes. Possibilita também a criação de *habitats* adequados em zonas húmidas, bem como o restabelecimento e desenvolvimento de novas estruturas vegetais em áreas degradadas por explorações mineiras. Por último o estabelecimento de medidas de Engenharia Natural no abrandamento do escoamento superficial e/ou na promoção da infiltração favorece o balanço hídrico local e regional.

3.3 VANTAGENS E LIMITAÇÕES DA ENGENHARIA NATURAL

A Engenharia Natural inclui duas abordagens: a viva e a não viva. A abordagem viva recorre a partes vivas das plantas, a gramíneas ou a arbustos como elementos de reforço e prevenção da erosão dos solos. A abordagem não viva recorre a construções rígidas, como os muros de gravidade ou com contrafortes. O objetivo de associar estas duas abordagens é o de, nos casos em que for benéfico para os fins propostos e sustentáveis, melhorar o desempenho das construções rígidas e da vegetação na estabilização e proteção de taludes (Sotir & Grey, 1992). No entanto, é importante ter em consideração que, quanto à utilização das plantas e de elementos inertes em intervenções de engenharia, existem algumas vantagens e limitações, conforme indicado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Vantagens e desvantagens da utilização das plantas e de materiais inertes (adaptado de Fernandes & Freitas, 2011; Bloemer *et al.*, 2015)

Utilização de vegetação		Utilização de materiais inertes	
Vantagens	Desvantagens	Vantagens	Desvantagens
Aumento da estabilidade com o desenvolvimento das plantas e capacidade regenerativa	As exigências de consolidação e segurança não são preenchidas em situações de taludes em maciço rochoso, sub-verticais	Podem ser mais estáveis	Tendem a perder a sua eficiência devido à degradação e não possuem capacidade regenerativa
Reação positiva às perturbações devido à capacidade natural de adaptação das plantas	Exige aplicações dependentes das características do local, não sendo possível a construção em qualquer altura do ano	Mais independentes das características do local e de aplicação menos limitada no tempo	Estruturas construtivas rígidas ou pouco deformáveis
Aumento da biodiversidade e das funções de habitat	Só atinge a sua plena eficiência após algum tempo	Ficam funcionais a curto prazo	Sem função biológica
Valorização estética e paisagística com enquadramento da construção no espaço natural	Necessidade de espaço para o desenvolvimento da vegetação	Necessidade de menos espaço que o exigido para o desenvolvimento da vegetação	Constituem elementos estranhos na paisagem
Ação estruturante das plantas	Necessidade de mais estudos para definir com maior precisão as características físico/mecânicas das raízes		
Baixo consumo energético e melhoria do desenvolvimento autónomo dos sistemas naturais			

A Figura 3.1 reporta-se às intervenções de Engenharia Natural (com vegetação herbácea, vegetação lenhosa e suas combinações) comparando-as com as de Engenharia Civil em termos da sua eficiência ao longo do tempo.

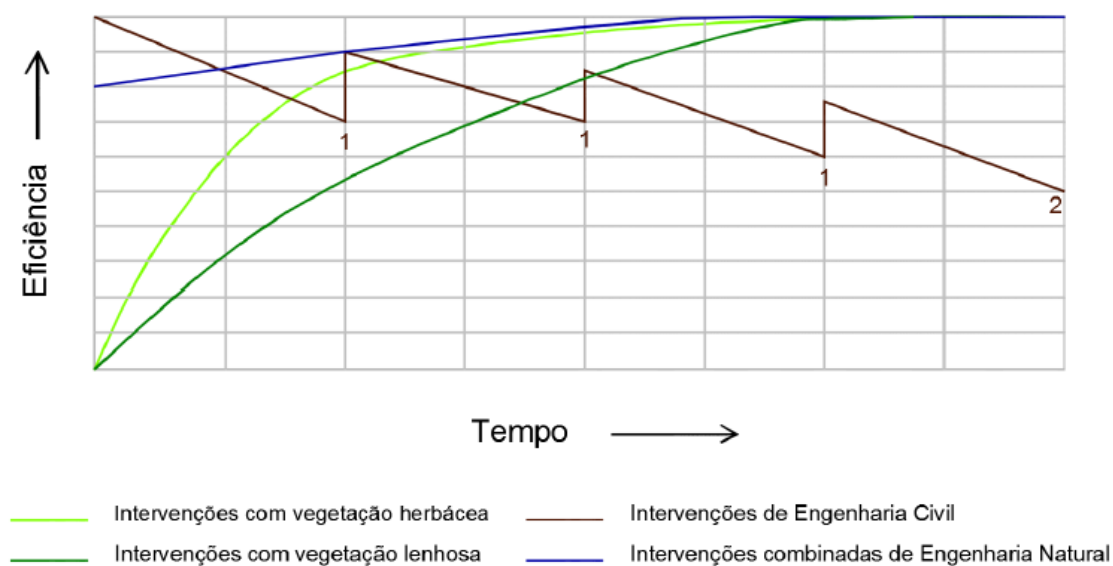


Figura 3.1 - Comparação entre a eficiência das intervenções de Engenharia Natural e as tradicionais (adaptado de Rauch, 2014 *in* Sousa, 2015)

Nas intervenções com vegetação herbácea e vegetação lenhosa observa-se uma eficiência nula, após o momento da sua implementação, e um aumento da eficiência com o tempo. A eficiência nula justifica-se pelo facto de, conforme a tabela anterior, o aumento da estabilidade conferida pela intervenção ocorrer à medida que as espécies se desenvolvem. Por outro lado, a eficiência aumenta mais rapidamente no caso da vegetação herbácea que no caso da lenhosa, devido ao desenvolvimento mais rápido das espécies herbáceas que das espécies lenhosas (Sousa, 2015).

As estruturas de Engenharia Civil exibem eficiência máxima logo após a sua conclusão, que, no entanto, diminui com o tempo devido à degradação das obras e ao facto de necessitarem de manutenção (Figura 3.1-1). Após a manutenção, a eficiência volta a subir, mas sem atingir o valor máximo. Esta sucessiva perda de eficiência ocorre até que as medidas de manutenção deixam de se poder realizar, sendo necessário reconstruir a obra (Figura 3.1-2). Por seu lado, as intervenções combinadas de Engenharia Natural, após a sua execução, apresentam uma eficiência inferior às de Engenharia Civil mas que aumenta, com o passar do tempo até atingir o seu máximo. No entanto, passado algum tempo, apesar do declínio dos materiais inertes, o seu efeito de suporte e estabilização, dá lugar à ação estruturante das plantas por meio dos seus sistemas radiculares e partes aéreas (*op. cit.*).

3.4 TÉCNICAS DE ENGENHARIA NATURAL

As técnicas de Engenharia Natural consistem em construções nas quais plantas vivas, material plantado ou associações de plantas são utilizadas para fins estruturais, muitas vezes combinadas com elementos inertes tais como pedras, cascalho, solo, madeira, aço ou geossintéticos. Na opinião de Lewis (2000), para a implementação de técnicas de Engenharia Natural são determinantes os seguintes fatores:

- **Condições climáticas:** precipitação e temperatura (média e máxima);
- **Topografia:** inclinação do talude, morfologia do terreno e direção da exposição aos raios solares;
- **Solo:** substrato, tipos de solo, permeabilidade, capacidade de retenção de humidade, disponibilidades de nutrientes;
- **Água:** regime hidrológico, velocidade de escoamento, localização de canais de drenagem naturais;
- **Processos erosivos:** tipo(s) de erosão e tendências geomorfológicas regionais;
- **Vegetação:** espécies de plantas e seu desenvolvimento no local da aplicação das técnicas e em locais adjacentes.

A seleção da(s) técnica(s) adequada(s) requer conhecer previamente os vários métodos construtivos, identificar o problema do local e definir os objetivos a atingir com a intervenção. Isto é importante pois existem várias técnicas de Engenharia Natural que podem ser aplicadas de várias maneiras, de forma isolada ou combinadas entre si. Associar soluções de Engenharia Natural permite otimizar os seus objetivos técnicos, classificados de acordo com a sua função. Assim, as técnicas podem ser agrupadas em três tipos principais:

- Proteção contra a erosão;
- Estabilização;
- Contenção.

A Figura 3.2 aponta os principais conjuntos de técnicas de Engenharia Natural de acordo com a sua função e profundidade de aplicação.

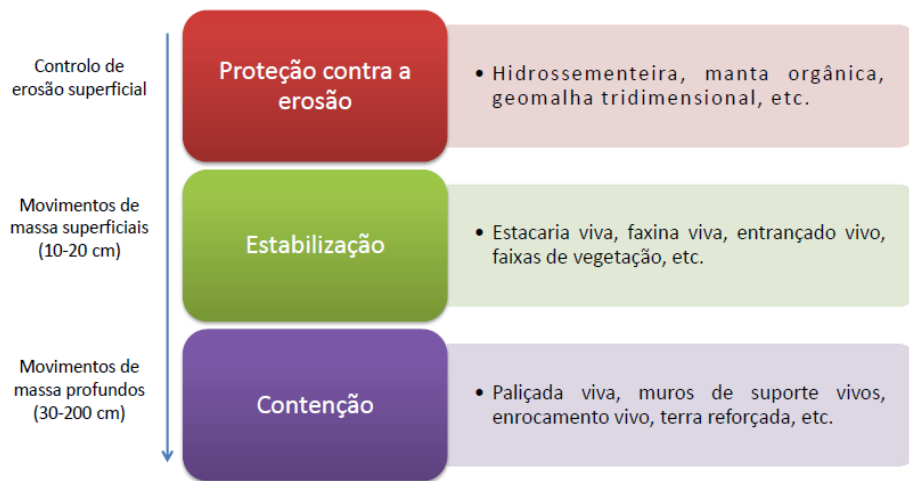


Figura 3.2 - Conjuntos de técnicas de Engenharia Natural (cedida por Aldo Freitas, agosto de 2015)

As técnicas anteriores podem ainda ser complementadas com sistemas de drenagem, caso haja essa necessidade. Assim, consegue-se efetuar o escoamento das águas dos terrenos de modo a minimizar a probabilidade de ocorrência de problemas de estabilidades dos taludes.

Na programação, projeto e execução de intervenções de Engenharia Natural, a utilização de plantas como material construtivo, torna necessário atender aos seguintes princípios gerais (Menegazzi & Palmeri, 2013):

- Empregar técnicas que requeiram o menor nível de energia (complexidade, tecnicismo, artificialidade, rigidez, custo), não sendo descartada a possibilidade de não intervir (Sauli *et al.* 2002). A Figura 3.3 dá exemplo deste princípio;
- Identificar caso a caso a técnica mais adequada para corrigir o problema com o mínimo de uso de material, tanto natural como sintético, dando preferência a soluções construtivas biodegradáveis e mais simples;
- Planejar, projetar e implementar intervenções na prevenção dos riscos hidrogeológicos, tendo em conta a proteção e promoção da qualidade do ambiente e a proteção do solo;
- Adotar métodos de execução que evitem uma perturbação irreversível das funções biológicas do ecossistema e sejam compatíveis com as condições necessárias de segurança e eficácia;
- Desenvolver um projeto por meio de uma análise que considere características climatológicas, geológicas, geomorfológicas, geotécnicas, hidrológicas, hidráulicas, florísticas, faunísticas, dos ecossistemas e da paisagem;
- Nas intervenções fluviais, devem examinar-se as características do fluxo hidráulico e físico, para verificar a viabilidade das técnicas;

- Nas intervenções em vertentes, devem examinar-se as condições de estabilidade, os principais parâmetros geotécnicos (peso volúmico, ângulo de atrito, coesão), a segurança da região através de uma escala de operações, a instalação de sistemas drenagem e a melhor estratégia para a recuperação ambiental;
- Utilizar o máximo possível plantas autóctones presentes no local a intervir, preservando-o cuidadosamente no início dos trabalhos para ser reutilizado;
- Definir as técnicas e quando devem ser aplicadas, tendo em conta os métodos de reprodução de cada espécie e o período adequado para a utilização das plantas (o período de repouso vegetativo).

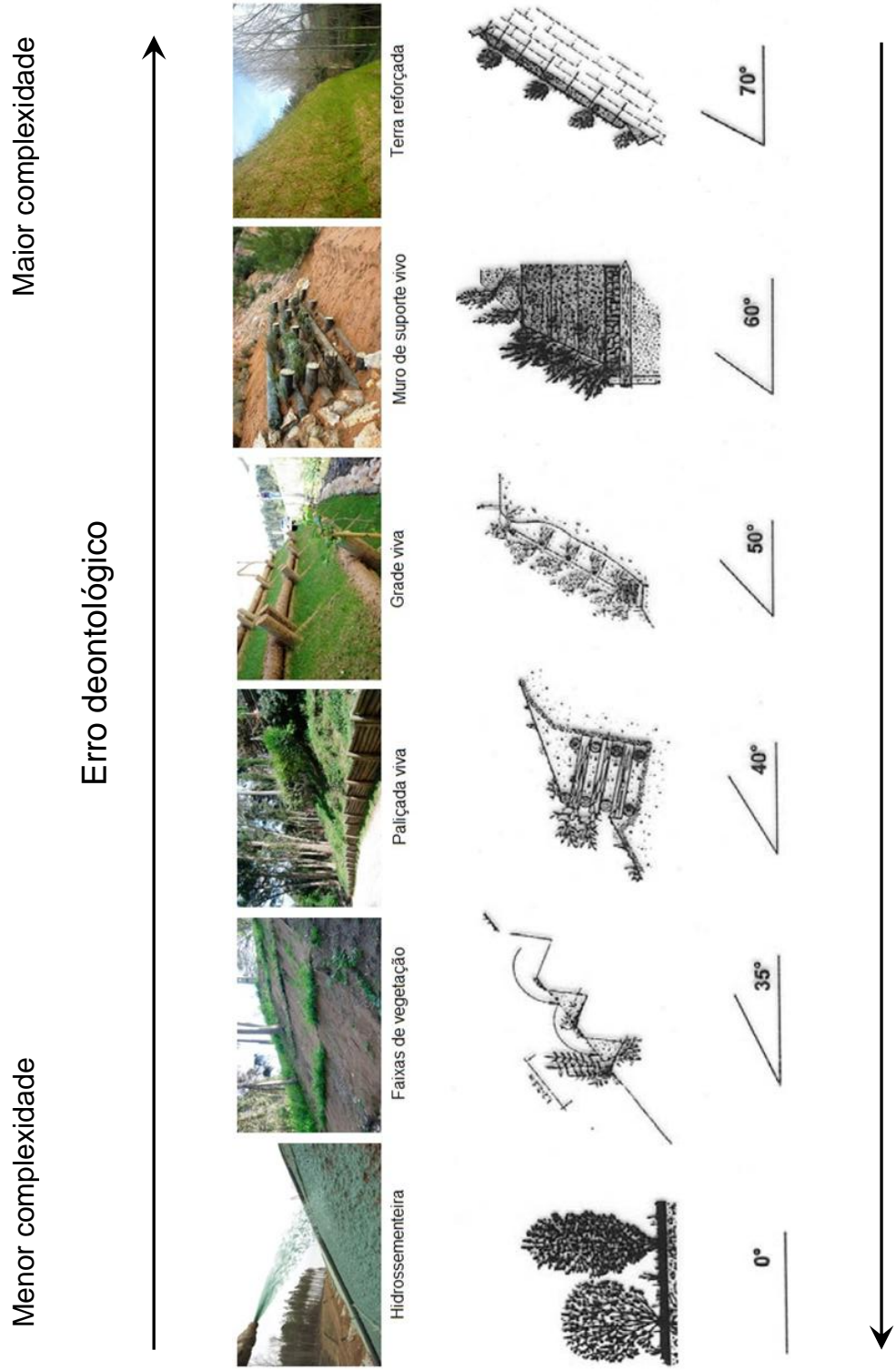


Figura 3.3- Esquema explicativo do princípio do nível mínimo de energia (adaptado de Menegazzi & Palmeri, 2013)

Quando a(s) técnica(s) a utilizar são subdimensionadas em relação ao problema real, isto é, são utilizadas intervenções demasiado simples em que a resistência fica aquém das solicitações atuantes, comete-se um erro técnico (Menegazzi & Palmeri, 2013; Sauli *et al.*, 2006). Ao contrário, comete-se um erro deontológico quando se empregam técnicas de Engenharia Natural com um grau de complexidade superior ao exigido pelo projeto (*op. cit.*).

3.4.1 PROTEÇÃO CONTRA A EROSÃO

O principal objetivo destas técnicas de Engenharia Natural é o de prover uma proteção efetiva da superfície do talude terroso prevenindo a perda da camada superficial do solo que, ao ocorrer com frequência num mesmo local, poderá potenciar episódios de instabilidade (Sousa, 2015). Para tal, as técnicas em causa recorrem a plantas, sementes ou partes de plantas, por unidade de área, protegendo o solo dos efeitos prejudiciais das forças mecânicas resultantes do impacto das gotas da chuva, do granizo, da ação do vento, do gelo e outras (Schiechtl, 2002).

HIDROSSEMENTEIRA

É um método de sementeira onde uma mistura de *mulch* (fibras de madeira), sementes, fertilizantes, corretivos biológicos de solo e água são colocados numa máquina que transforma a mistura num material consistente. A mistura é pulverizada sobre a superfície do terreno por um equipamento mecânico denominado hidrossemeador, que é composto por um tanque, uma bomba e mangueiras (Figura 3.4). É uma técnica de proteção contra a erosão cujo objetivo é proteger o solo e melhorar as suas características mecânicas e biológicas (Interaço, 2013; Fernandes & Freitas, 2011; Venti *et al.*, 2003).

O resultado é a obtenção de uma manta adesiva, tridimensional e porosa, que proporciona um ambiente com todos os elementos essenciais à germinação de sementes e ao desenvolvimento de uma cobertura vegetal saudável (Engenharia verde, 2009). Esta técnica aplica-se em taludes de margens fluviais, de áreas aridas e de explorações a céu aberto sendo, neste último caso, utilizada para fins de recuperação paisagística (Ecosalix, s.d.).



Figura 3.4 - Hidrossementeira (Venti *et al.*, 2003)

MANTA ORGÂNICA

É um método de sementeira com cobertura de proteção que consiste em aplicar no terreno esteiras biodegradáveis (Figura 3.5) com uma matriz de fibras vegetais (coco, palha, juta e madeira) que são esticadas e fixadas à superfície do solo com estacas de madeira ou grampos metálicos, adaptando-se e cobrindo-o. É aplicada após a sementeira de sementes de espécies herbáceas adequadas ao local, permitindo a criação de um microclima ideal para uma rápida germinação (Venti *et al.*, 2003). A principal função desta técnica é proteger o solo contra a erosão eólica e hídrica, evitando perdas de solo (Interaço, 2013; Solutioma, s.d.).



Figura 3.5 - Manta orgânica (Interaço, 2013)

GEOMALHA TRIDIMENSIONAL

Consiste em aplicar no terreno uma esteira sintética com os filamentos dispostos de forma cruzada ou entrelaçada (Figura 3.6). É fixada ao terreno através de grampos e deve ser preenchida por terra vegetal e hidrossementeira. Tem uma ação de proteção imediata e permite a micro estabilidade, reforçando e entrelaçando o conjunto plantas-solo e criando um sistema artificial de fixação das raízes ao solo, o que justifica a sua aplicação em taludes muito íngremes (Interaço, 2013; Solutioma, s.d.).

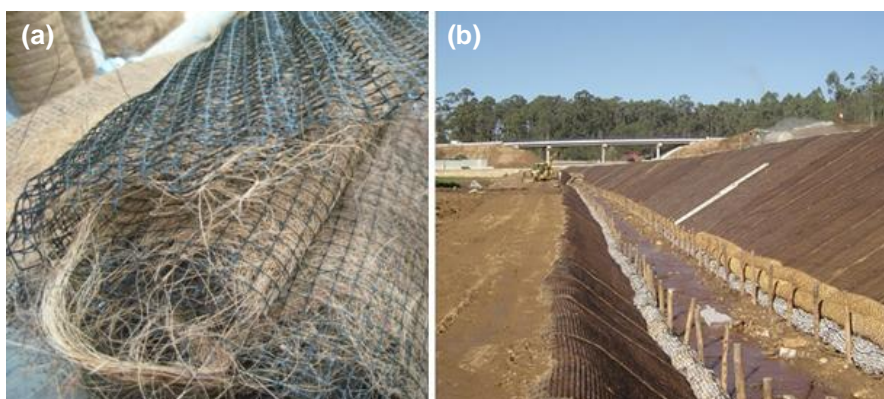


Figura 3.6 - Geomalha tridimensional: (a) em armazém (arquivo pessoal, 2015); (b) aplicação num talude (Interaço, 2013)

SEMENTEIRA COM PALHA E BETUME (SISTEMA SCHIECHTELN)

Este método desenvolve-se em três etapas. A primeira é a colocação de palha na superfície do talude, distribuída uniformemente. A segunda é a aplicação de uma mistura de sementes de espécies herbáceas adequadas ao local e fertilizantes. Por último, sobre a superfície do talude, é pulverizada uma emulsão de betume e água, para evitar o movimento dos materiais. Esta técnica visa proteger o solo contra a erosão eólica e hídrica (Venti *et al.*, 2003).

3.4.2 ESTABILIZAÇÃO

Deste conjunto fazem parte as técnicas que são aplicadas onde o reforço em profundidade se mostra necessário. Para tal utilizam-se estacas vivas ou conjuntos de estacas vivas com plantas. O desenvolvimento das raízes é um fator importante para o sucesso da aplicação destas técnicas pelo que, a sua eficácia é tanto maior quanto maior for a taxa de crescimento radicular (Schiechtl, 2002).

ESTACARIA VIVA

Método que consiste em inserir no solo estacas² de madeira ou ramagens de espécies com capacidade de propagação vegetativa (Figura 3.7). O sistema de estacas cria uma camada radicular capaz de estabilizar o solo por reforçar e aumentar a ligação entre as suas partículas e extrair o excesso de humidade (Sotir & Grey, 1992). Quanto maior for a estaca, maior a profundidade a que se irão desenvolver as raízes e maior a estabilidade em profundidade. Esta técnica aplica-se a taludes de escavação ou como complemento de estruturas de estabilização através da sua colocação em interstícios e fissuras de enrocamentos, gabiões, muros de suporte, etc. (Ecosalix, s.d.).

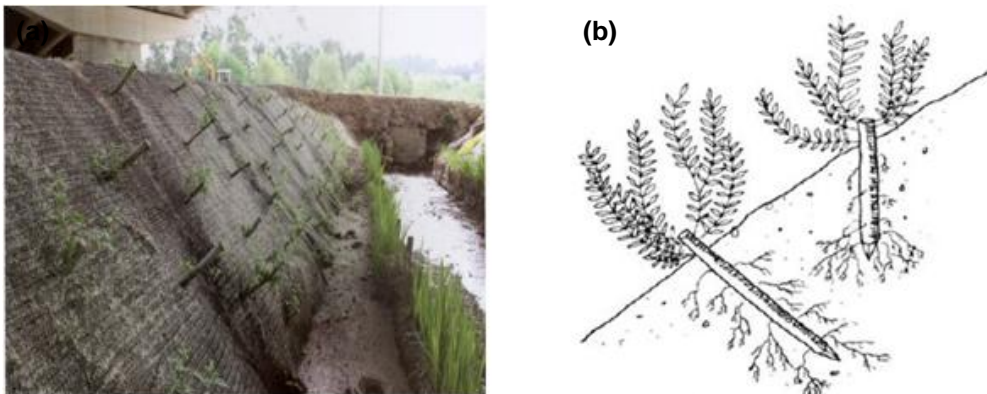


Figura 3.7 - Estacas vivas: (a) exemplo de aplicação (Ecosalix, s.d.); (b) modos de aplicação no terreno (Fernandes & Freitas, 2011)

A Figura 3.7 à direita mostra que estacas que são cravadas na posição sub-horizontal, em relação ao talude, tendem a desenvolver o seu sistema de raízes em toda a estaca, ao passo que as cravadas verticalmente desenvolvem-no principalmente na parte terminal (Fernandes & Freitas, 2011). Assim,

² A Engenharia Natural define “estaca” como um elemento vivo, parte do caule de uma planta que, cortada e enterrada parcialmente no solo seja capaz de emitir raízes e posteriormente folhas (Bifulco & Rego, 2012).

para que o método de aplicação de estacaria viva seja mais eficaz, em geral, é dada preferência à instalação das estacas na posição sub-horizontal.

FAXINA VIVA

Técnica na qual são elaborados feixes de estacas vivas de espécies lenhosas com capacidade de propagação vegetativa (Figura 3.8). Os feixes são atados por corda de sisal ou arame, colocados em valas e fixados no terreno por troncos de madeira vivos ou mortos. Os troncos devem ser colocados verticalmente no terreno de modo a que as suas extremidades superiores fiquem niveladas com o topo dos feixes. Logo após a colocação dos feixes, as valas são preenchidas com terra. Os feixes, ao serem cortados e instalados, devem ser capazes de enraizar, proporcionando efeito estabilizador nos taludes, principalmente nos associados a linhas de água de energia média (Ecosalix, s.d.; Schiechtl, 2002; Venti *et al.*, 2003).



Figura 3.8 - Faxinas vivas como reforço de taludes de margem de ribeira. (Ecosalix, s.d.)

A Figura 3.9 mostra uma possibilidade de colocação de faxinas vivas ao longo de um talude.

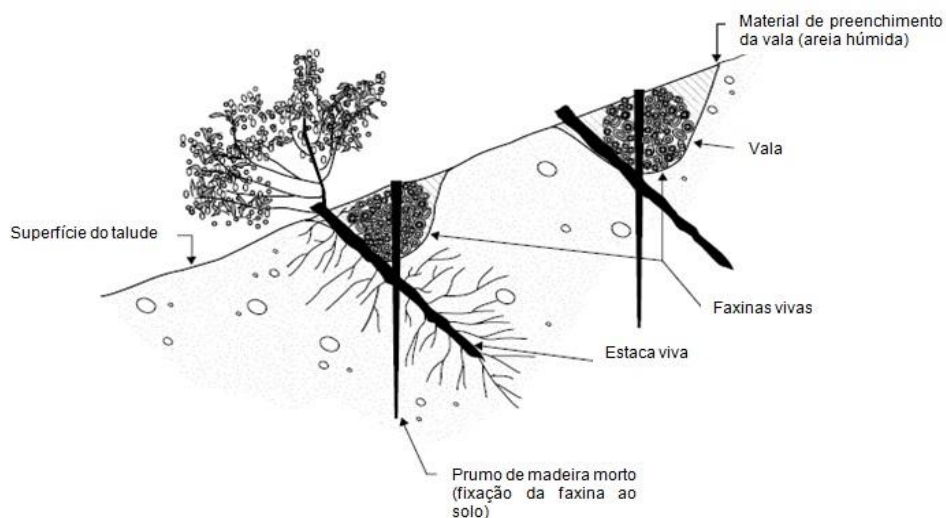


Figura 3.9 - Secção transversal de um talude estabilizado com faxinas vivas. (adaptado de Sotir & Grey, 1992)

ENTRANÇADO VIVO

Técnica que consiste na execução de um entrançado de ramos vivos de espécies lenhosas com capacidade de propagação vegetativa, fixadas a prumos colocados verticalmente no terreno (Figura 3.10). Aplicam-se a taludes associados a linhas de água com velocidades de escoamento média-baixa e transporte sólido reduzido. A principal função é a de estabilizar a base das margens em erosão, exercendo também uma proteção e contenção imediatas do terreno (Ecosalix, s.d.; Venti *et al.*, 2003).



Figura 3.10 - Entrançado vivo (Interação, 2013)

FAIXAS DE VEGETAÇÃO

Este método consiste na abertura de banquetas, em linhas paralelas longitudinais, onde são plantadas estacas vivas de espécies arbustivas autóctones com capacidade de propagação vegetativa e/ou plantas em torrão de espécies arbustivas autóctones (Figura 3.11). O trabalho deve ser realizado da base para o topo do talude para evitar que o solo da banqueteta situada acima cubra a camada arbustiva imediatamente abaixo. As zonas entre terraços podem ser revestidas com uma manta orgânica de fibra de coco e complementadas sempre que possível com uma sementeira. As faixas de vegetação constituem uma técnica que se aplica à estabilização de taludes incoerentes, correção de deslizamentos superficiais e a taludes em aterro (Ecosalix, s.d; Engenharia verde, 2009; Sotir & Grey, 1992).

É um método similar ao de faxinas vivas no sentido que envolve o corte e a colocação de estacas vivas nos taludes. No entanto, estas duas técnicas diferem na orientação das estacas e na profundidade a que elas são colocadas no talude (Lewis, 2000).



Figura 3.11 - Faixa de vegetação (Interação, 2013)

BIO ROLO

Estruturas cilíndricas compostas por uma matriz de fibra de coco compacta, com uma densidade homogênea ao longo de todo o rolo (Figura 3.12). São reforçados externamente por uma rede estrutural em polipropileno ou em fibra de coco. Internamente podem ser colocados bolbos de espécies aquáticas. Os bio rolos têm como principais funções a estabilização de margens rios, de lagos, de albufeiras e o controlo de acarreo de materiais em taludes de estradas (Interação, 2013).



Figura 3.12 - Biorolo: (a) em armazém (arquivo pessoal); (b) aplicação em margem fluvial (Interação, 2013)

GABIÃO CILÍNDRICO

Estrutura constituída por rolos cilíndricos, flexível com uma rede de polipropileno de alta densidade (PEAD) preenchida por pedras (Figura 3.13) O seu peso gravítico permite exercer a ação de proteção dos taludes conferindo-lhe maior estabilidade. São estruturas fáceis de instalar, versáteis e com capacidade de absorver os assentamentos do terreno, mantendo a sua integridade (Ecosalix, s.d.).



Figura 3.13 - Gabião cilíndrico (Interação, 2013)

3.4.3 CONTENÇÃO

Os métodos de contenção caracterizam-se por combinar materiais vivos e inertes, exercendo efeito imediato após a sua aplicação. Por isso, normalmente são utilizados antes dos que recorrem apenas a material vivo. A sua eficácia aumenta com o avançar do tempo (Schiechtl, 2002).

PALIÇADA VIVA

Estrutura linear de sustentação aplicável no reforço superficial de taludes com declives suaves e que também proporciona um efeito anti erosivo em solos de granulometria fina (argilas e siltes). A técnica consiste em introduzir no terreno, verticalmente, estacas vivas, fixando nas mesmas vários troncos de madeira sobrepostos (Figura 3.14). Estes podem ser alternados com estacas vivas e/ou plantas em torrão (Ecosalix, s.d.; Schiechtl, 2002).



Figura 3.14 - Paliçada viva (Interação, 2013)

MUROS DE SUPORTE VIVOS

São estruturas de suporte gravítico que podem ser constituídos por:

- a) Troncos de madeira (muro de madeira tipo *cribwall* simples, duplo e tipo Roma), conforme a Figura 3.15.

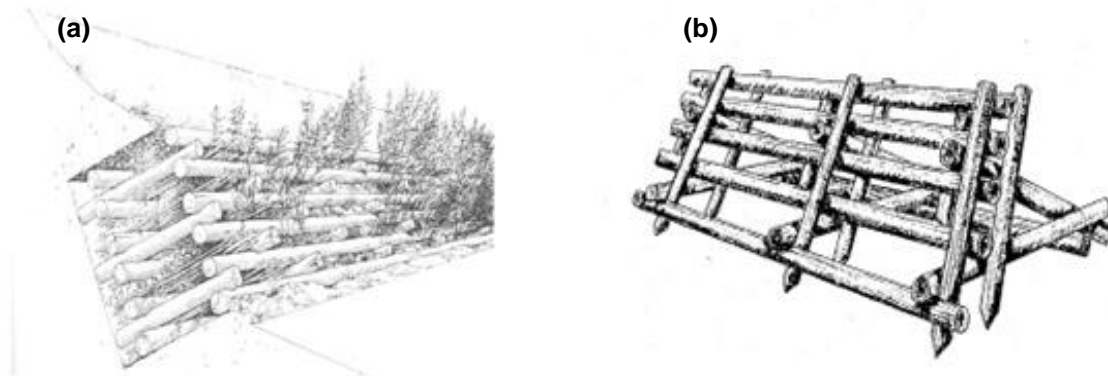


Figura 3.15 - Muros de suporte vivos: (a) tipo cribwall duplo; (b) tipo Roma (Venti, 2003)

As estruturas deste tipo classificam-se como simples ou duplas consoante a utilização, ou não, de troncos longitudinais na parte interna da estrutura. São formadas por “caixas” resultantes da sobreposição de troncos transversais e longitudinais.

De acordo com Sotir e Grey (1992), enquanto que as raízes das estacas vivas se vão estabelecendo, a vegetação subsequente passa a assumir as funções estruturais dos elementos de madeira (Figura 3.16).

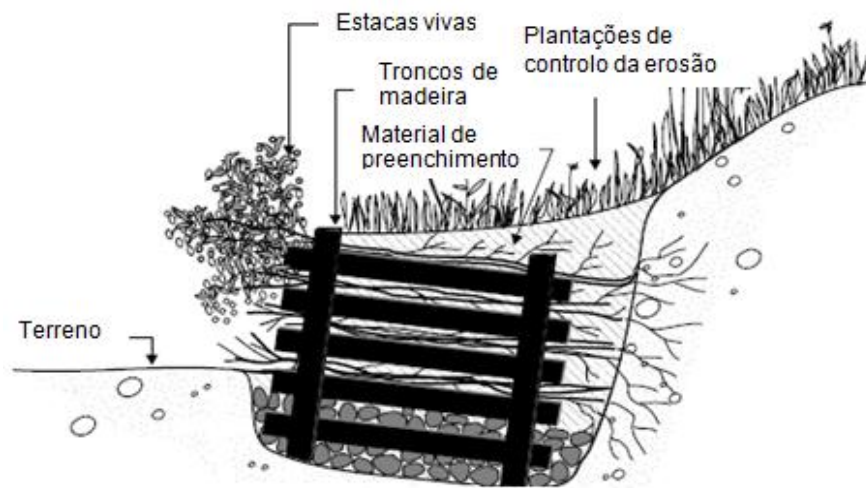


Figura 3.16 - Aspeto construtivo de um muro de madeira tipo cribwall em seção transversal (adaptado de Sotir & Grey, 1992)

- b) Troncos de madeira e estrutura em aço pré-fabricada (muro vivo armado), conforme a Figura 3.17.



Figura 3.17 - Muro vivo armado (Interação, 2013)

c) Betão (muro de betão *cribwall*) (Figura 3.18)



Figura 3.18 - Muro de betão tipo *cribwall* plantado (Aspia, s.d.)

No caso dos muros com troncos de madeira, como revestimento interior pode usar-se pedra, terreno local/vegetal, estacas vivas/plantas em torrão e outros materiais. Quanto aos com troncos de madeira e estrutura de aço o seu interior é preenchido por terreno local/vegetal e nos espaços entre os troncos de madeira é colocada vegetação para reforço do solo. Os muros de suporte vivos têm como principal função a contenção de taludes muito íngremes, dado possuírem uma elevada capacidade para suportar cargas (Ecosalix, s.d.; Sotir & Grey, 1992; Venti *et al.*, 2003).

ENROCAMENTO VIVO

Obra que consiste na colocação de blocos de rocha sobre o terreno e cujo objetivo é proteger os taludes da erosão, de um modo imediato, robusto e permanente (Figura 3.19). Nos vazios entre as pedras são colocadas estacas vivas (ex. salgueiro) para, através do desenvolvimento do seu sistema radicular, aumentarem o efeito estabilizador do solo (Ecosalix, s.d.; Fernandes & Freitas, 2011).



Figura 3.19 - Enrocamento vivo (Cornelini & Sauli, 2012)

GABIÃO VIVO

Estruturas de suporte que consistem em caixas de arame de aço galvanizado, formando uma malha hexagonal, preenchidas com cascalho (Figura 3.20). No seu interior são colocadas estacas vivas que podem ser dispostas de maneira irregular ou em filas na primeira malha do gabião superior (ex. estacas de salgueiro). É uma obra que contribui para a defesa longitudinal de taludes com instabilidade gravítica (Interaço, 2013; Fernandes & Freitas, 2011). O gabião deve ser ancorado ao terreno nos locais onde tende a romper por ação mecânica (Schiechtl, 2002).



Figura 3.20 - Gabião vivo (Interaço, 2013)

A parte de trás da fundação (mais próxima da inclinação) deve ser mais escavada que a parte da frente para adicionar estabilidade à estrutura e garantir que os galhos vivos enraízem bem.

A estrutura adquire maior estabilidade com o desenvolvimento das raízes das estacas, ficando vinculada ao terreno (Figura 3.21).



Figura 3.21 - Aspectos construtivos de um gabião vivo (cedida por Carlo Bifulco)

TERRA REFORÇADA

Trata-se de uma obra na qual o peso próprio da estrutura é mobilizado para a contenção dos taludes onde é aplicada. É constituída por várias camadas de terreno e por geogrelhas de reforço (Figura 3.22). A proteção do seu paramento frontal é assegurada por mantas orgânicas, ou outros materiais, e vegetação (Ecosalix, s.d.). A sua elevada capacidade de suporte leva a que as possibilidades de aplicação desta obra se estendam a taludes de elevada inclinação (no máximo 60°) (Cornelini & Sauli, 2012). Para além disso, é uma obra de longa durabilidade, adaptável a qualquer tipo de solo e que confere às plantas um papel estético (Ecosalix, s.d.).



Figura 3.22 - Aplicação de terra reforçada em talude de autoestrada, Itália: (a) aspeto durante a construção; (b) aspeto passados 18 anos (Cornelini & Sauli, 2012)

GRADE VIVA

Estrutura em elementos de madeira dispostos perpendicularmente entre si e suportada por troncos de madeira cravados no solo (Figura 3.23). Posteriormente enche-se a estrutura com terreno local/vegetal, e procede-se à introdução da vegetação (estacas vivas, plantas em torrão, em raiz nua, hidrossementeira). Aplica-se na sustentação e contenção de taludes muito íngremes (com declives entre 45 e 55°), devido ao efeito de reforço por parte das raízes, no controlo de deslizamentos de terra e na requalificação de taludes ravinados (Interaço, 2013; Fernandes & Freitas, 2011).



Figura 3.23 - Grade viva (Ecosalix, s.d.)

3.4.4 DRENAGEM

As águas superficiais têm grande influência na estabilidade dos taludes. Daí a importância de recorrer a obras de drenagem cujo objetivo é complementar as obras de estabilização e de contenção das encostas ou vertentes instáveis. Para caudais pequenos e permanentes o consumo de água por parte das plantas facilita a sua absorção do terreno (Schiechtl, 2002). No caso da presença de plantas não ser, por si só, suficiente, a drenagem é conseguida à custa de soluções complementares. Neste contexto destaca-se o conceito de drenagem biotécnica que consiste na utilização de plantas com elevada capacidade de evapotranspiração que, combinadas com sistemas de construção adequados, asseguram uma drenagem ativa de toda a massa de solo (Fernandes & Freitas, 2011).

A propósito de sistemas de drenagem realça-se ainda que os exemplos que se seguem, bem como os demais existentes, não são específicos da Engenharia Natural.

CANAIS RELVADOS

Sistema de plantação de canais de escoamento médio revestidos por placas de relva cujo objetivo é aumentar a resistência à erosão, favorecendo a perda de água por evapotranspiração (IPCB, 2015).

O alinhamento dos canais deve seguir o fluxo natural da água para que esta não se infiltre na encosta e promova a sua instabilidade. É uma técnica aplicável apenas em taludes terrosos e com boa adaptação à paisagem (Schiechtl, 2002).

DRENOS DE FAXINAS VIVAS

Construções em madeira, pedra e material vivo (estacas vegetativas), dispostas transversalmente ou longitudinalmente em relação à linha de água (Sauli *et al.*, 2006). Um caso particular é o das escovas vivas conforme representado na Figura 3.24. Os feixes de estacas são colocados em sulcos que, no geral, têm profundidade de 50 cm e largura de 20 cm. As estacas podem ser de salgueiro, tamargueira e amieiro, tendo 80 cm de comprimento e 5 a 10 cm de diâmetro. Estacas com diâmetro até 5 cm podem ser colocadas em maior número nos sulcos do que as restantes. O sulco é depois preenchido com terra para que as estacas contactem totalmente com o terreno (C. Bifulco, comunicação pessoal, 2015). No geral, as estacas são fixadas ao terreno por prumos de madeira. Porém, em encostas muito íngremes, para evitar a quebra do feixe, é usado um sistema de reforço por cabos. Alguns feixes podem ser colocados em cima uns dos outros, sendo de arbustos mortos os que ficam mais em baixo (IPCB, 2015, Schiechtl, 2002).

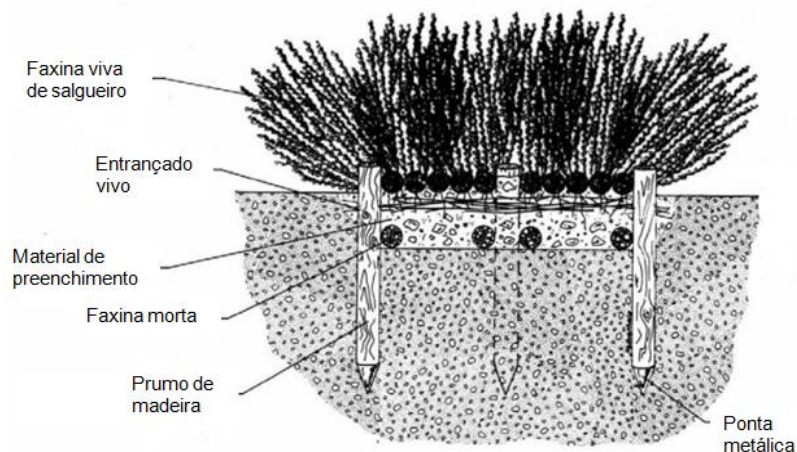


Figura 3.24 - Representação de um dreno de faxina viva do tipo escova viva (Sauli *et al.*, 2006)

FILTROS E MUROS DE PEDRA

Consiste na colocação de material permeável, como o cascalho, o qual é disposto em camadas desde a base do declive. A aplicação desta técnica termina após a plantação da superfície, podendo ser combinada com um muro de suporte e associada a um dreno de fundo de encosta (IPCB, 2015).

COLCHÕES VIVOS

Estruturas pré-fabricadas em malha de arame preenchidas com material inerte (cascalho), conforme a Figura 3.25. Na interface entre o terreno e os colchões é colocado geotêxtil e no interior destes inserem-se estacas vivas com 50 cm de comprimento mínimo que penetram no terreno 10 cm ou

mais, devendo sobressair acima da altura total do colchão. Sempre que sejam instalados nos lados inclinados do colchão, executa-se uma sementeira a lanço com rega, ficando a sua parte central sem sementeira (C. Bifulco, comunicação pessoal, 2015).

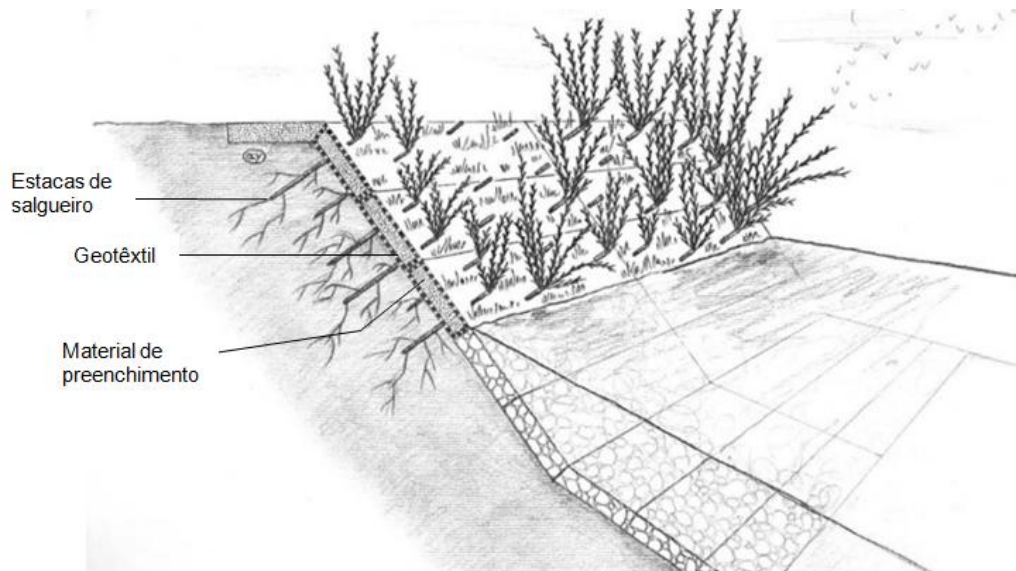


Figura 3.25 - Colchões vivos com desenvolvimento de estacas de salgueiro (Sauli *et al.*, 2006)

VALETAS VIVAS

Colchões vivos instalados em V no qual se procede a uma sementeira a lanço com rega (C. Bifulco, comunicação pessoal, 2015).

3.5 MANUTENÇÃO DAS TÉCNICAS DE ENGENHARIA NATURAL

Ao selecionar materiais de construção vivos e inertes, bem como o tipo de intervenção o objetivo deve ser conseguir uma sustentabilidade elevada com reduzidas necessidades de manutenção.

Bloemer *et al.* (2015) enumera alguns trabalhos de manutenção. No caso das espécies herbáceas o autor refere sementeira complementar, fertilização, plantação de placas de relva, torrões com vegetação e outros tapetes relvados, rega e recolha de resíduos. Relativamente às árvores e arbustos, são listados o corte e manutenção, fertilização, irrigação e por fim plantação complementar e replantação.

Relativamente a este último ponto refira-se que a Engenharia Natural não recorre a árvores de grande porte, o que facilmente se explica pelas diversas razões já expostas anteriormente relativamente a este tipo de plantas. Assim, para além dos arbustos e herbáceas, a Engenharia Natural aplica árvores de pequeno porte. A estes trabalhos de manutenção, Silva (2012) ainda

acrescenta a drenagem, a prevenção de danos causados pela fauna, o uso de adubo para melhorar o solo e a utilização de pasto com espécies adequadas ao local.

3.6 CASO DE ESTUDO DA APLICAÇÃO DE FAIXAS DE VEGETAÇÃO

A definição de faixas de vegetação, a maneira como são implementadas no terreno e o seu papel na estabilização de taludes são apresentados por Bischetti *et al.* (2009). Segue-se a descrição de um estudo, desenvolvido pelos mesmos autores, sobre a variação do coeficiente de segurança global em taludes estabilizados por faixas de vegetação.

3.6.1 ASPETOS GERAIS

De entre as técnicas mais comuns em Engenharia Natural incluem-se as faixas de vegetação, usadas para estabilizar vários tipos de taludes, nomeadamente os de estradas e de margens fluviais. As faixas de vegetação são consideradas a versão mais antiga das técnicas de terra reforçada e consistem, conforme descrito anteriormente, na colocação de estacas vivas vegetativas ou plantas em torrão de espécies arbustivas autóctones na parte inferior de pequenos degraus escavados no talude (Figura 3.26). A parte das estacas que sobressai do talude intercepta as gotas da chuva, o escoamento superficial e os sedimentos transportados. Por sua vez, a parte das estacas que se desenvolve para o interior do talude atua como elemento de reforço.

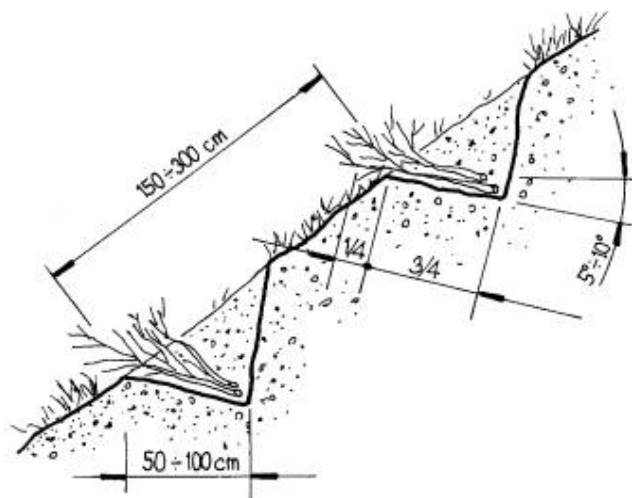


Figura 3.26 - Aspecto das faixas de vegetação (Regione Lombardia, 2000 in Bischetti *et al.*, 2009)

As estacas devem ser plantadas no início ou fim do seu período de dormência. Com isto, estacas e arbustos conseguem desenvolver raízes ao longo do seu comprimento, o que aumenta a sua ação de reforço e a sua resistência ao arranque. Além disso, estacas e arbustos atuam como drenos,

modificando favoravelmente o regime hidrológico junto à face do talude (Gray & Sotir, 1996 *in* Bischetti *et al.*, 2009).

3.6.2 DESCRIÇÃO DO ENSAIO

Bischetti *et al.* (2009) referem que, apesar do uso generalizado das faixas de vegetação, tem sido dada pouca atenção à quantificação dos seus efeitos na estabilização dos taludes o que, no seu entender, justificou a necessidade de fazer essa quantificação para diferentes profundidades. Assim, foi realizado um estudo que consistiu em desenvolver um método que permitisse implementar eficazmente as faixas de vegetação no terreno. Para tal, os autores procuraram avaliar o coeficiente de segurança global, a diferentes profundidades, em função de diversos parâmetros. É o caso das propriedades geotécnicas do solo (coesão, ângulo de atrito interno e peso volúmico) do grau de saturação do solo, da inclinação do talude e dos parâmetros de projeto das faixas de vegetação (largura dos degraus, diâmetro, comprimento e número de estacas).

O coeficiente de segurança global, calculado pela razão entre os esforços resistentes e as tensões atuantes, entra em conta com a resistência ao arrancamento das estacas vivas, considerado o parâmetro principal em projetos de implementação de terra reforçada e de faixas de vegetação. A atuação deste parâmetro, segundo Bischetti *et al.* (2009) é atribuída a dois mecanismos. O primeiro deve-se ao atrito entre as estacas e o solo, quando este último começa a deslizar pela superfície de corte, atuando logo após a colocação das faixas de vegetação. Já o segundo, deve-se à resistência à tração dos rebentos de raiz que se vão desenvolvendo ao longo do comprimento da estaca, tendo início quando as raízes se começam a desenvolver, intensificando-se com o tempo.

Os mesmos autores afirmam que a resistência total ao arrancamento das estacas, mobilizada abaixo da superfície de rotura, a uma dada profundidade, é dada pela soma da resistência ao arrancamento do comprimento (médio) das estacas com a resistência à tração devido às raízes. No entanto, por razões de segurança, considera-se um valor mínimo de resistência, pelo que a resistência à tração devido às raízes pode ser desprezada.

A avaliação da resistência ao arrancamento dos caules consistiu na realização de ensaios laboratoriais de estacas vivas de uma dada espécie de salgueiro (*Salix purpurea L.* ou salgueiro roxo). O equipamento utilizado é similar ao da Figura 3.27 e é constituído por uma caixa em aço preenchida com areia onde foram colocadas as estacas vivas. Um orifício circular de 40 mm de largura no centro da parte frontal permite a fixação de um grampo para o corte, e uma força de tração é aplicada por meio de um mecanismo a uma taxa de 10 mm/min. O deslocamento e a força são medidos respetivamente por um transdutor de posição e uma célula de carga.

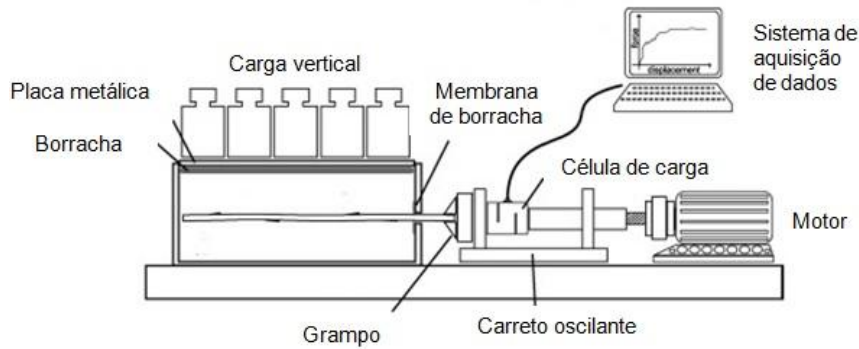


Figura 3.27 - Equipamento para ensaios de arrancamento (ou rotura por tração) de estacas (Bischetti *et al.*, 2009)

Foram aplicadas sobre a caixa cargas verticais com os valores 3.9, 15.9 e 23 kPa, correspondendo às profundidades de, respetivamente, 0.20, 0.80 e 1.20m para um solo com 20 kN/m^3 de peso volúmico. O ensaio de arrancamento de estacas terminou quando o deslocamento ultrapassou 5 cm ou quando foi atingido o valor de pico da resistência ao arrancamento. Para este ensaio, foram utilizadas estacas de salgueiro roxo com mais de 30 cm de comprimento, vários diâmetros e irregularidades. Os resultados mostraram que:

- A força de resistência ao arrancamento (F_{po}) aumentou com a tensão de confinamento (σ_n), como indicam os gráficos da Figura 3.28. Os dois picos no exemplo 2 podem dever-se, segundo os autores, à existência de nós pronunciados nas estacas utilizadas no ensaio.

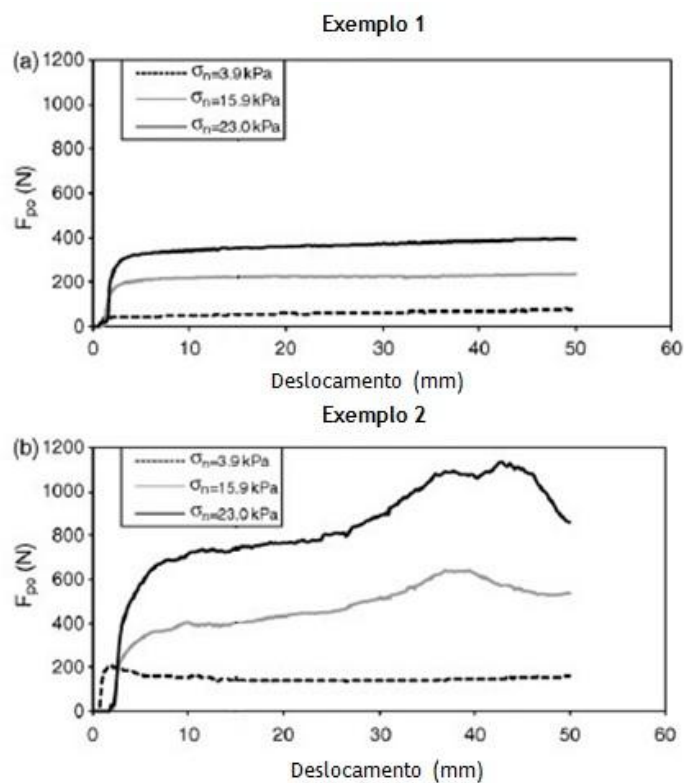


Figura 3.28 - Exemplos dos resultados dos ensaios para diferentes valores de σ_n (adaptado de Bischetti *et al.*, 2009)

- É possível obter um espaçamento ideal entre as faixas de vegetação, que resulte num grau de estabilidade satisfatório. Por outro lado, de acordo com os resultados, um espaçamento pequeno (< 2 m) é considerado pouco significativo para assegurar a estabilidade dos taludes. Esta dedução torna possível equilibrar melhor o efeito de estabilização com as consequências (práticas e económicas) de construir as faixas de vegetação muito perto umas das outras.
- Dependendo das condições geomorfológicas do talude e físico-mecânicas do solo constituinte, consegue-se obter o mesmo grau de estabilidade com metade das estacas vivas, poupando tempo e dinheiro.
- É possível quantificar a estabilidade de um talude onde se apliquem faixas de vegetação, em termos do coeficiente de segurança global. Tal quantificação é feita com base na equação (19).

$$FS(z) = \frac{c' \cdot l_1 + [n \cdot R_{po}(z) \cdot \sin(\alpha + \beta) + (\gamma_t - \gamma_w \cdot m)z \cdot \cos^2 \beta \cdot l_1] \cdot tg \varphi'}{\gamma_t \cdot l_1 \cdot z \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta - n \cdot R_{po}(z) \cdot \cos(\alpha + \beta)} \quad (19)$$

Onde

c' = coesão efetiva do solo (kPa)

l_1 = espaçamento vertical entre degraus de faixas vegetativas (m)

n = número de estacas vivas por metro de faixa

φ' = ângulo de resistência ao corte em tensões efetivas ($^\circ$)

$R_{po}(z)$ = resistência total ao arranque das estacas (em função da profundidade, z)

α = inclinação da superfície de corte ($^\circ$)

β = inclinação do talude ($^\circ$)

γ = peso volúmico do solo (kN/m^3)

γ_w = peso volúmico da água (kN/m^3)

m = nível freático (m)

A Figura 3.29 representa esquematicamente os parâmetros l_1 , m , β , R_{po} , z e α da equação 19.

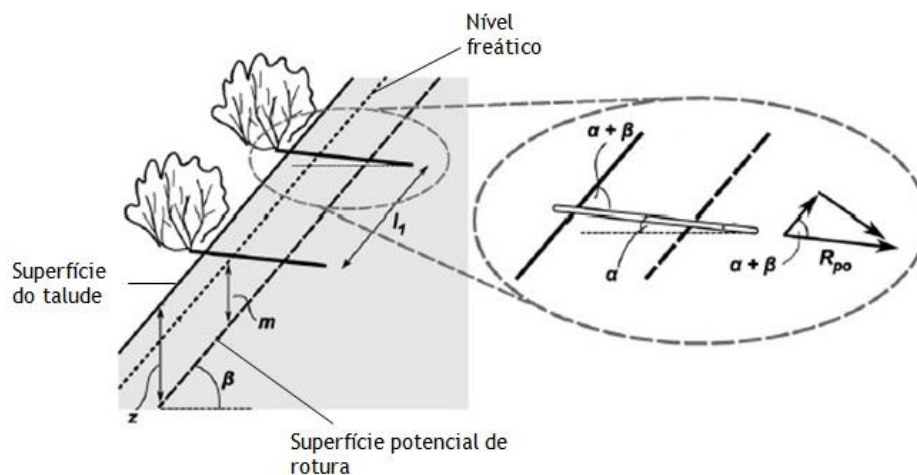


Figura 3.29 - Alguns parâmetros utilizados no cálculo do coeficiente de segurança global (adptado de Bischetti *et al.*, 2009)

A Figura 3.30 apresenta os resultados determinados a partir da equação (19) para o caso de um talude estabilizado por faixas de vegetação para os efeitos do espaçamento entre faixas (a), do número de estacas vivas por metro de faixa (b) e da inclinação do talude (c). As condições de referência são: 10° de inclinação das estacas, 33 estacas/m, comprimento das estacas de 2 m e diâmetro de 3 cm, 5 m de espaçamento entre faixas de vegetação, grau de saturação do solo de 0.5 e inclinação do talude de 35°. Realça-se que os valores estimados do coeficiente de segurança global permitem avaliar a situação da estabilidade imediatamente após a construção das faixas de vegetação, que aumenta ao passo que o sistema de raízes se desenvolve.

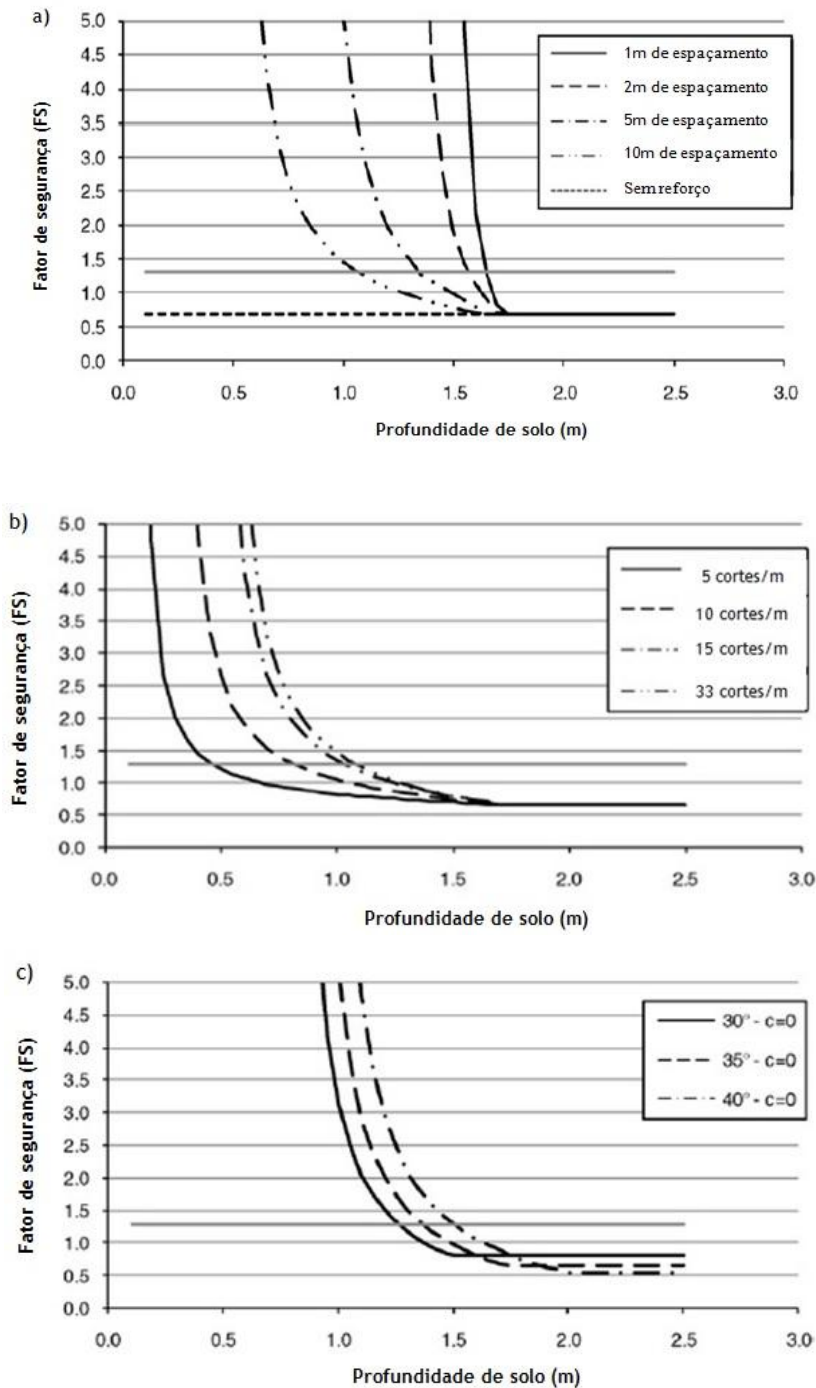


Figura 3.30 - Fator de segurança global num talude de areia mal graduada ($c = 0$, $\phi' = 32^\circ$, $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$) estabilizado por faixas de vegetação (adptado de Bischetti *et al.*, 2009)

Nos três gráficos da Figura 3.30 verifica-se que o coeficiente de segurança global diminui com o aumento da profundidade do terreno. No entanto, essa diminuição pode ser rápida ou lenta. A este respeito, o gráfico da Figura 3.30 a) mostra que a diminuição do fator de segurança ocorre a uma taxa mais baixa se as faixas de vegetação estiverem espaçadas de 10 m comparando com a taxa de variação no caso em que o espaçamento é de apenas 1 m. Esta verificação conduz ao anteriormente referido sobre a irrelevância de ser optar por espaçamentos excessivamente curtos. Outra verificação é a de que, independentemente do espaçamento entre faixas de vegetação, deixa de existir estabilidade ($FS < 1$) a partir de profundidades excessivas que, para o caso, rondam o valor de 1,5 m, ou seja, quando o valor de FS tende a igualar a situação de ausência de reforço.

Quanto ao gráfico b), considerando o número de estacas vivas por metro de faixa, o mesmo permite observar que, das 15 para as 33 estacas, sem dúvida um acréscimo importante de despesa e trabalho, não se verifica praticamente qualquer incremento da estabilidade.

No caso c) onde se tem em conta a inclinação do talude, para um solo puramente arenoso o FS diminui mais depressa para o talude inclinado 30° , do que para as situações de 35° e 40° de inclinação. Este facto resulta da maior carga vertical, estabilizadora, de solo atuante sobre as estacas nos casos de taludes de maior declive.

4 APLICAÇÃO EM PORTUGAL DO COBERTO VEGETAL NA ESTABILIZAÇÃO E PROTEÇÃO DE TALUDES

4.1 MATERIAIS VIVOS UTILIZADOS EM ENGENHARIA NATURAL

Relativamente à sua pequena dimensão, Portugal possui uma assinalável diversidade de características orográficas, pedológicas e climáticas que condicionam o desenvolvimento de diferentes espécies vegetais autóctones, muitas delas com potencial interesse em trabalhos de estabilização e/ou proteção de taludes.

São vários os requisitos que devem ser preenchidos para que os materiais vivos utilizados em Engenharia Natural (sementes, estacas e plantas) cumpram os propósitos de estabilizar e proteger os taludes. Por isso, é necessário selecionar adequadamente as espécies. Rauch (2008), referindo-se às propriedades das plantas determinantes na eficácia da sua aplicação em sistemas construtivos, apresenta um diagrama no qual destaca as que considera ser as mais relevantes (Figura 4.1).



Figura 4.1 - Principais propriedades das plantas tendo em vista a sua utilização na Engenharia Natural (adaptado de Rauch, 2008)

Bloemer *et al.* (2015) aprofundam aquele elenco de propriedades das plantas que permitem que estas respondam com eficácia às exigências dos diferentes meios, ao estabelecerem a seguinte listagem, integrada nas *Diretrizes Europeias de Engenharia Natural*:

- Capacidade de regenerarem após danificadas ou sujeitas a alterações das condições ambientais;
- Capacidade de se reproduzirem e propagarem;
- Capacidade de realizarem a evapotranspiração;
- Capacidade de estruturação, interligação e articulação de diferentes materiais e estruturas;

- Capacidade de interseção e retenção de partículas em movimento e fluxos hídricos;
- Capacidade de cobertura da superfície do solo;
- Capacidade de suportarem o soterramento ou a submersão pela formação de novas raízes;
- Capacidade de adaptação a mudanças das condições ambientais.

A estas propriedades, Bifulco e Rego (2012) acrescentam outros requisitos tais como:

- Espécies vegetais em harmonia com a fitocenose do lugar e com as séries possíveis de sucessões ecológicas (Sauli & Cornellini, 2002);
- Condições edafo-climáticas do local – influência do tipo de solo e das variações locais de temperatura e de precipitação.

Para além destes critérios, as espécies a utilizar na Engenharia Natural devem ser as existentes no local (espécies autóctones) ou perto dele (*Washington State Department of Transportation*, 2014). Isto acontece porque, segundo Cabral (2003), “plantas espontâneas são as que melhor se desenvolvem e que mais garantias de êxito dão”. Caso tal não seja possível, Bifulco e Rego (2012) referem como alternativa a utilização de plantas ecologicamente mais plásticas, isto é, mais adaptáveis às condições do local.

A Tabela 4.1 contém, de forma simplificada, os fatores de seleção das espécies, tipologias de plantas a utilizar e as vantagens e desvantagens destas, para aplicação em engenharia.

Tabela 4.1 - Adequação dos tipos de plantas a aplicações de engenharia (Gray *et al.*, 1996 *in* Fernades e Freitas, 2011)




Tipo de vegetação	Vantagens	Desvantagens
Gramíneas	Versáteis e baratas; elevado espectro de tolerância; estabelecimento rápido; elevada densidade de cobertura	Enraizamento superficial; necessitam de manutenção regular
Caniços e juncos	Estabelecem-se bem em margens de rios e lagos; crescimento rápido	Plantação manual dispendiosa; obtenção difícil
Herbáceas	Enraizamento profundo; atrativas em relvados	Sementes caras, às vezes difíceis de estabelecer; muitas espécies morrem no Inverno
Leguminosas	Estabelecimento barato; fixam azoto; combinam bem com gramíneas	Não são tolerantes a locais difíceis
Arbustos	Robustos e baratos; muitas espécies podem ser semeadas; cobertura de solo muito significativa; enraizamento profundo; necessitam de pouca manutenção; muitas espécies sempre verdes	Estabelecimento mais dispendioso e por vezes mais difícil
Árvores em geral	Enraizamento muito significativo; algumas podem ser semeadas; nenhuma manutenção quando bem estabelecidas	Estabelecimento prolongado; crescimento lento; dispendiosas
Choupos e salgueiros	Enraízam facilmente de estaca; versáteis; muitas técnicas de plantação; estabelecimento rápido	Necessitam de manutenção de modo a selecionar a forma de estabelecimento corretivo; não crescem de semente

4.1.1 SEMENTES

O objetivo principal da utilização de sementes é controlar a erosão, ao passo que contribuem para o processo de desenvolvimento do solo, adicionando-lhe matéria orgânica e nutrientes (Atkins *et al.*, 2001).





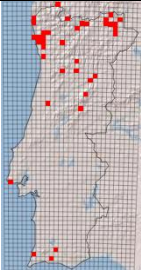

Como já foi atrás referido, nas técnicas de Engenharia Natural procuram-se utilizar de preferência plantas nativas. Schiechtl (2002) lembra contudo que, particularmente para o caso das herbáceas, é praticamente impossível encontrar disponíveis no mercado misturas de sementes das espécies naturais de dado local. Isto porque a recolha de sementes de herbáceas diretamente da Natureza não é economicamente viável, sendo feita em situações muito especiais. Tenta-se contornar o problema selecionando misturas de sementes disponíveis no mercado que sejam o mais adequadas possíveis para as condições do local e características do projeto. Ainda segundo o mesmo autor, enumeram-se como aspetos relevantes na seleção de tais misturas de sementes, para além do custo, a resistência das espécies às ações do meio e do Homem e a sua esperança de vida. Na Tabela 4.2 seguem-se três exemplos de misturas de sementes herbáceas utilizadas em taludes.

Tabela 4.2 - Exemplos de misturas de sementes aplicadas em taludes íngremes (Bosk, s.d.; UTAD Jardim Botânico, 2015)

	Espécies	Nome comum	Época de floração	Distribuição em Portugal
Mistura 1	25% <i>Dactylis glomerata</i>	Dactila	Maio-Agosto	
	20% <i>Festuca arundinacea</i>	Erva-carneira	Abril-Junho/Julho	
	30% <i>Lolium perenne</i>	Azevém-perene	Maio-Agosto	






(continua)

Tabela 4.2 (continuação)

	Espécies	Nome comum	Época de floração	Distribuição em Portugal
Mistura 1	20% <i>Lolium multiflorum</i>	Azevém-anual	Maio-Junho	
	5% <i>Trifolium repens</i>	Trevo-branco	Março-Agosto	
Mistura 2	16% <i>Festuca arundinacea</i>	Erva-carneira	Abril-Junho/Julho	
	15% <i>Dactylis glomerata</i>	Dactila	Maio-Agosto	
	15% <i>Lolium perenne</i>	Azevém-perene	Maio-Agosto	
	15% <i>Lolium multiflorum</i>	Azevém-anual	Maio-Junho	



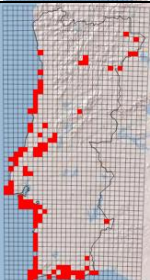

(continua)

Tabela 4.2 (continuação)

	Espécies	Nome comum	Época de floração	Distribuição em Portugal
Mistura 2	12% <i>Festuca rubra</i>	Festuca-encarnada	Junho-Julho	
	12% <i>Festuca ovina</i>	Dados não disponíveis		
	3,5% <i>Trifolium subterraneum</i>	Trevo-subterrâneo	Fevereiro-Julho	
	3,0% <i>Trifolium repens</i>	Trevo-branco	Março-Agosto	
	3,0% <i>Medicago sativa</i>	Luzerna	Maio-Julho	Dados não disponíveis
	3,0% <i>Sanguisorba minor</i>	Pimpinela	Abril-Julho/Maio-Agosto	
	2,3% <i>Trifolium pratense</i>	Trevo-comum	Maio-Outubro	

(continua)

Tabela 4.2 (continuação)

	Espécies	Nome comum	Época de floração	Distribuição em Portugal
Mistura 2	0,2% <i>Trifolium incarnatum</i>	Trevo-encarnado	Abril-Julho	
Mistura 3	27% <i>Sedum acre</i>	Erva-de-cão	Maio-Agosto	
	27% <i>Sedum sediforme</i>	Erva-pinheira	Junho-Setembro	
	26% <i>Sedum spurium</i>	Dados não disponíveis		
	10% <i>Sedum album</i>	Arroz-dos-telhados	Maio-Julho	
	10% <i>Sedum reflexum</i>	Dados não disponíveis		

As sementes da mistura 1 (Tabela 4.2) desenvolvem-se na maior parte do território nacional, com exceção das de erva-carneira, que se distribuem pelo litoral do Baixo Alentejo, parte do Barlavento Algarvio e mais a norte, por parte da Estremadura, pela Beira, Douro litoral e Minho e algumas regiões do interior norte. Tanto a mistura 1 como a 3 têm à partida vantagem em relação à mistura 2, por terem menos espécies, cinco em cada caso, contra as doze da mistura 2. Relativamente à mistura 3, das três espécies de que foi possível obter a respetiva distribuição geográfica, são raros os locais comuns de ocorrência, se é que existem. A mistura 2 abrange todas as espécies que entram na composição da mistura 1, para além de outras sete algumas das quais estão presentes em áreas muito restritas do território nacional como são exemplos a fetusca-encarnada e a pimpinela.

Um aspeto a ter em conta é a quantidade de tratamentos a que as sementes são sujeitas. Esta questão coloca-se, sobretudo, no caso de sementes de espécies arbustivas usadas nas hidrossementeiras em taludes de auto estradas. Pela razão de uma boa parte destas sementes não estarem disponíveis comercialmente, é necessário recolhê-las no campo perto da zona da obra e proceder ao seu processamento (Robalo & Clemente, 2010). Considerando apenas este aspeto do processamento, a prática tem revelado que, quanto menos tratamentos levarem as sementes que compõem a mistura, melhor é a qualidade da mesma.

O tratamento de sementes consiste num conjunto de processos que permite a obtenção de sementes adequadas para a sementeira. Inclui a extração, seleção e limpeza das sementes. A extração da semente é uma etapa que, por razões biológicas ou conveniência, necessita quase sempre ser realizada. A seleção e limpeza são etapas que podem ser manuais, mecânicas ou mistas (ANPA, 2001).

A seleção das espécies adequadas de sementes revela-se importante em especial no caso dos taludes de estradas, assunto relativamente ao qual tem havido uma crescente preocupação, dada a necessidade destas infraestruturas se enquadrarem o melhor possível na paisagem. Daí que Cabral (2003) tenha dito que “para que a estrada se integre bem na paisagem e nos apareça como elemento natural desta é necessário estudar cuidadosamente o seu traçado, a sua adaptação ao terreno, a plantação e (...) todos os pormenores de construção que a acompanham”. A problemática da integração das estradas e de outras infraestruturas na paisagem tem levado as empresas a definir quais os objetivos a atingir nas obras de consolidação dos respetivos taludes, ao recorrer a sementeiras e plantações. Um exemplo é dado por Robalo e Clermente (2010) quando referem que o recurso a sementeiras em taludes deverá ter como objetivos:

- Promover a infiltração da água;
- Diminuir a escorrência superficial;
- Contribuir para aumentar a coesão do solo através dos sistemas radiculares;
- Aumentar a biodiversidade;
- Diminuir o impacte visual.

Do ponto de vista geotécnico, o primeiro objetivo reveste-se de alguma polémica uma vez que a água infiltrada no interior do talude aumenta o peso dos solos, promovendo as ações instabilizadoras, e incrementa as pressões intersticiais, diminuindo a resistência dos mesmos solos. Essa infiltração deverá ser na quantidade necessária para contribuir para o eficaz desenvolvimento e manutenção das espécies plantadas, sendo a água infiltrada captada pelos sistemas radiculares e libertada para fora do talude através da evapotranspiração.

Uma vez abordados os objetivos das sementeiras em taludes, seguidamente dá-se indicação dos três principais tipos de sementeira, bem como dos aspetos que os distinguem, na Tabela 4.3:

Tabela 4.3 - Critérios de distinção de três tipos de sementeira (Robalo & Clemente, 2010)

	Sementeira a lanço	Hidrossementeira	Aerossementeira
Ângulo de pendente	<20°	Não interfere, podem ser usadas mangueiras para vencer grandes distâncias	Não se aplica
Condições pluviométricas	Solos húmidos à data da sementeira	Não exige humidade no solo à data da sementeira	Solos húmidos à data da sementeira
Solo	Deve ser nivelado	Sem restrições	Sem restrições
Compactação	Não aceitável	Inaceitável	Inaceitável
Fertilização	Operação em separado	Na mesma operação	Na mesma operação
Mulch/substrato	Não é necessário	Na mesma operação	Não se aplica
Equipamento	Tradicional agrícola	Hidrossemeador	Tremonha especial adaptada
Custo	Em comparação é mais baixo	Mais caro (depende dos produtos e do tipo de sementes)	Caro devido à utilização de helicóptero

A Figura 4.2 mostra três exemplos de resultados da aplicação de sementeiras em auto estradas de Portugal, por parte da empresa Teleflora, outrora especializada nesta área.



Sementeiras ao fim de 4 anos, A6 Évora



Sementeiras ao fim de 6 anos, A1 Coimbra



Sementeiras ao fim de 6 anos, A3 Valença

Figura 4.2 - Aspeto da aplicação de sementeiras em taludes de auto estradas nacionais (Robalo & Clemente, 2010)

4.1.2 ESTACAS

Estacas são elementos utilizados na Engenharia Natural com os objetivos de estabilizar e proteger os taludes. Para tal, devem ser dotadas de capacidade de propagação vegetativa, a qual, na opinião de Schiechtl (1992 *in* Bifulco & Rego, 2012) baseado em experiências com estacas de salgueiro enterradas no terreno, aumenta com a sua idade. Contudo, nem sempre é possível tirar proveito de tal capacidade visto que há certos tipos de clima em que a utilização de estacas não é viável, como é o caso do clima mediterrânico. De acordo com Bifulco e Rego (2012) o problema é contornado por recorrer a plantas lenhosas com caule enterrado (Figura 4.3). Exemplo disso é o do Parque Nacional do Vesúvio onde, a fim de ultrapassar o problema dos períodos prolongados de seca estival, se usaram plantas cujo caule foi enterrado numa extensão de mais de 1 m, deixando exteriormente apenas 10 cm. Assim, os caules enterrados cumpriram a função de consolidar o terreno por meio do desenvolvimento das raízes, atuando como uma escora (*op. cit.*, 2012).

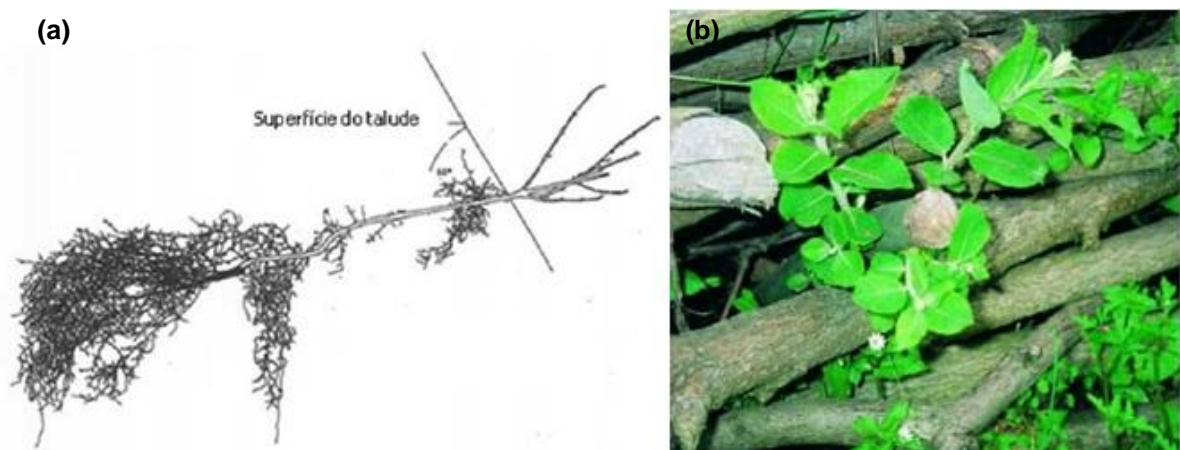


Figura 4.3 - Desenvolvimento de raízes numa estaca enterrada: (a) raízes adventícias ao longo de uma estaca enterrada (adaptado de FLORINETH, 2004 *in* Bifulco & Rego, 2012); (b) estaca de *Salix caprea* três meses após o implante (Bifulco e Rego, 2012)

4.1.3 PLANTAS

As plantas, como arbustos e árvores, são utilizadas para prover estabilidade profunda do solo em locais potencialmente instáveis. O plantio melhora o solo, provê *habitats* para os animais, mitiga o impacto visual e repõe as espécies lenhosas onde são necessárias (Atkins *et al.*, 2001)

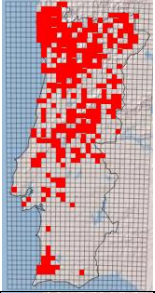
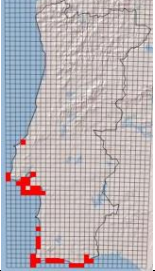
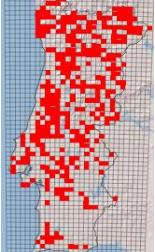
Define-se “planta” como “um elemento inteiro, completo nas suas partes, com raízes caule e folhas” (Bifulco & Rego, 2012). Visto que as plantas constituem uma alternativa às estacas em clima mediterrânico, a sua utilização requer que possuam como principal característica um caule resistente ao enterramento com faculdade de propagação vegetativa na sua extensão (*op. cit.*).

A abordagem que se segue, similarmente ao caso das estacas, baseia-se no trabalho realizado por Bifulco e Rego (2012) e consiste em dar a conhecer o conjunto de plantas lenhosas da flora

portuguesa tidas como adequadas para aplicação nas obras de Engenharia Natural (Tabela 4.4). Indicam-se as espécies com ampla distribuição no território nacional, as inermes, tendo em conta a sua facilidade de transporte e manipulação e as espécies cujos ensaios de capacidade de enraizamento efetuados em Portugal tenham evidenciado resultados satisfatórios.

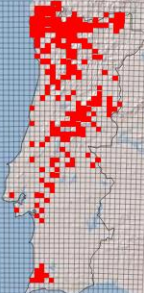


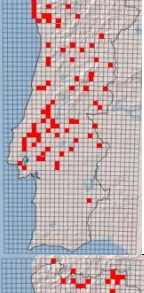

Para além das espécies que constam da tabela seguinte os autores referidos anteriormente fazem ainda alusão a outros dois grupos de espécies: as provavelmente adequadas e as adequadas a áreas limitadas. Entre as espécies do primeiro grupo incluem-se aquelas cuja distribuição em Portugal é vasta, mas ainda com informações limitadas ou ausentes sobre a sua capacidade de propagação vegetativa, relativamente ao que ocorre no resto da Europa. As espécies adequadas a áreas limitadas incluem algumas plantas presentes em Trás-os-Montes como é o caso do Sanguinho-legítimo, da Alfena e do Salgueiro-com-folhas-de-amendoeira.

Tabela 4.4 - Espécies adequadas para aplicação nas obras de Engenharia Natural (Bifulco & Rego, 2012; flora.on, 2015)

	Espécies	Nome comum	Distribuição em Portugal	Ecologia
Espécies adequadas	<i>Alnus glutinosa</i> (L.) Gaertn.	Amieiro		Bosques ripícolas na margem de rios, ribeiras barrancos húmidos, bosques pantanosos em depósitos aluvionares sempre húmidos
	<i>Atriplex halimus</i> L.	Salgadeira		Em orlas de sapais, taludes de salinas, solos arenosos e salgadiços perto do litoral
	<i>Crataegus monogyna</i> Jacq.	Pilriteiro		Orlas de bosques húmidos e galerias ripícolas, matagais e sebes

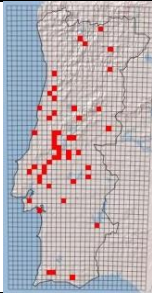
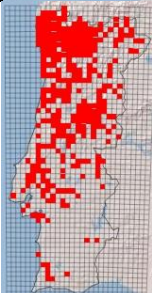

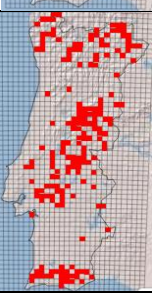
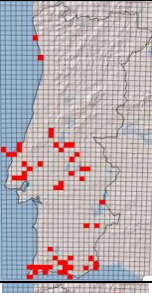
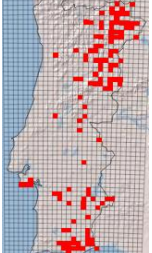
(continua)

Tabela 4.4 (continuação)

	Espécies	Nome comum	Distribuição em Portugal	Ecologia
Espécies adequadas	<i>Frangula alnus</i> Mill.	Sanguinho bastardo		Em bosques ou matagais ripícolas, margens de cursos de água e barrancos, sempre em sítios húmidos
	<i>Nerium oleander</i> L.	Loendro		Em matagais nas margens ou leitos cascalhentos de ribeiras e rios de regime torrencial
	<i>Populus alba</i> L.	Choupo branco		Dados não disponíveis
	<i>Populus nigra</i> L.	Choupo negro		Dados não disponíveis
	<i>Rosa canina</i> L.	Roseira brava		Dados não disponíveis

(continua)

Tabela 4.4 (continuação)

	Espécies	Nome comum	Distribuição em Portugal	Ecologia
Espécies adequadas	<i>Salix alba</i> L.	Salgueiro branco		Dados não disponíveis
	<i>Salix atrocinerea</i> Brot.	Borrazeira preta		Margens de cursos de água, lagoas e charcos
	<i>Salix neotricha</i> Goerz	Vimeiro		Dados não disponíveis
	<i>Salix salviifolia</i> Brot.	Borrazeira branca		Dados não disponíveis
	<i>Tamarix africana</i> Poir.	Tamargueira		Matagais em margens de rios, lagos e lagoas e em leitos secos e pedregosos de linhas de água temporárias. Ocorre também em estuários, em solos salinos.
	<i>Thymus mastichina</i> L.	Tomilho alvadio		Espécie com grande plasticidade ecológica. Em bermas e taludes de estradas, campos de cultivo abandonados, pinhais, sobreirais, zonas pedregosas e afloramentos rochosos.

4.2 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

Nesta secção são apresentados alguns exemplos de obras em Portugal nas quais se recorreu a métodos de Engenharia Natural. Como se verificará, nem todos se reportam à resolução de problemas em taludes, particularmente o primeiro e o terceiro casos descritos onde se relata intervenções em margens de ribeiras. Ainda assim optou-se por incluir as referidas obras por duas razões principais:

- Apresentar uma visão mais alargada possível das técnicas utilizadas em Engenharia Natural, algo difícil de realizar com o reduzido número de exemplos a que foi possível aceder;
- As margens dos pequenos cursos de água formam taludes naturais que, apesar das suas reduzidas dimensões não deixam de estar sujeitos aos mesmos problemas da generalidade dos taludes.

RIO DE COUROS, OURÉM (2007)

Este projeto consistiu na aplicação de técnicas de Engenharia Natural numa linha de água de baixa energia, com as margens degradadas pela erosão e com fortes indícios de instabilidade, tendo por finalidade a requalificação/restauro ecológico de uma das suas margens (Figuras 4.4 e 4.5). Para tal procedeu-se à estabilização da margem fluvial com estruturas rígidas e articuladas de madeira e ao restabelecimento da vegetação ripícola.

Os trabalhos desenvolveram-se em três fases. A primeira envolveu a limpeza e remoção da vegetação que dominava o local e a regularização do talude, eliminando os ravinamentos existentes. Na segunda fase aplicou-se a técnica do enrocamento vivo, para proteger a base do talude, que já estava a sofrer erosão hídrica. Outra técnica aplicada foi a da grade viva, para garantir a estabilidade do terreno. Na terceira fase, recorreu-se à utilização de estacaria viva (salgueiro e loendro), plantações e transplantes (amieiro, freixo e sabugueiro). Por fim, executou-se uma hidrossementeira de herbáceas para, juntamente com a grade viva, favorecer a estabilidade do terreno. Cinco anos depois da obra, a margem fluvial encontra-se estabilizada e a vegetação ripícola foi restabelecida, evidenciando que os objetivos propostos foram atingidos.



Figura 4.4 - Aspeto geral do trecho da ribeira intervencionado: (a) antes da obra; (b) depois da obra (Interaço, 2013)

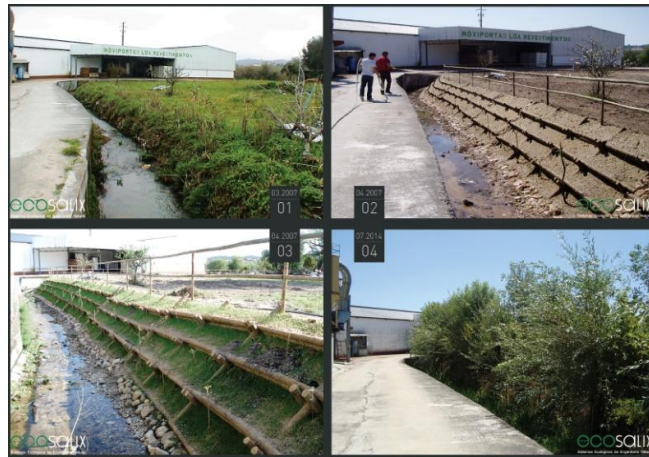


Figura 4.5 - Sequência de trabalhos da obra de Rio de Couros, (cedida por Aldo Freitas, agosto de 2015)

VALE DOS OVOS, TOMAR, PORTUGAL

Aplicação de técnicas de Engenharia Natural com o objetivo de estabilizar um talude onde ocorreu um deslizamento de terras (Figura 4.6). Procedeu-se inicialmente ao reperfilamento do terreno, diminuindo-lhe a inclinação. Depois foram espalhadas sobre o terreno sementes de espécies herbáceas e por cima foi colocada uma manta orgânica de fibra de coco. Esta última teve como funções proteger o talude contra a erosão e aumentar a fertilidade do terreno, para além da capacidade de reter água. Por fim, executou-se uma nova sementeira sobre a manta orgânica.



Figura 4.6 - Aspeto da aplicação de manta orgânica e sementeira (Engenhariaverde, 2009)

RIBEIRA DE SEIÇA, OURÉM – TROÇO 1 (2013)

Em consequência do avançado estado de degradação por erosão de uma margem fluvial acompanhada da queda de árvores ripícolas de grande porte, foi decidida a requalificação/restauro ecológico do referido local (Figura 4.7). Para tal, procedeu-se ao reaproveitamento dos troncos das árvores que tinham caído, tirando partido da sua robustez, para proteger a base da margem. Em seguida o talude foi reperfilado e protegido contra a erosão fluvial com uma geomalha tridimensional. A sua estrutura tridimensional restringe o movimento das partículas de solo e elimina boa parte do

impacto das gotas da chuva, diminuindo a sua capacidade erosiva. Por fim, foram plantadas espécies arbustivas ripícolas para promover a estabilização interna do solo por meio do desenvolvimento do seu sistema radicular.



Figura 4.7 - Aspeto geral do trecho da ribeira intervencionado: (a) antes da obra; (b) depois da obra (Interação, 2013)

ZONA DE PROTEÇÃO ESPECIAL (ZPE) DO PICO DA VARA/RIBEIRA DO GUILHERME, SÃO MIGUEL, AÇORES

A área é vulnerável à ocorrência de situações de erosão hídrica e à existência de derrocadas, situações que são agravadas pela expansão da vegetação invasora. As características biofísicas destas plantas, nomeadamente o seu sistema radicular superficial, o rápido crescimento e o seu grande desenvolvimento apical, levam à acumulação de grandes volumes de biomassa, o que associado aos fatores acima descritos aumenta exponencialmente a probabilidade de ocorrência de deslizamentos de terras com consequências nefastas para o património natural.

Para limitar e reverter os processos erosivos e a expansão da vegetação invasora, tem-se recorrido a técnicas de contenção de taludes que permitam uma requalificação ambiental, recorrendo a espécies autóctones dos Açores. As técnicas aplicadas baseiam-se em duas ideias principais: na utilização de materiais vivos, pelas suas características funcionais, e no reaproveitamento do material florestal. Em áreas mais sensíveis, pode ser necessário o uso de pedra. Um dos locais intervencionados foi a Mata dos Bispos, em 2012, inserida na ZPE (Figura 4.8), onde num talude se aplicaram as técnicas de grade viva, geotêxtil, muro de suporte vivo e hidrossementeira.

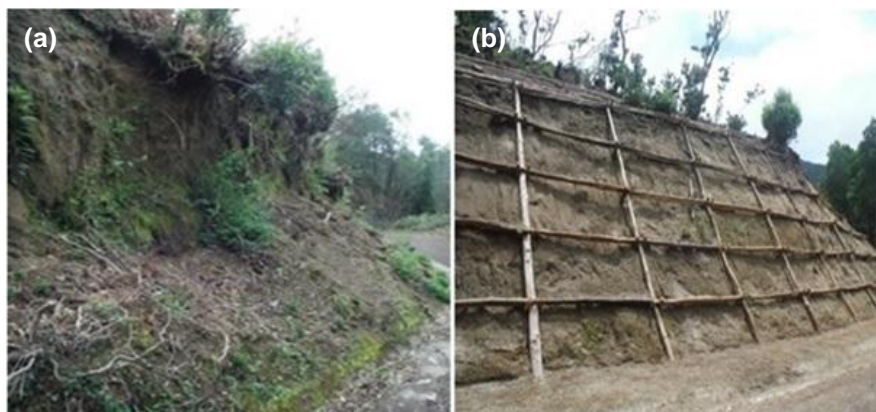


Figura 4.8 - Talude da ZPE: (a) antes da obra; (b) durante a obra de implantação da grade viva (SPEAçores, 2015)

NÓ DA MALVEIRA, A21 (2014)

O talude encontrava-se afetado por vários deslizamentos e ravinamentos profundos numa superfície de 40 m de altura por 250 m de comprimento e não possuía vegetação nem terra vegetal, uma vez que se tratava de um talude de escavação recente (Figura 4.9). Tratando-se de uma grande obra rodoviária recente sentiu-se a urgência de proceder à estabilização do talude e sua integração paisagística.

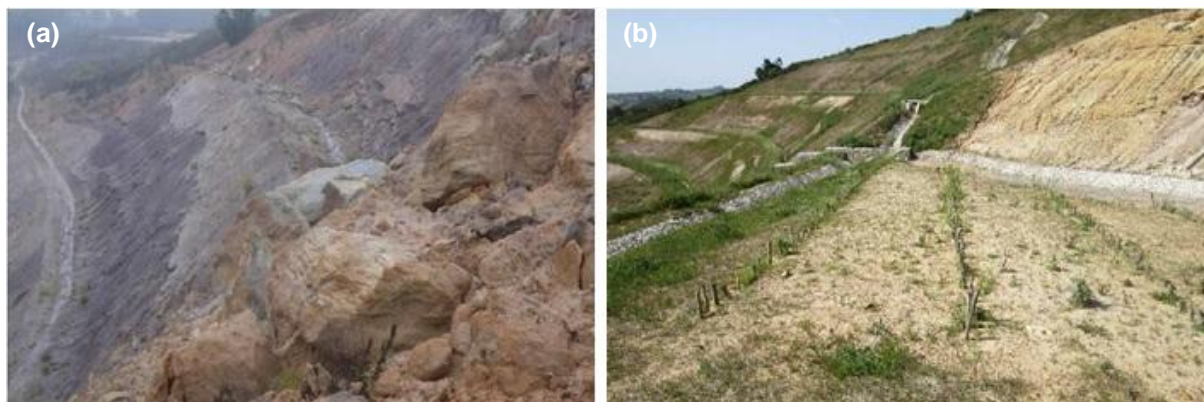


Figura 4.9 - Aspeto do talude da A21, nó da Malveira: (a) Fevereiro de 2014; (b) Fevereiro de 2015 (ISA, 2015)

Para evitar fenómenos de instabilidade como o destaque de blocos rochosos e de erosão em geral, o projeto consistiu na aplicação das técnicas de Engenharia Natural para estabilizar, reforçar e colocar coberto vegetal na vertente (Tabela 4.5).

Tabela 4.5 - Técnicas aplicadas na obra do Nó da Malveira.

Objetivos	Técnicas aplicadas
Proteção contra a erosão superficial	Sementeiras com cobertura de proteção de palha e esteira de palha Hidrossementeira Hidrossementeira sobre geomalha tridimensional com drenagem subterrânea
Estabilização	Faixas de vegetação Plantação de arbustos
Contenção	Gabiões vivos Degraus em pedra com aplicação de estacas vivas
Drenagem	Colchões vivos Valetas vivas Escovas vivas

SÃO VICENTE, ILHA DA MADEIRA

O caso a seguir, relatado por Silva (2012), consiste numa síntese do exemplo do município de São Vicente sobre o qual o autor refere a aplicação de técnicas de Engenharia Civil (usadas mais comumente na ilha) com as de Engenharia Natural, estas últimas sugeridas pelo próprio.

A Ilha da Madeira possui uma orografia muito acidentada e geologia particular, o que se deve a vários períodos de atividade vulcânica. Por isso, o material de construção que existe em maior quantidade é a pedra basáltica, sendo este o motivo que leva a que entre as técnicas de Engenharia Civil mais utilizadas, estejam o muro de alvenaria de pedra, o muro de betão ciclópico, as pregagens e as paredes ancoradas. No caso de São Vicente, Silva (*op. cit.*) propõe técnicas de Engenharia Natural que visem proteger contra a erosão e estabilizar um talude de depósito de vertente.

Uma das técnicas propostas é a grade viva que tem como vantagens conferir um efeito estabilizante imediato e contínuo, com reduzida manutenção, a ação drenante das plantas e a possibilidade de desenvolvimento da vegetação em taludes com declives muito acentuados (Ecosalix, s.d.). Já as espécies seleccionadas são a *Myrica faya* (faia das ilhas), a *Clethra arbórea* (folhado) e a *Erica scoparia* (urze das vassouras), atendendo aos requisitos de seleção das espécies, abordados na secção 4.1 da presente dissertação.

O muro de suporte vivo é outro método que, segundo Silva (2012), pode ser aplicado ao caso de estudo de São Vicente. Este é um local com diferentes formas de relevo para as quais tem contribuído a degradação das encostas, com a conseqüente acumulação de detritos na sua base. O muro de suporte vivo é, pois, uma solução que provê uma proteção imediata contra a erosão, ao passo que aumenta, com o tempo, o seu efeito estabilizador à medida que a vegetação implementada desenvolve o seu sistema radicular (Ecosalix, s.d.).

A Figura 4.10 mostra dois locais no município de São Vicente aos quais são dirigidas as propostas de técnicas de Engenharia Natural aqui apresentadas.

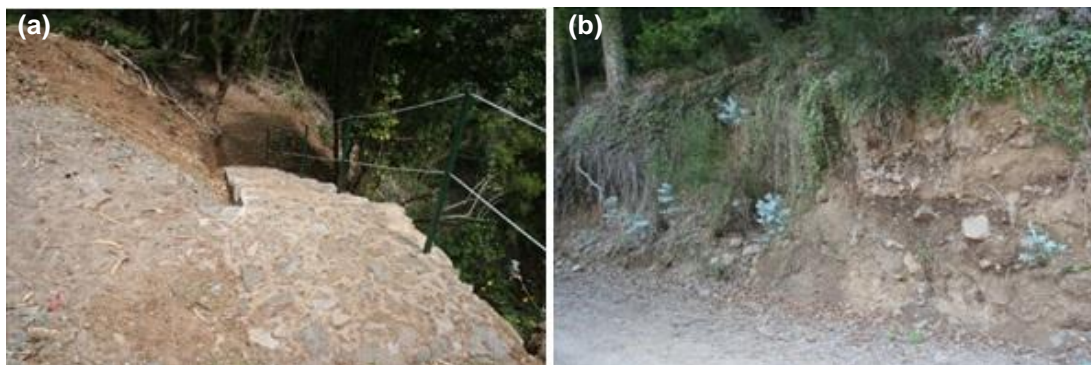


Figura 4.10 - Local a ser intervencionado com técnicas de Engenharia Natural: (a) grade viva; (b) muro de suporte vivo (Silva, 2012)

Como se verifica em todos os casos apresentados tratam-se, na sua maioria, de obras geotécnicas em que a técnica de estabilização a que se recorre baseia-se no plantio de vegetação auxiliada por dispositivos idênticos aos utilizados em Engenharia Civil. Alguns exemplos são as técnicas de reperfilamento dos taludes que, para as situações aqui descritas, são executadas não só com o objetivo de conferir a estes um perfil melhorado, mas também de tratá-los com recobrimento vegetal, favorecendo esteticamente a paisagem.

Deste modo, os casos de aplicação indicados nesta secção permitiram realçar que a Engenharia Natural é utilizada principalmente como complemento das técnicas clássicas de Engenharia Civil, apesar de, por vezes, poder substituir tais técnicas.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

De acordo com os estudos apresentados nesta dissertação foi possível comprovar que a vegetação pode exercer tanto efeitos favoráveis como desfavoráveis na estabilização e proteção de taludes. De entre os efeitos da vegetação tidos como benéficos destaca-se a sua capacidade de regular o regime hidrológico e de incrementar resistência aos solos por via do reforço radicular. Estes são dois dos efeitos que justificam o que se comprovou sobre a remoção do coberto vegetal poder ser uma das causas de problemas de instabilidade nos taludes.

Por outro lado, a ação do vento nas copas das árvores, bem como o efeito do seu peso próprio, podem gerar sobrecargas, aumentando a possibilidade de ocorrerem fenómenos de instabilização acompanhados do tombamento e desenraizamento dessas árvores. Relativamente ao peso das árvores este poderá ser, por si só, instabilizador ou não consoante a inclinação do talude, como facilmente se comprova pela aplicação de certas técnicas de cálculo relativamente simples. Assim, para eventualidades nas quais esteja em jogo a estabilidade das encostas, o recurso à vegetação deve ser feito com prudência.

Contudo, de uma maneira geral, verificou-se que os efeitos do coberto vegetal são favoráveis, o que faz deste uma boa alternativa para a solução de problemas de estabilização e proteção de taludes mediante a aplicação de técnicas específicas de engenharia. Tais técnicas são as que se incluem num sub-domínio da Engenharia Civil designado por Engenharia Natural e, embora possam ser aplicadas com os mais diversos fins como na requalificação de leitos de ribeiras e fixação de sistemas dunares, foram aqui abordadas essencialmente no contexto dos taludes.

Comparando os métodos de Engenharia Civil com os de Engenharia Natural, estabeleceu-se uma diferença em termos de eficiência. Nos primeiros, a eficiência é máxima logo após a conclusão das obras e diminui com o tempo devido à degradação dos materiais envolvidos e sua necessidade de manutenção. Nos segundos métodos, a eficiência é menor de início, em relação aos métodos de Engenharia Civil, mas aumenta com o tempo até atingir o seu máximo e dar lugar à ação estruturante das plantas. Tal aumento reflete que as plantas, utilizadas como o principal material construtivo na Engenharia Natural, detêm a capacidade necessária para cumprir os papéis de favorecer os efeitos anti erosivos, estabilizadores, consolidantes e de drenagem nas áreas de intervenção.

No entanto as plantas, com todas as suas exigências e limitações, não devem ser consideradas materiais como os utilizados nas técnicas tradicionais de engenharia, uma vez que são dotadas de características que as tornam singulares como a sua flexibilidade, capacidade de se regenerarem, de se adaptarem a alterações das condições ambientais, entre outras. São as diferentes particularidades

das plantas que levam a que deva ser feita uma seleção criteriosa das espécies vegetais a empregar nas técnicas de Engenharia Natural.

Apesar de não ser tão conhecida em Portugal como seria expectável, dado o seu avançado grau de desenvolvimento noutros países europeus e não só, a Engenharia Natural tem assumido cada vez maior relevância em anos recentes a nível nacional. Esta relevância segue a par das crescentes exigências de desenvolvimento sustentado por parte da comunidade, para além da necessidade em reconstruir *habitats* e melhorar a funcionalidade ecológica dos terrenos intervencionados e áreas envolventes, numa aliança entre a técnica e a ética, visando o equilíbrio dos sistemas naturais.

Dos trabalhos realizados em Portugal a que a Tabela 5.1 faz referência, destaca-se pela sua dimensão o projeto, levado a cabo pelo Instituto Superior de Agronomia em colaboração com a empresa Infraestruturas de Portugal, de integração paisagística e de estabilização de taludes do Nó da Malveira, na A21. Trata-se de um projeto-piloto de Engenharia Natural para o qual se recorreram a algumas técnicas inovadoras.

Tabela 5.1- Síntese das intervenções de Engenharia Natural realizada em Portugal nos últimos anos

Obra	Objetivos	Técnicas aplicadas
Rio de Couros, Ourém	Proteção contra a erosão hídrica e fluvial	Enrocamento vivo Grade viva Estacaria viva Plantações em torrão e transplante de árvores Hidrossementeira
Vale dos Ovos, Tomar	Estabilização e proteção de talude	Sementeira Manta orgânica
Ribeira de Seiça, Ourém – Troço 1	Proteção contra erosão fluvial	Geomalha tridimensional Plantação de espécies arbustivas
ZPE do Pico da Vara, Açores	Proteção contra erosão hídrica e estabilização	Muro de suporte Grade viva Geotêxtil Sementeira
Nó da Malveira, A21	Proteção contra erosão hídrica, estabilização e contenção	Sementeira com cobertura de proteção de palha e esteira de palha Hidrossementeira Faixas de vegetação Plantação de arbustos Gabiões vivos Degraus em pedra com aplicação de estacas vivas Colchões vivos Valetas vivas Escovas vivas

Entre as técnicas mencionadas na Tabela 5.1 destacam-se algumas aplicadas para drenagem (colchões vivos, valetas vivas e escovas vivas), por terem sido utilizadas apenas na obra do Nó da Malveira, na A21. Por outro lado, entre as técnicas mais comumente utilizadas até à data em Portugal encontram-se as sementeiras, a plantação de espécies arbustivas e as grades vivas. Realça-se ainda que as soluções técnicas de Engenharia Natural complementam-se umas às outras pelo que, para os casos de aplicação apresentados, recorrem-se a duas ou mais técnicas.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Na opinião da autora muito há a fazer no nosso país com esta ferramenta no âmbito da estabilidade e proteção de taludes, nomeadamente em inúmeros trechos de vias de comunicação cujos taludes de escavação ou de aterro necessitam de intervenção apropriada. Intervenções desta natureza baseiam-se, ainda no entender da autora no aprofundamento de três questões essenciais:

- Que plantas podem ser utilizadas para determinado local?
- Que propriedades físicas e mecânicas essas plantas contêm, nomeadamente ao nível das raízes, de modo a cumprir os propósitos pretendidos?
- Que técnicas de engenharia melhor associam tais plantas às diferentes situações?

A resposta à segunda questão é aquela a que o engenheiro geólogo poderá dar a sua contribuição, dados os conhecimentos que possui na área da mecânica dos solos.

Findo este trabalho, no qual se discutiram, entre outros aspetos, as vantagens e limitações da vegetação na estabilidade e proteção de taludes e se abordou a importância da Engenharia Natural para os mesmos fins, considera-se pertinente que, no âmbito da Engenharia Geológica, se procedam a estudos de caracterização física e mecânica das raízes de certas plantas, numa profícua colaboração com os especialistas da Engenharia Natural. Tais estudos, entre os quais se incluem ensaios de resistência ao corte de solos reforçados por raízes encontram-se em Portugal ainda numa fase incipiente apesar de virem a ser referidos nos últimos anos por técnicos da especialidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abe, K., & Ziemer, R. R. (1991). Effect of tree roots on a shear zone: modeling reinforced shear stress. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 21 (7), 1012-1019. Consultado a 10 de Julho de 2015. Disponível em: <http://gis.fs.fed.us/psw/publications/ziemer/Ziemer91.pdf>
- Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (ANPA), (2000). Roma. 180p
- Alvarenga, R. (2013). *Apresentação comercial – Deflor Bioengenharia*. Disponível em: <https://prezi.com/cmkkddjbqhv81/apresentacao-comercial-deflor/>
- Aspia (2011). Consultado a 3 de Julho de 2015. Disponível em: <http://www.aspia.it/cms/-2-9/muro-cellulare.htm>
- Atkins, R. J., Leslie, M. R., Polster, D. F., Wise, M. P., & Wong, R. H. (2001). *Best management practices handbook: hillslope restoration in British Columbia*. Government of British Columbia, Publications Centre, 202p.
- Ayala Carcedo, F. J., Andreu Posse, F. J. (1987). *Manual de taludes*. IGME, EPTISA. Madrid. 456p
- Bifulco, C. (2013). *Engenharia Natural na reabilitação de taludes e vertentes*. Disponível em: http://www.crp.pt/docs/A45S130-10_Art_T4_7CRP_2013.pdf
- Bifulco, C., & Rego, F. C. (2012). Seleção de espécies lenhosas adequadas às técnicas de engenharia natural. *Silva Lusitana*, 20 (1-2), 15-38.
- Bischetti, G. B., Chiaradia, E. A., D'agostino, V., & Simonato, T. (2010). Quantifying the effect of brush layering on slope stability. *Ecological Engineering*, 36(3), 258-264.
- Bloemer, S.; Fernandes, J. P.; Florineth, F.; Geitz, P.; Gerstgraser, C.; Graf, F.; Hacker Eva *et al.* (2015). *European Guidelines for soil and water bioengineering*. Disponível em: <http://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/14589/1/Richtlinie%20pdf.pdf>
- Bosk (s.d). Consultado a 6 de Julho de 2015. Disponível em: <http://www.bosk.pt/>
- Cabral, F. C. (2003). *Fundamentos de arquitetura paisagista*. (2ª edição). Lisboa: Instituto de Conservação da Natureza, 220p.
- CEF Jardinagem Canelas. (2009). Consultado a 2 de Setembro de 2015. Disponível em: <http://cefjardinagemcanelas0911.blogspot.pt/2009/11/diferenciacao-entre-plantas-herbaceas.html>

- Coppin, N. J.; Richards, I. G. (2007). *Use of Vegetation in Civil Engineering*. (2ª edição). London: CIRIA, 1-40
- Cornelini P., Sauli G. (2012). *Principi, metodi e deontologia dell'Ingegneria Naturalistica*. Roma: AIPIN, 198p.
- Del Val, J. (1987). Factores que controlan los procesos de erosión sedimentación. *Riesgos Geológicos*, 153-161.
- Donat, M. (1995). *Bioengineering techniques for streambank restoration. A Review of Central European Practices*. Vancouver, B.C., Canada: Watershed Restoration Program. Ministry of Environment, Lands and Parks, and Ministry of Forests. Disponível em: http://www.env.gov.bc.ca/wld/documents/wrp/wrpr_2.pdf
- Ecosalix (s.d.). *Catálogo – Soluções e Produtos de Engenharia Natural*. Sistemas Ecológicos de Engenharia Natural. Interação, 26p.
- Engenharia verde (s.d). Consultado a 15 de Agosto de 2015. Disponível em: <http://engenhariaverde.blogspot.pt/search/label/T%C3%A9cnicas%20Eng.%C2%AA%20Natural>
- Falcão-Neves, P.; Reis e Sousa, M. & Oliveira, J. (2006). *Influência da cobertura vegetal na resistência ao escorregamento de taludes*. *Atas do 10º Cong. Nac. de Geotecnia*, Vol.1, SPG, UNL, 93-102.
- Fernandes, J. P.; Mendes de Freitas, A. R. (2011). *Introdução à engenharia natural*. EPAL, Vol. 2, 69-107
- Flora de Portugal interativa (2015) Disponível em: <http://www.flora-on.pt/>
- Folque, J. (1987). *Introdução à mecânica dos solos*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 135p.
- Gray, D. H. (1973). *Effects of forest clear-cutting on the stability of natural slopes: results of field studies*. National Science Foundation, University of Michigan, Washington
- Gray, D. H., & Barker, D. (2004). Root-Soil Mechanics and Interactions. *Riparian vegetation and fluvial geomorphology*, 113-123.
- Greenway, D. R. (1987). Vegetation and slope stability. *Slope Stability*. John Wiley & Sons, 187-229
- Hagiwara I. & Sasaki T.; Nishiyama S. & Ohnishi. (2004) *Estimation and simulation of vegetation effect on rockfall using discontinuous deformation analysis*. Consultado a 18 de Julho de 2015. Disponível em: http://www.suncoh.co.jp/tech_topics/technology/info4/ARMS-No_258_DDA.pdf

- Henensal, P. (1993). Lutte contre l'érosion avant, pendant et après les travaux - Les protections végétales et structurelles des surfaces et des pentes, Collection *Études et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées - Série Géotechnique*, LCPC, Paris, 111p.
- Highland, L., & Bobrowsky, P. T. (2008). *The landslide handbook: a guide to understanding landslides* Reston, VA, USA: US Geological Survey.
- Interaço Engenharia e Construção. (2013). Consultado a 7 de Julho de 2015. Disponível em: <http://www.interaco.pt/4/eng-natural-e-paisagismo/14/apresentacao>
- Instituto Politécnico de Castelo Branco - IBPC (2015). Consultado a 20 de Agosto de 2015. Disponível em: http://www.ipcb.pt/ESA/eventos/desertific/2SI_IRCD_Luis%20QuintaNova.pdf
- Instituto Superior de Agronomia - ISA (2015). Consultado a 16 de Agosto de 2015. Disponível em: <http://www.isa.utl.pt/ceabn/projecto/1/78/projecto-de-estabiliza-ccedil-atilde-o-de-um-talude-na-a21-n-oacute-da-malveira-com-t-eacute-cnicas-de-engenharia-natural>
- Ip, J. (2011). *The Role of Roots in Slope Stability*. FRST 497, Graduation Essay, 16p.
- Lamas, P. (1989). *Carta de Riscos de Movimentos de Terrenos dos Taludes na Margem Sul do Tejo (Cacilhas – Trafaria)*. Dissertação apresentada à Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica, 110p.
- Lamas, P. (1998). *Os taludes da margem Sul do Tejo – Evolução geomorfológica e mecanismos de rotura*. Dissertação apresentada à Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Doutor em Geotecnia, 379p.
- Lewis, L. (2000). *Soil Bioengineering: An alternative for roadside management*. USDA Forest Service, 7700(007), 1801.
- Mendonça, A. A.; Cardoso, A. S. (1998). Contribuição da vegetação para a estabilidade de taludes. Parte I – Enquadramento geral. *Geotecnia*.. Nº 82, 51-61. ISSN 0379-9522.
- Menegazzi, G.& Palmeri, F. (2013); *Il dimensionamento delle opere di Ingegneria Naturalistica*. Roma, Itália: Regione Lazio, 511p.
- Mickovski, S. B., & Van Beek, L. P. H. (2009). Root morphology and effects on soil reinforcement and slope stability of young vetiver (*Vetiveria zizanioides*) plants grown in semi-arid climate. *Plant and soil*, vol. 324 (1-2), 43-56. doi: 10.1007/s11104-009-0130-y
- Norman, S. A., Schaetzl, R. J. & Small W. T. (1995). Effects of slope angle on mass movement by tree uprooting. *Geomorphology*, 14, 19-27.

- O'Loughlin, C. L. (1974). The effect of timber removal on the stability of forest soils. *Journal of Hydrology (NZ)*, vol. 13 (2), 121-134. Disponível em http://www.hydrologynz.co.nz/downloads/JoHNZ_1974_v13_2_O_Loughlin.pdf
- O'Loughlin, C., & Ziemer, R. R. (1982). The importance of root strength and deterioration rates upon edaphic stability in steepland forests. Disponível em: <http://www.fs.fed.us/psw/publications/ziemer/Ziemer82.PDF?>
- Prandini, L., Guidicini, G., Bottura, J. A., Poncano W. L. e Santos, A. R. (1977). Behaviour of the vegetation in slope stability: a critical review. *Bulletin of the IAEG*, 16, 51-55.
- Rauch H. P. (2008). *Application of soil bioengineering techniques for river engineering projects with special focus on hydraulics and morphological issues*. Lifelong Learning Programme: Higher Education Erasmus, 60p.
- Reubens, B., Poesen, J., Danjon, F., Geudens, G., & Muys, B. (2007). The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: a review. *Trees*, vol. 21 (4), 385-402.
- Robalo I. M. & Clemente A. M., (2010). *Intervenções de consolidação em taludes de estradas – sementeiras (e plantações)*. Apresentação integrada no curso de Introdução à Engenharia Natural, Universidade de Évora.
- Rodgers, M. (1991). Stability of the root plates of coniferous trees planted on surface water gley soils. Disponível em: <http://www.eird.org/deslizamientos/pdf/eng/doc5764/doc5764-contenido.pdf>
- Sauli, G.; Cornelini, P.; Preti, F. (2002). *Manuale d'Ingegneria Naturalistica applicabile al settore idraulico*. Roma, Itália: Regione Lazio.
- Sauli, G.; Cornelini, P.; Preti, F. (2006). *Manuale di Ingegneria Naturalistica*. Vol.3, Versanti, Regione Lazio, Roma, 2006.
- Schiechtl, H. M. (2002). Slope protection by bioengineering techniques, *in Geotechnical engineering handbook*, Smolctzyk, U. (ed.), Ernst & Sohn, Vol.2, 599-670
- Silva, R. (2012). *Aplicação da Engenharia Natural na estabilização de taludes*. Dissertação apresentada à Universidade da Madeira para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, 108p.
- Solutioma (s.d.). Consultado a 15 de Agosto de 2015. Disponível em: <http://www.solutioma.com/pt/manta-organica-pt.php>

- Sotir, R. B., & Grey, D. (1992). Soil bioengineering for upland slope protection and erosion reduction. *Engineering Field Handbook*. USDA. Disponível em: <http://directives.sc.gov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=17555.wba>
- Sousa, R. (2015). *Metodologia para especificação de plantas com potencial biotécnico em Engenharia Natural*. Dissertação apresentada à Universidade Federal de Santa Maria para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Florestal, 133p.
- SPEAçores (2015). Disponível em: <http://speaacores.blogspot.pt/2015/08/life-terras-do-priolo-testa-tecnicas-de.html?m=1>
- Swanston, D. N. (1969). *Mass wasting in coastal Alaska*. Research paper/PNW. Pacific Northwest forest and range experiment station, USDA
- Terzaghi, K. (1950). *Mechanism of landslides*. Geological society of America. Berkey Volume, 83-123
- UTAD Jardim Botânico (2015). Consultado a 10 de Junho de 2015. Disponível em: <http://jb.utad.pt/>
- Venti, D., Bazzurro, F., Palmeri, F., Uffreduzzi, T., Venanzoni, R., & Gibelli, G. (2003). Manuale tecnico di Ingegneria Naturalistica della Provincia di Terni. *Applicabilità delle tecniche, limiti e soluzioni*. Provincia di Terni, Servizio Assetto del Territorio - Ufficio Urbanistica, Terni. 420p.
- Washington State Department of Transportation - wsdot (2014). *Roadside Manual*. Consultado a 13 de Agosto de 2015. Disponível em: <http://www.wsdot.wa.gov/publications/manuals/fulltext/M25-30/Roadside.pdf>
- Ziemer, R. R. (1981-a). Roots and the stability of forested slopes. *Forestry*. Disponível em: <http://forestry.oxfordjournals.org/>
- Ziemer, R. R. (1981-b). The role of vegetation in the stability of forested slopes, *Proceed. XVII World Congress of the International Union of Forest Research Org. (IUFRO)*, Japan, 297-308. Disponível: <http://svinet2.fs.fed.us/psw/publications/ziemer/ZiemerIUFRO1981.PDF>