

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL**

**METODOLOGIA PARA ESPECIFICAÇÃO DE
PLANTAS COM POTENCIAL BIOTÉCNICO EM
ENGENHARIA NATURAL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Rita dos Santos Sousa

Santa Maria, RS, Brasil

2015

**METODOLOGIA PARA ESPECIFICAÇÃO DE PLANTAS
COM POTENCIAL BIOTÉCNICO EM
ENGENHARIA NATURAL**

Rita dos Santos Sousa

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado
do Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal,
Área de Concentração em Manejo Florestal,
da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS),
como requisito parcial para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Fabrício Jaques Sutili

Santa Maria, RS, Brasil

2015

Esse trabalho foi apoiado com recursos financeiros concedidos pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (**ANP**) via Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (**Cenpes**) e Fundação de Apoio à Tecnologia e Ciência (**FATEC**).

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Sousa, Rita dos Santos

Metodologia para especificação de plantas com potencial biotécnico em Engenharia Natural / Rita dos Santos Sousa - 2015.

152 p.; 30cm

Orientador: Fabrício Jaques Sutili

Coorientador: José Newton Cardoso Marchiori

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2015

1. Bioengenharia de Solos 2. Propriedades Biotécnicas 3. Funções Técnicas das Plantas 4. Obras de Infraestrutura I. Sutili, Fabrício Jaques II. Marchiori, José Newton Cardoso III. Título.

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**METODOLOGIA PARA ESPECIFICAÇÃO DE PLANTAS COM
POTENCIAL BIOTÉCNICO EM ENGENHARIA NATURAL**

elaborada por
Rita dos Santos Sousa

como requisito parcial para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Florestal

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Fabrício Jaques Sutili (Presidente/Orientador)

Prof. Dr. Luciano Denardi – UFSM

Prof.^a Dr.^a Luciana Dias Thomaz – UFES

Santa Maria, 6 de Fevereiro de 2015.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Fabrício Sutili pela oportunidade de realizar este mestrado, pelos ensinamentos e amizade em todos os momentos.

À Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), pela bolsa concedida através do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (Cenpes), que permitiu a dedicação exclusiva ao desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.

A todos os profissionais, professores e mentores que transmitiram e ajudaram a consolidar os meus conhecimentos ao longo de todos estes anos.

Ao Professor Elvídio Gavassoni pela disponibilidade, ajuda e ideias para a elaboração e organização deste trabalho.

Ao Charles e à Paula pela amizade, simpatia e disponibilidade para ajudar a terminar este trabalho.

Ao Vagner, Camila, Daiane, Simone, Nanda, Raquel e Bárbara pelo companheirismo em todos os momentos nestes dois anos.

Ao Diogo e Eduardo pela compreensão que existem momentos na vida que temos que avançar para outros desafios.

A todos os meus amigos portugueses, que mesmo à distância são os melhores amigos do mundo.

Aos meus pais, irmã e família por todo o amor e apoio na realização de mais um sonho.

Especialmente ao Hugo, por todos estes anos maravilhosos de partilha, e que mesmo à distância está sempre presente.

Muito Obrigada a Todos!!

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Universidade Federal de Santa Maria

METODOLOGIA PARA ESPECIFICAÇÃO DE PLANTAS COM POTENCIAL BIOTÉCNICO EM ENGENHARIA NATURAL

AUTOR: Rita dos Santos Sousa
ORIENTADOR: Fabrício Jaques Sutil
Local da Defesa e Data: Santa Maria, 6 de Fevereiro de 2015.

A Engenharia Natural é uma disciplina técnica que pode combinar materiais construtivos vivos, como sementes, plantas, partes de plantas e associações vegetais com materiais inertes, utilizada para estabilização e proteção de taludes, margens de rios e áreas em processo erosivo. A utilização de plantas como material construtivo distingue esta disciplina das intervenções tradicionais de engenharia que apenas recorrem à utilização de materiais inertes. Existe, no entanto, a necessidade de atribuição de maior rigor técnico à inclusão das plantas em projetos de Engenharia Natural, principalmente no caso da sua utilização em obras de infraestrutura que exigem maior responsabilidade técnica e possuem riscos associados mais elevados. Neste sentido, a proposta do presente trabalho consiste em desenvolver uma metodologia para especificação de material construtivo vivo, através da análise das plantas do ponto de vista técnico, considerando suas funções, ações e efeitos nas propriedades de engenharia dos solos. Compreendendo a forma como a vegetação age na estabilização geotécnica, hidráulica e no controle de processos erosivos superficiais desenvolveu-se um procedimento que se baseia nas propriedades biotécnicas das plantas, que resultam das suas características morfo-mecânicas inerentes. Estas características desempenham funções técnicas que através de um processo hidrológico e/ou mecânico têm efeitos positivos nas propriedades de engenharia dos solos, influenciando a resistência ou a sollicitação sobre o solo. A metodologia proposta mostra-se eficiente na organização e definição de conceitos e informações relacionados com a utilização da vegetação, bem como na sua especificação como material construtivo em obras de infraestrutura que recorram a soluções de Engenharia Natural. O procedimento também se mostrou útil na estruturação de uma ficha técnica para espécies vegetais, constituída por tópicos específicos que disponibilizam informações técnicas, que podem ser utilizadas pelos diversos profissionais que atuam na área da Engenharia Natural.

Palavras-chave: Bioengenharia de Solos. Obras de Infraestrutura. Propriedades Biotécnicas. Funções técnicas das plantas.

ABSTRACT

Master Course Dissertation
Postgraduate Master Programme in Forestry Engineering
Federal University of Santa Maria

SPECIFICATION METHODOLOGY FOR PLANTS WITH BIOTECHNICAL POTENTIAL IN SOIL BIOENGINEERING

AUTHOR: Rita dos Santos Sousa
SUPERVISOR: Fabrício Jaques Sutili
Defense Place and Date: Santa Maria, February 6, 2015.

Soil Bioengineering is a technical discipline that can combine live construction materials, like seeds, plants, parts of plants and plant communities, with inert materials used for stabilisation and protection of slopes, streambanks and eroded areas. The use of vegetation as a construction material distinguishes this discipline from traditional engineering interventions that rely solely on the use of inert materials. There is however, the need for a greater technical accuracy regarding the use of plants in Soil Bioengineering projects, and more specifically concerning its use in infrastructure works that require greater technical responsibility and have higher associated risks. Taking this issue into consideration, the purpose of this dissertation is to accomplish the development of a methodology for the specification of live construction material, through the analysis of plants, from a technical point of view, considering its functions, actions and effects on the engineering properties of soils. By understanding how vegetation acts on the geotechnical and hydraulic stabilisation and surface erosion control, a procedure based on the biotechnical properties of plants, resulting from their inherent morpho-mechanical characteristics was developed. These characteristics play several technical functions that, through an hydrologic and/or mechanical process, have positive effects on the engineering properties of soils, and therefore affecting the strength or the stress on soil. This procedure has proved to be efficient in the organization and definition of concepts and information related to the use of vegetation, as well as, in its specification as a construction material in infrastructure works which use Soil Bioengineering solutions. This procedure has also proved to be useful in structuring a fact sheet for plants, comprising specific topics that provide technical information, which may be used by the several practitioners working in Soil Bioengineering.

Keywords: Soil Bioengineering. Infrastructure Works. Biotechnical Properties. Plants Technical Functions.

LISTA DE FIGURAS E QUADROS

Figuras:

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Esquema representativo do nível mínimo de energia.. | 26 |
| Figura 2 - Aplicação de vegetação em taludes fluviais..... | 30 |
| Figura 3 - Efeitos físicos (hidrológicos e mecânicos) da vegetação | 32 |
| Figura 4 - escoamento superficial para diferentes tipos de cobertura vegetal | 36 |
| Figura 5 - Relação entre coeficiente de Manning e profundidade da lâmina de água para vegetação herbácea de altura média. | 37 |
| Figura 6 - Alteração da taxa de perda de solo devido à redução do volume de escoamento superficial em função do aumento de percentagem de cobertura vegetal | 38 |
| Figura 7 - Vista em planta do fluxo de água em volta da vegetação | 39 |
| Figura 8 - Taxa de perda de solo para desagregação por impacto da gota de chuva relacionada com a percentagem de cobertura de solo para diferentes alturas de copas..... | 42 |
| Figura 9 - Relação entre perda de solo e percentagem de área ocupada por raízes finas..... | 45 |
| Figura 10 - Efeito do reforço das raízes na resistência ao cisalhamento do solo..... | 47 |
| Figura 11 - Influência do reforço das raízes para taludes em diferentes condições de subsolo..... | 49 |
| Figura 12 - Representação esquemática dos efeitos de ancoragem, arqueamento e escoramento das plantas no solo..... | 50 |
| Figura 13 - Efeitos da sobrecarga causada por árvores na base de uma superfície de deslizamento | 51 |
| Figura 14 - Padrão de fluxo de ar ao redor de um quebra-vento..... | 53 |
| Figura 15 - Fatores considerados para análise de estabilidade de taludes, pelo método do talude infinito | 57 |
| Figura 16 - Fatores de maior influência da vegetação na estabilidade de taludes. | 58 |

| | |
|---|-----|
| Figura 17 - Relação entre as propriedades dos materiais construtivos tradicionais inertes e vivos..... | 68 |
| Figura 18 - Evolução conceitual no tempo da eficiência técnico-ecológica de uma intervenção de Engenharia Natural comparada com uma intervenção tradicional. .. | 73 |
| Figura 19 - Fluxograma das funções hidrológicas das plantas..... | 85 |
| Figura 20 - Fluxograma das funções mecânicas das plantas..... | 92 |
| Figura 21 - Funções ecológicas da vegetação..... | 94 |
| Figura 22 - Distribuição ecológica da vegetação ciliar..... | 97 |
| Figura 23 - Correlação entre as propriedades das plantas e as funções da Engenharia Natural..... | 99 |
| Figura 24 - Características morfo-mecânicas da parte aérea para controle de erosão superficial..... | 102 |
| Figura 25 - Características morfo-mecânicas da parte subterrânea para controle de erosão superficial..... | 103 |
| Figura 26 - Características morfo-mecânicas da parte aérea para estabilização geotécnica..... | 105 |
| Figura 27 - Características morfo-mecânicas da parte subterrânea para estabilização geotécnica..... | 106 |
| Figura 28 - Características morfo-mecânicas da parte aérea para estabilização hidráulica..... | 107 |
| Figura 29 - Características morfo-mecânicas da parte subterrânea para estabilização hidráulica..... | 108 |
| Figura 30 - Fluxograma de características morfo-mecânicas segundo tipologia de problema..... | 111 |
| Figura 31 - Modelo representativo da ficha técnica..... | 117 |

Quadros:

Quadro 1 - Resumo dos efeitos benéficos e adversos da vegetação61

Quadro 2 - Resumo das propriedades mais importantes da vegetação e seu significado para as funções de engenharia.....62

Quadro 3 - Condições e requisitos a que devem satisfazer os materiais construtivos inertes69

Quadro 4 - Vantagens e desvantagens dos materiais construtivos vivos comparados com os inertes.....72

Quadro 5 - Proposta de classificação e estruturação de funções técnicas e adicionais78

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 19 |
| 1.1 Objetivo Geral | 21 |
| 1.2 Objetivos Específicos | 21 |
| 1.3 Organização do trabalho | 22 |
| 2. ENGENHARIA NATURAL E A IMPORTÂNCIA DAS PLANTAS | 23 |
| 2.1 Definição de Engenharia Natural | 23 |
| 2.1.1 Características e princípios | 25 |
| 2.1.2 Campos de aplicação | 27 |
| 2.2 Plantas em Engenharia Natural | 29 |
| 2.3 Funções das plantas | 31 |
| 2.3.1 Funções hidrológicas | 33 |
| Interceptação da precipitação | 33 |
| Evapotranspiração | 34 |
| Infiltração | 34 |
| Escoamento superficial | 35 |
| Fluxo subsuperficial | 40 |
| Proteção superficial hídrica | 40 |
| Depleção de umidade no solo | 42 |
| Retração do solo | 43 |
| 2.3.2 Funções mecânicas | 44 |
| Proteção mecânica superficial | 44 |
| Isolamento do solo | 44 |
| Confinamento do solo | 45 |
| Reforço do solo pelo sistema radicular | 46 |
| Ancoragem, arqueamento e escoramento | 48 |
| Sobrecarga | 50 |

| | |
|--|-----|
| Efeito de cunha das raízes | 51 |
| Efeito da vegetação no vento | 52 |
| Atenuação do ruído | 54 |
| 2.4 Resistência ao cisalhamento | 54 |
| 2.5 Estabilidade de taludes | 56 |
| 2.6 Consequência da remoção da vegetação | 59 |
| 2.7 Resumo das propriedades e funções mais importantes das plantas..... | 60 |
| 2.8 Propriedades biotécnicas | 63 |
| 3. MATERIAIS CONSTRUTIVOS EM ENGENHARIA CIVIL E ENGENHARIA NATURAL..... | 67 |
| 4. PROPOSTA METODOLÓGICA PARA ESPECIFICAÇÃO DE PLANTAS COMO MATERIAL CONSTRUTIVO EM PROJETOS E OBRAS DE INFRAESTRUTURA.. | 77 |
| 4.1 Classificação e estruturação das funções das plantas | 78 |
| 4.1.1 Funções técnicas das plantas..... | 78 |
| 4.1.1.1 Função hidrológica | 81 |
| 4.1.1.2 Função mecânica | 86 |
| 4.1.2 Funções adicionais das plantas..... | 92 |
| 4.1.2.1 Função ecológica-ambiental | 93 |
| 4.1.2.2 Função estética | 95 |
| 4.1.2.3 Função sócio-econômica | 95 |
| 4.2 Requisitos..... | 96 |
| 4.3 Propriedades biotécnicas das plantas | 97 |
| 4.4 Procedimento para especificação de material construtivo vivo | 100 |
| 4.4.1 Controle de erosão superficial | 101 |
| 4.4.2 Estabilização geotécnica | 104 |
| 4.4.3 Estabilização hidráulica | 106 |
| 4.4.4 Fluxograma geral..... | 109 |
| 5. APLICAÇÃO PRÁTICA DA METODOLOGIA PROPOSTA | 113 |

| | |
|---|-----|
| 5.1 Ficha técnica | 114 |
| 5.2 Exemplificação da metodologia proposta..... | 118 |
| 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 141 |
| 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 145 |

1. INTRODUÇÃO

A Engenharia Natural é definida como um subdomínio da Engenharia que tem objetivos técnicos, ecológicos, criativos, construtivos e económicos, recorrendo principalmente à utilização de materiais construtivos vivos, como sementes, plantas, partes de plantas e associações vegetais. Pode ser utilizada como substituto, mas principalmente como complemento útil e por vezes necessário às técnicas clássicas de Engenharia Civil (SCHIECHTL, 1980).

É uma disciplina transversal que utiliza informações, conhecimentos e tecnologia de diversas disciplinas, para a realização de intervenções em que a combinação da ação da vegetação com outros materiais naturais ou artificiais tem objetivos anti-erosivos, estabilizantes e consolidantes (SAULI; CORNELINI; PRETI, 2003).

De acordo com a Federação Europeia de Engenharia Natural, os objetos de projeto e construção são a estabilização de taludes e escarpas, margens fluviais, diques, aterros, assim como outros espaços de uso e a sua proteção contra a erosão. No processo de projeto e execução são utilizados conhecimentos e competências das disciplinas de construção, assim como conhecimentos da biologia e da ecologia da paisagem de forma a instalar e garantir o adequado desenvolvimento de uma cobertura de espécies autóctones que garanta as exigências construtivas requeridas (ZEH, 2007).

Estas técnicas promovem a utilização de materiais naturais adquiridos nos locais de intervenção (por exemplo, plantas, solo, madeira, etc), o que geralmente leva a obras de menor custo relativamente às obras tradicionais de engenharia, obtendo por isso um maior índice de custo – benefício (FERNANDES; FREITAS, 2011). Devido à utilização de plantas estas técnicas apresentam deformabilidade e capacidade de regeneração das partes danificadas, ao contrário das estruturas tradicionais construídas unicamente com materiais inertes.

O conhecimento das plantas, das suas funções e propriedades biotécnicas é essencial para a Engenharia Natural. As plantas exercem no solo uma função estabilizadora extremamente importante e multifacetada que se manifesta, ao nível da proteção contra a ação dos agentes externos (precipitação, vento, temperatura,

etc.), bem como no caso dos agentes internos (instabilidade, saturação, falta de coesão, etc.) (FERNANDES; FREITAS, 2011).

A utilização de plantas com potencial biotécnico, em intervenções de Engenharia Natural, apresenta não só a vantagem de assegurar a proteção superficial e a estabilização estrutural dos solos, como também, devido à sua característica de sistema vivo, desenvolver um ecossistema em equilíbrio dinâmico (MORGAN; RICKSON, 1995), adaptando-se dentro de certos limites, à variação dos fatores de desequilíbrio.

As plantas poderão desempenhar várias funções técnicas hidrológicas e mecânicas, que modificam as propriedades de engenharia dos solos, influenciando a resistência do solo, ou a solicitação exercida sobre o mesmo, e que atuam do ponto de vista mecânico e hidrológico. Também devem ser destacadas as suas funções adicionais, que podem ser de natureza ecológica-ambiental, estética e socio-econômica. De acordo com Gray e Sotir (1996) os materiais vegetais não se diferem de outros materiais de engenharia, uma vez que eles devem ser selecionados de acordo com o propósito da obra. Desse modo o reconhecimento na vegetação autóctone das funções técnicas e propriedades biotécnicas úteis à Engenharia Natural é essencial ao desenvolvimento desta disciplina (SUTILI; GAVASSONI, 2012).

Sendo que um dos enfoques deste trabalho é avaliar e tratar as plantas do ponto de vista técnico, e suas funcionalidades como material construtivo para a engenharia, é fundamental esclarecer a importância das propriedades biotécnicas da vegetação.

As propriedades biotécnicas ou características biotécnicas são o conjunto de propriedades técnicas e biológicas que algumas espécies vegetais apresentam e que são essenciais para o sucesso das intervenções de Engenharia Natural (ABATE; GROTTA, 2009; CORNELINI; FERRARI, 2008; SAULI; CORNELINI, 2005; VENTI et al., 2003).

Propriedade biotécnica pode ser definida como uma propriedade do material construtivo vivo, que através de características morfo-mecânicas (morfológicas e mecânicas) desempenha uma função técnica (hidrológica ou mecânica), que através de um conjunto de ações tem efeitos (positivos) nas propriedades de engenharia dos solos. Os efeitos das plantas nas propriedades de engenharia do solo são resultado de um processo hidrológico e/ou mecânico que influencia a resistência do solo ou a solicitação sobre o mesmo.

Com a crescente utilização de intervenções de Engenharia Natural em obras de infraestrutura, existe a necessidade de atribuição de maior rigor técnico à vegetação, e conseqüentemente surge a demanda para desenvolver um procedimento para especificação de material construtivo vivo, que tenha em consideração as funções técnicas hidrológicas e mecânicas, além das suas funções adicionais. Para tal deverão ser definidos conceitos como funções, ações e efeitos da vegetação, e os mesmos serão reestruturados de forma lógica e simplificada.

Com base no procedimento de especificação da vegetação, será proposta e estruturada uma ficha técnica que irá dar enfoque às funções técnicas hidrológicas e mecânicas e às propriedades construtivas das plantas, mas também terá informações morfológicas, ecológicas, estéticas e ecológicas. Desta forma a informação estará organizada de modo a ser utilizada por todos os profissionais de equipes técnicas que trabalhem em Engenharia Natural ou Recuperação de Áreas Degradadas, desde a fase inicial de projeto, passando pela execução, manutenção e monitoramento.

1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral desenvolver um procedimento de especificação de material construtivo vivo para intervenções com Engenharia Natural em obras de infraestrutura.

1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Classificar e estruturar as funções técnicas hidrológicas e mecânicas e as funções adicionais das plantas;
- Definir propriedades biotécnicas das plantas;

- Correlacionar as propriedades do material construtivo vivo e as funções da Engenharia Natural;
- Desenvolver uma ficha técnica para espécies vegetais com base no procedimento de especificação;

1.3 Organização do trabalho

Inicialmente apresenta-se a revisão bibliográfica que aborda a Engenharia Natural, suas características, princípios e campos de aplicação. É dado um enfoque referente à importância das plantas nesta disciplina técnica, como material construtivo, e suas funções técnicas e adicionais. Abordam-se as propriedades biotécnicas das plantas e sua relevância para a Engenharia Natural.

Em seguida é feita uma abordagem referente aos materiais construtivos do ponto de vista da Engenharia Civil e da Engenharia Natural.

Posteriormente apresenta-se a proposta de metodologia de especificação para material construtivo vivo utilizado em projetos e obras de infraestrutura que recorram às técnicas de Engenharia Natural. Esta metodologia é resultado do desenvolvimento das seguintes fases: proposta de classificação e estruturação das funções técnicas hidrológicas e mecânicas e adicionais das plantas; classificação e definição de propriedades biotécnicas. Com base na metodologia de especificação proposta será estruturada e desenvolvida uma ficha técnica para espécies vegetais com potencial para serem utilizadas em intervenções de Engenharia Natural.

Na sequência é exemplificada a aplicabilidade desta metodologia para algumas espécies vegetais autóctones do Brasil, com potencial biotécnico para serem utilizadas em obras de Engenharia Natural, com a informação organizada no formato de ficha técnica para cada espécie.

Por fim são feitas as considerações finais e recomendações para desenvolvimento de trabalhos futuros.

2. ENGENHARIA NATURAL E A IMPORTÂNCIA DAS PLANTAS

2.1 Definição de Engenharia Natural

O termo Engenharia Natural corresponde à tradução livre do termo em alemão '*Ingenieurbiologie*', utilizada pela primeira vez em 1936, quando foi criado o Departamento de Pesquisa em Engenharia Natural '*Forschungsstelle für Ingenieurbiologie*', pelo Inspetor-Geral de Estradas Alemãs, Fritz Todt (BISCHETTI; DI FIDIO; FLORINETH, 2012; LEWIS, 2000). Esse instituto privado era liderado pelo engenheiro florestal Arthur V. Kruedener, que em 1941 publicou o livro "*Atlas - Standortkennzeichnender Pflanzen*"¹. Na publicação "*Ingenieurbiologie*" de 1951, também de V. Kruedener encontra-se a primeira definição do termo "*Ingenieurbiologie*", constituindo-se de obras que recorrem às leis da física da engenharia tradicional e a características biológicas da vegetação, descrevendo as intervenções que englobavam a engenharia e a biologia (LEWIS, 2000; SCHIECHTL; STERN, 1996; STOKES et al., 2010).

Para Kruedener (1951, apud Schiechtl e Stern 1996), a Engenharia Natural é baseada no aproveitamento biológico, particularmente em conhecimentos botânicos na aplicação de medidas de proteção e estabilização em taludes, estruturas hidráulicas, margens de cursos de água, voçorocas, ou outras conformações existentes na paisagem natural. Recorre à utilização de vegetação, que combinada ou não com materiais inertes, promove a estabilização de solos.

¹ A primeira vez que o termo Engenharia Natural apareceu numa publicação foi em 1941, no livro de Arthur V. Kruedener '*Atlas - Standortkennzeichnender Pflanzen - Für Bauingenieure und Landeswirtschaftler herausgegeben*' von der Forschungsstelle für Ingenieurbiologie des Generalinspektors für das Deutsche Strassenwesen, cujo título pode ser traduzido como, '*Atlas - Plantas indicadoras de sítio** – Para engenheiros civis e profissionais das ciências agrárias' publicado pelo Departamento de Pesquisa em Engenharia Natural da Inspetoria Geral de Estradas Alemãs. Apesar deste termo estar incluído no título, não se encontra nenhuma definição ou descrição no livro sobre Engenharia Natural.

* Tratam-se espécies, grupos de espécies ou comunidades biológicas cuja presença, abundância e condições são indicativos biológicos de uma determinada condição ambiental.

São técnicas de baixo impacto ambiental e baseiam-se essencialmente nas propriedades biotécnicas de algumas espécies de plantas (DE ANTONIS; MOLINARI, 2007; SAULI; CORNELINI, 2005; VENTI et al., 2003).

Segundo Donat (1995) a Engenharia Natural baseia-se em conhecimentos biológicos para construção de estruturas hidráulicas e para estabilização de taludes e margens de cursos de água. Plantas inteiras ou suas partes são usadas como material construtivo combinadas com outros materiais (mortos) de construção. No entanto, a Engenharia Natural não substitui, em todos os casos, a tradicional Engenharia Hidráulica ou Geotécnica, mas em muitas circunstâncias complementa e melhora outros métodos técnicos de engenharia.

Autores como Morgan e Rickson (1995), Gray e Sotir (1996) utilizam o termo '*Soil Bioengineering*'. Surge deste termo a tradução para português como Bioengenharia de Solos, que foi inicialmente utilizado no Brasil para denominar esta disciplina técnica. Contudo, devido à possível confusão com a área da biomedicina e biotecnologia molecular, recentemente recorreu-se à utilização do termo Engenharia Natural para intitular esta disciplina. A adoção deste termo no Brasil é proveniente da sua utilização pela Associação Portuguesa de Engenharia Natural (fundada em 2007), pela Associação Italiana para a Engenharia Natural, (*Associazione Italiana per Ingegneria Naturalistica*, fundada em 1989) e apoiada pela Federação Europeia de Engenharia Natural (*Europäische Föderation für Ingenieurbioogie*, fundada em 1995). No Brasil ainda existem profissionais da disciplina que utilizam o termo Bioengenharia de Solos, por isso é importante salientar que esse é equivalente a Engenharia Natural.

Ainda que, com algumas diferenças relativamente à definição de Engenharia Natural, todos os autores referenciados acabam por apresentar os mesmos critérios essenciais em que assenta esta área científica, de onde se destaca a utilização das plantas ou partes destas como material construtivo, em combinação com materiais inertes de modo integrado e complementar.

2.1.1 Características e princípios

O recurso à utilização das plantas na Engenharia Natural, característica distintiva desta disciplina em relação à engenharia tradicional, é fundamental, sendo as mesmas consideradas do ponto de vista funcional e técnico e não apenas ecológico e estético, ou seja, as plantas são utilizadas como materiais construtivos vivos. Esta característica é muito importante e diferencia a Engenharia Natural das disciplinas tradicionais que recorrem apenas à utilização de materiais inertes, ou consideram apenas as plantas do ponto de vista paisagístico ou de restauração ecológica (SAULI; CORNELINI, 2005).

O uso de técnicas de Engenharia Natural visa, através da vegetação, de forma particular, a reconstituição de novas unidades ecossistêmicas capazes de se autossustentar através de processos naturais. Isso resulta em um impacto positivo na melhoria das características geopedológicas, hidrológicas, hidráulicas, florísticas, faunísticas e paisagísticas do território. Numa escala geral a Engenharia Natural pretende aumentar a complexidade, diversidade e heterogeneidade do "sistema dos ecossistemas." (MENEGAZZI; PALMERI, 2013).

Na fase de programação, projeto e execução das intervenções de Engenharia Natural, a utilização de plantas como material construtivo ajuda a atender a alguns critérios gerais que esta disciplina deve seguir (MENEGAZZI; PALMERI, 2013):

- Utilizar a menor tecnologia necessária para resolução de um problema, denominada de Lei do Mínimo de Energia. Deverá ser utilizada a técnica de menor nível de energia (complexidade, tecnicismo, artificialidade, rigidez e custo), empregando soluções de menor impacto para a resolução de um problema considerando inclusive a hipótese de não intervir (SAULI; CORNELINI; PRETI, 2002). A Figura 1 exemplifica esse princípio, e que as intervenções quando necessárias são utilizadas para solucionar apenas o que

o problema exige, evitando-se sobredimensionamento (erro deontológico)² ou subdimensionamento (erro técnico).



Figura 1 - Esquema representativo do nível mínimo de energia. Adaptado de SAULI; CORNELINI; PRETI, 2002.

- O recurso à utilização de plantas permite planejar, projetar e implementar as intervenções para a proteção do solo e prevenção de risco hidrogeológico, em conformidade com os valores ambientais, ecológicos e paisagísticos, uma vez que se adotam métodos construtivos mais ligeiros que não comprometem as funções biológicas do ecossistema;
- Desenvolver um projeto através da análise inter e transdisciplinar que considere características climatológicas, geológicas, geomorfológicas, geotécnicas, hidrológicas, hidráulicas, florísticas, faunísticas, dos ecossistemas e da paisagem;

² Erro deontológico ocorre por excesso, utilizando uma intervenção demasiado complexa cuja resistência excede a solicitação atuante durante a vida útil de projeto. Erro técnico ocorre por falta, utilizando-se uma intervenção demasiado simples em que a resistência fica aquém das solicitações atuantes (SAULI; CORNELINI, 2005).

- Utilizar parâmetros e cálculos para dimensionamento das estruturas, que considerem as ações e efeitos da vegetação com objetivo de verificar a viabilidade das intervenções;
- Utilizar o máximo possível material vegetal autóctone presente no local de intervenção, preservando-o cuidadosamente antes do início das operações para posterior reutilização, com o objetivo de restaurar os elementos naturais que caracterizam, ou caracterizavam, o ecossistema envolvido;
- Definir as técnicas e o momento de execução da intervenção, uma vez que devido à utilização de material vegetal se devem considerar os métodos de reprodução específicos para cada espécie, bem como o período adequado para utilização das plantas (normalmente período de repouso vegetativo).

2.1.2 Campos de aplicação

A Engenharia Natural pode ser aplicada em obras de terra, especificamente a estabilização de taludes (naturais e de corte, de encostas e fluviais), no controle de processos erosivos superficiais e subsuperficiais, na recuperação de áreas degradadas e na estabilização da condição hidráulica de canais abertos (naturais ou artificiais, de escoamento fluvial ou pluvial) (SUTILI; GAVASSONI, 2012).

Estas intervenções, devido à utilização de plantas como material construtivo, apresentam esquemas construtivos mais flexíveis e permeáveis, e podem ser mais facilmente integrados, não sofrendo recalques e movimentações de solo, e também não alteram a condutividade hidráulica do solo, contrariamente ao que ocorre com soluções rígidas e impermeáveis.

As intervenções feitas com recurso à Engenharia Natural podem ser utilizadas no âmbito hidráulico para estabilização e proteção de taludes fluviais e do leito, bem como para aumentar a diversidade morfológica em trechos ou seções dos cursos de

água, ou para um aumento da biodiversidade e da conectividade das redes ecológicas (SAULI; CORNELINI, 2005).

Em encostas naturais e taludes estas técnicas promovem estabilização do solo e a prevenção de movimentos de massa. O uso de estruturas flexíveis e permeáveis onde a diferença entre a permeabilidade da obra e a do terreno envolvente é atenuada, permite conter o aumento das pressões hidráulicas no solo. Quando os fluxos superficiais são impedidos de fazer o seu curso natural, sendo concentrados numa linha de fluxo, resulta num aumento da sua força e conseqüentemente da sua capacidade erosiva. A acumulação de fluxos subterrâneos poderá desencadear, no solo, processos de separação de diferentes camadas de terreno, provocando movimentos de massa. Desta forma as plantas utilizadas nestas técnicas estabilizam o solo, favorecendo a sua porosidade e a coesão das suas partículas. As raízes promovem também a infiltração profunda das águas subsuperficiais (BIFULCO, 2013).

A técnicas de Engenharia Natural podem ser utilizadas para estabilizar ou recuperar espaços costeiros degradados por pressões ou tipologias inadequadas de uso. Também poderá ser utilizada para desenvolver mecanismos de gestão, por exemplo, dos balanços de transporte sólido (erosão, transporte e sedimentação) entre as zonas terrestres e litorais (FERNANDES; FREITAS, 2011).

Também pode ser utilizada para estabilizar e recuperar áreas degradadas devido à atividade extrativa com a finalidade de criar estruturas de suporte, proteção e reabilitação do solo, as quais em conjunto com a componente vegetativa, irão recriar novos habitats aumentando a biodiversidade local (FERNANDES; FREITAS, 2011).

Em situações de áreas alteradas por incêndios poderão também ser implementadas medidas nas quais a Engenharia Natural pode ter um papel fundamental nas intervenções corretivas de emergência no combate à erosão do solo exposto, e sua retenção (SAULI; CORNELINI, 2005).

Em zonas urbanas, a Engenharia Natural apresenta soluções construtivas do maior interesse nos domínios quer da arquitetura paisagista, quer da segurança e enquadramento de espaços e infraestruturas (FERNANDES; FREITAS, 2011).

No caso de aterros sanitários, a Engenharia Natural é utilizada no final da exploração, ou seja, na fase de selagem e integração paisagística. Aplica-se na

estabilização da camada de solo superior, bem como na proteção contra a erosão superficial com a utilização de técnicas de revestimento anti-erosivas (SAULI; CORNELINI, 2005).

A implementação de infraestruturas (rodovias, ferrovias ou dutovias) tem interferência direta no ambiente natural da paisagem, tal como a remoção física de notáveis superfícies de território e a destruição de ecossistemas e/ou interrupções na continuidade de habitats. Mesmo que estas infraestruturas atravessem áreas com menor valor estético e natural como, por exemplo, zonas de planície com vastas superfícies de agricultura intensiva, deverão mesmo assim ser consideradas medidas de requalificação da paisagem (SAULI; CORNELINI, 2005).

2.2 Plantas em Engenharia Natural

As plantas são a componente que diferencia a Engenharia Natural das intervenções tradicionais da Engenharia, e a escolha adequada das mesmas é fundamental para o sucesso das intervenções. A vantagem da utilização de plantas para estabilizar margens de cursos de água e taludes foi reconhecida à muitos séculos na Europa e na Ásia. Historiadores chineses registaram a utilização de técnicas de Engenharia Natural para reparação de diques no Rio Amarelo no século 28 A.C. (LEWIS, 2000).

Segundo Leonardo Da Vinci (1452-1519), "as raízes dos salgueiros impedem as margens dos canais de se desagregarem e deteriorarem e os ramos que se disponham transversalmente sobre essa margem e sejam regularmente podados, tornar-se-ão de ano para ano mais densos, conseguindo-se deste modo, dum passo apenas, uma margem viva" (ABATE, 2013; FLORINETH; MOLON, 2004; FRIPP; HOAG; MOODY, 2008; LEWIS, 2000).

Em 1748, Guiseppe Alberti, projetista italiano publica a primeira edição do livro "*Istruzioni pratiche per l'ingegnere civile: o sia perito agrimensore, e perito d'acque*", onde refere a utilização de plantas (salgueiros e choupos), aplicada em taludes fluviais como se pode observar na Figura 2, (BISCHETTI; DI FI DIO; FLORINETH, 2012).

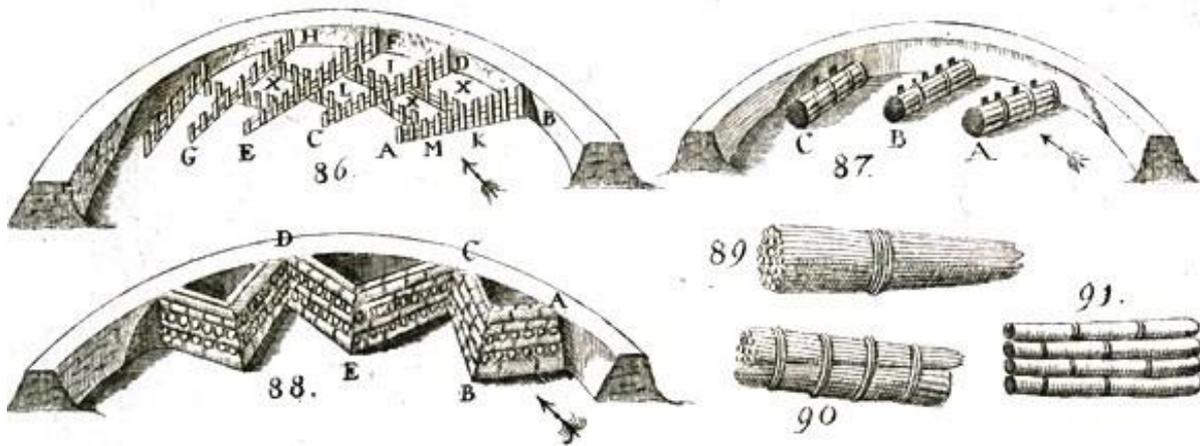


Figura 2 - Aplicação de vegetação em taludes fluviais (ALBERTI, 1748).

As plantas exercem no solo uma função estabilizadora e protetora extremamente importante e multifacetada. Os benefícios das plantas sejam eles de proteção ou estabilização dependem do tipo de vegetação e do processo de degradação existente. A perda ou remoção total da vegetação pode resultar no aumento das taxas de erosão e movimentos de massa (GRAY; SOTIR, 1996).

O conhecimento acerca da vegetação é fundamental para a escolha adequada das plantas. Plantas herbáceas que apresentam boa cobertura de solo permitem uma proteção ideal contra o escoamento superficial e a erosão eólica. Por outro lado, vegetação lenhosa, com raízes profundas é mais eficiente na mitigação e prevenção de movimentos de massa pouco profundos (COPPIN; RICHARDS, 2007; GRAY; SOTIR, 1996; MORGAN; RICKSON, 1995).

As plantas são a componente que atua como um sistema vivo, e apresenta além das vantagens de estabilização e proteção do solo, a vantagem de, se devidamente cuidada, se desenvolver de um modo equilibrado com os fatores de desequilíbrio, adaptando-se dentro de certos limites, à variação destes (FERNANDES; FREITAS, 2011).

2.3 Funções das plantas

Na Engenharia Natural, as plantas deixam de ser consideradas apenas do ponto de vista estético, passando a desempenhar funções de elemento vivo construtivo (SAULI; CORNELINI, 2005), podendo ser utilizadas de forma isolada, ou combinadas com materiais inertes, sendo os seus maiores efeitos hidrológicos e mecânicos, conforme demonstrado na Figura 3. Plantas ocorrem naturalmente e fazem parte integrante da paisagem tendo grande influência no ciclo hidrológico, interferindo no modo como a água é transferida da atmosfera para o solo, na infiltração, no escoamento superficial e subterrâneo e nas vazões e tempos de concentração, na evapotranspiração e no armazenamento de água no solo (DURLO; SUTILI, 2014). Afetando o volume e as taxas de água ao longo das linhas de fluxo, as plantas influenciam o processo e a amplitude da erosão. Também modificam o teor de umidade do solo e conseqüentemente a sua resistência.

Existe, portanto, uma relação muito próxima entre a vegetação e os seus efeitos na redução das taxas de erosão. Por um lado, as plantas através das suas funções de engenharia, têm influência nos processos erosivos existentes. Por outro lado, fenômenos erosivos podem produzir condições ambientais adversas e instáveis para o desenvolvimento das plantas. O equilíbrio e a competição do sistema erosão-vegetação foi analisado por Thornes (1988, 1990 apud MORGAN; RICKSON, 1995) para o sudeste da Espanha. Esse autor assume que a erosão conduz a uma desregulação do balanço hídrico do solo, resultando em limitações no crescimento das plantas através de stress nutricional e hídrico, com mais água disponível para escoamento superficial e conseqüentemente mais erosão. Por sua vez, um aumento no crescimento das plantas, irá conduzir a uma regulação do balanço hídrico, diminuindo a erosão e conseqüentemente mais quantidade de plantas (MORGAN; RICKSON, 1995).

Do ponto de vista da mecânica de solos, as plantas melhoram as propriedades de engenharia de solos, contribuindo para a sua estabilidade (COPPIN; RICHARDS, 2007; GRAY; SOTIR, 1996; SAULI; CORNELINI, 2005).

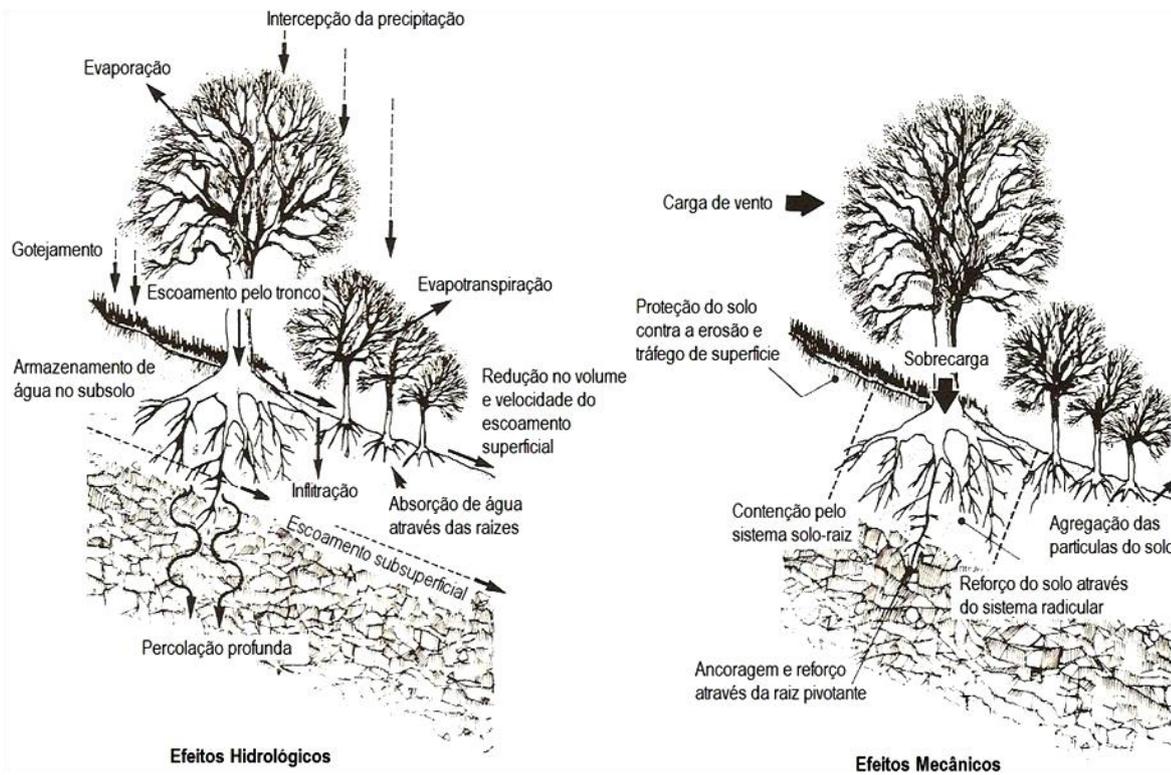


Figura 3 - Efeitos físicos (hidrológicos e mecânicos) da vegetação (COPPIN; RICHARDS, 2007).

A seguir serão abordados os conceitos e definições referentes às funções técnicas hidrológicas e mecânicas das plantas. A apresentação de funções hidrológicas e mecânicas foi elaborada de acordo com a literatura especializada. Verifica-se, no entanto, que apesar de existir uma divisão teórica entre funções mecânicas e hidrológicas, nem sempre esta divisão é clara na forma como estas são classificadas e estruturadas. Também se salienta que existe uma clara confusão entre funções, ações e efeitos. No entanto, este capítulo refere-se apenas à revisão bibliográfica e não tem o objetivo de esclarecer estes conceitos, mas apenas de explorá-los de acordo com a literatura especializada.

Após se elencarem e descreverem as funções técnicas das plantas, serão abordados os seus efeitos na resistência ao cisalhamento e estabilidade de taludes, bem como resumidas as consequências na estabilidade de solos devido à sua remoção.

2.3.1 Funções hidrológicas

Interceptação da precipitação (COPPIN; RICHARDS, 2007; MORGAN; RICKSON, 1995; VENTI et al., 2003)

Folhas e galhos interceptam a chuva causando perdas por absorção e evaporação, diminuindo assim o volume de água que chega ao solo. Absorvem a energia da chuva e previnem a desagregação das partículas de solo pelo impacto das gotas. A interceptação provoca um efeito de retardamento na duração da precipitação, prolongando o período de chuva por várias horas após o término desta, dissipando a energia da chuva, reduzindo a sua intensidade. A interceptação pode variar de 100% para uma chuva leve até 25% para uma chuva de maior intensidade. A precipitação que atinge o solo ocorre de três formas distintas:

- Diretamente, quando atravessa os espaços existentes entre as folhas e entre plantas;
- Escoamento pelo tronco, descendo pelos troncos ou caules da vegetação;
- Gotejamento das folhas;

As folhas, ramos e troncos são atingidos diretamente por gotas pequenas (<1mm), que armazenadas temporariamente se concentram em gotas de maior dimensão (>5mm), atingindo o solo e provocando precipitações localizadas intensas entre arbustos e árvores. Nestes casos a intensidade da precipitação poderá ser dez vezes maior do que a precipitação que atinge a copa (ARMSTRONG; MITCHELLI, 1987 apud COPPIN; RICHARDS, 2007). Estes valores podem exceder a capacidade de infiltração no solo e provocar escoamento superficial. Este efeito é mais acentuado em condições climáticas calmas, sendo que no caso de ocorrência de ventos fortes, o movimento das folhas e ramos irá ajudar na distribuição uniforme das gotas.

No caso de plantas herbáceas, estas produzem um padrão uniforme de distribuição da precipitação na superfície do solo.

Evapotranspiração (COPPIN; RICHARDS, 2007; GRAY, 1973; MORGAN; RICKSON, 1995; VENTI et al., 2003)

O termo evapotranspiração é normalmente usado para descrever o efeito combinado da remoção de umidade do solo pela transpiração da planta e pela evaporação da água interceptada pelas plantas durante a precipitação. O efeito da vegetação é expresso pela relação E_t/E_o , onde E_t é a taxa de evapotranspiração para a cobertura com vegetação e E_o é a taxa de evaporação para corpos de água. Quando ocorrem altas taxas de evapotranspiração, as camadas superficiais do solo secam rapidamente e as plantas têm maior dificuldade em extrair água do solo por sucção através das raízes. Para prevenir desidratação as plantas reduzem a sua transpiração, para que a evapotranspiração seja menor que a potencial. Apesar da capacidade da vegetação reduzir a umidade do solo ser reconhecida qualitativamente é difícil quantificá-la. A diminuição do teor de umidade aumenta a sucção no solo, que afeta a condutividade hidráulica e a pressão neutra.

Através de modificações no teor de umidade do solo, a vegetação afeta a frequência com que este fica saturado, que por sua vez controla a probabilidade de ocorrência de escoamento superficial, ou ruptura da massa de solo. A força deste efeito depende do solo e clima local, bem como do tipo de plantas. Também existe uma variação sazonal, em regiões de clima bem demarcado, onde o efeito é maior no verão e menor no inverno, uma vez que as plantas se encontram em estado de dormência.

Infiltração (COPPIN; RICHARDS, 2007; MORGAN; RICKSON, 1995)

A presença de vegetação aumenta a infiltração e a permeabilidade do solo nas camadas superiores devido ao efeito dos seguintes fatores:

- Matéria orgânica;
- Sistema radicular;
- Canais ou fissuras formados por raízes que apodreceram;
- Aumento da rugosidade superficial;
- Baixa densidade (maior porosidade) de solo;
- Melhores estruturas de solo superficial.

Esses fatores podem dar origem a taxas de infiltração mais altas, e potencialmente originar um aumento do teor de umidade no solo comparado com áreas não vegetadas. Este efeito é compensado pela interceptação, transpiração e declividade. Devem ser realizados testes de permeabilidade na região do sistema radicular para quantificar os efeitos locais da infiltração, especificamente onde esta pode aumentar devido à existência de fendas de tração no solo, ou diminuir pela formação de uma crosta superficial (selamento superficial) devido à ação de precipitação intensa e evaporação superficial.

Escoamento superficial (ABATE; GROTTA, 2009; COPPIN; RICHARDS, 2007; MORGAN; RICKSON, 1995; SAULI; CORNELINI; PRETI, 2002; WILKERSON, 2005)

Como escoamento superficial os autores referenciados consideram todo o escoamento acima do solo, ou seja, quer em taludes quer em cursos de água. Em consequência da combinação de fatores como a interceptação, infiltração e rugosidade do solo, o volume do escoamento superficial de áreas com plantas é inferior ao de áreas com solo exposto. O volume do escoamento superficial corresponde de 10 a 20% da precipitação recebida em pequenas bacias hidrográficas cobertas com vegetação arbórea, arbustiva e herbácea, mas aumenta para 30 a 40% no caso de áreas cultivadas e 60 a 70% em áreas urbanas. Modificando o uso do solo de áreas florestadas para áreas com coberturas mais abertas, resulta em maiores volumes de escoamento superficial, resposta mais rápida de escoamento, menor tempo de concentração³ e maiores picos de cheia, como se pode observar no gráfico da Figura 4.

³ Intervalo de tempo contado a partir do início da precipitação, para que toda a bacia hidrográfica passe a contribuir para a seção de controle considerada. Duração da trajetória da partícula de água que demore mais tempo para atingir a seção (PINTO et al., 2008).

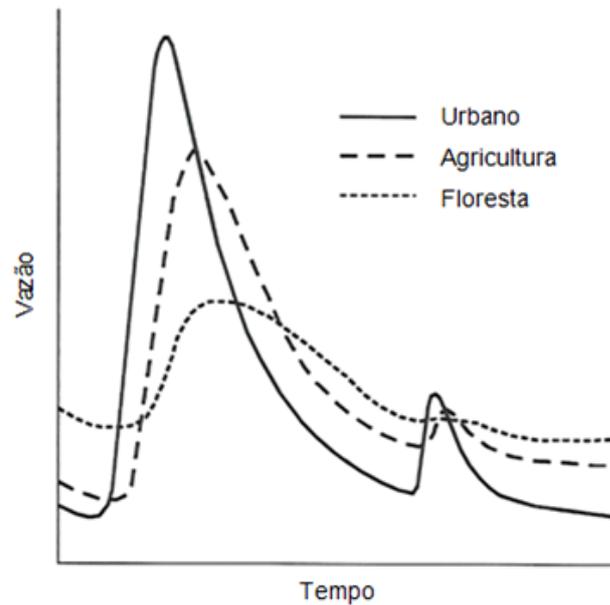


Figura 4 - Escoamento superficial para diferentes tipos de cobertura vegetal (COPPIN; RICHARDS, 2007).

A vegetação também reduz a velocidade do escoamento superficial, consequência da rugosidade gerada pelas folhas, ramos e caules das plantas. A rugosidade hidráulica pode ser caracterizada pelo parâmetro n , coeficiente de Mannig conforme demonstrado na Equação 1, onde v - velocidade média da água (m/s), R - raio hidráulico da seção transversal (m), S - declividade da superfície de escoamento.

$$v = \frac{R^{\frac{2}{3}} \times S^{\frac{1}{2}}}{n} \quad (\text{Equação 1})$$

A rugosidade hidráulica e consequentemente o retardamento do fluxo, dependem da morfologia (hábito) da parte aérea da planta, da sua densidade de crescimento, e da sua altura em relação à espessura da lâmina de água. Como se pode observar na Figura 5, com lâminas de água pouco profundas, a vegetação herbácea mantém-se rígida e com valores de rugosidade de 0,25 a 0,30, associados à interferência e deformação interna do fluxo por ação dos caules individuais das plantas. À medida que altura da lâmina de água aumenta, os caules oscilam, perturbando o fluxo e os valores de rugosidade aumentam para cerca de 0,40 e a velocidade sofre maior retardamento. Quando a lâmina de água começa a submergir a vegetação, esta

curva-se por ação do fluxo e os valores de rugosidade diminuem rapidamente, resultando num aumento da velocidade do fluxo.

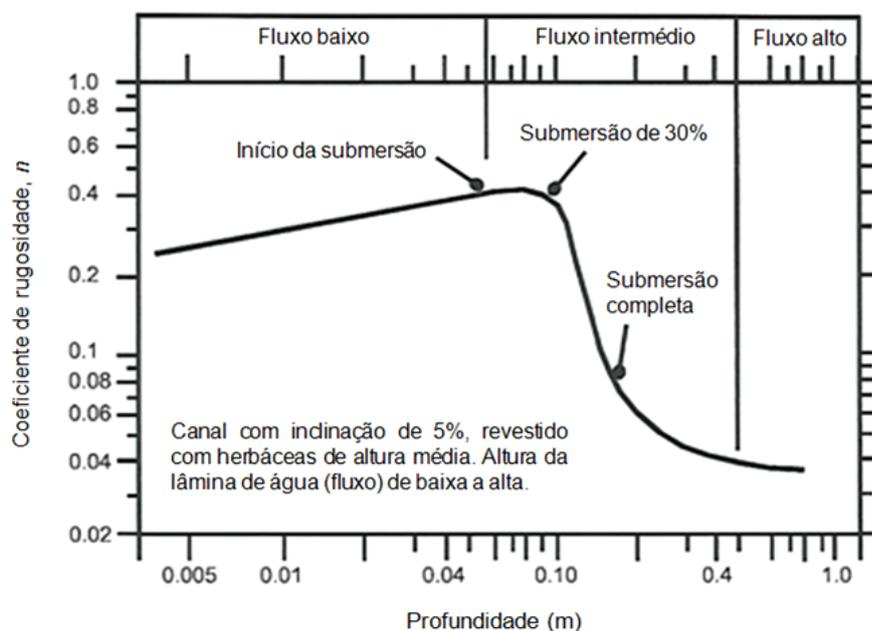


Figura 5 - Relação entre coeficiente de Manning e profundidade da lâmina de água para vegetação herbácea de altura média (COPPIN; RICHARDS, 2007).

O fluxo de água no solo exposto pode transportar partículas de solo soltas, e particularmente no caso de fluxos canalizados poderá ainda destacar mais partículas de solo. A presença de vegetação pode limitar a capacidade do fluxo de água destacar as partículas de solo e transportar esses sedimentos, quer devido ao efeito de retardamento do volume e da velocidade de escoamento, quer devido à proteção física do solo. Devido a esses efeitos a taxa de perda de solo diminui exponencialmente com o aumento da percentagem de cobertura de solo. Esse comportamento pode ser demonstrado através de dados de coeficientes de escoamento superficial para diferentes tipos de uso de solo, expressando-os como uma proporção do valor para solo exposto, como mostrado pela curva da Figura 6, assumindo que a perda de solo varia diretamente com o volume de escoamento superficial. Na prática a variação do escoamento superficial deverá estar elevada a uma potência entre 0,67 a 1,7.

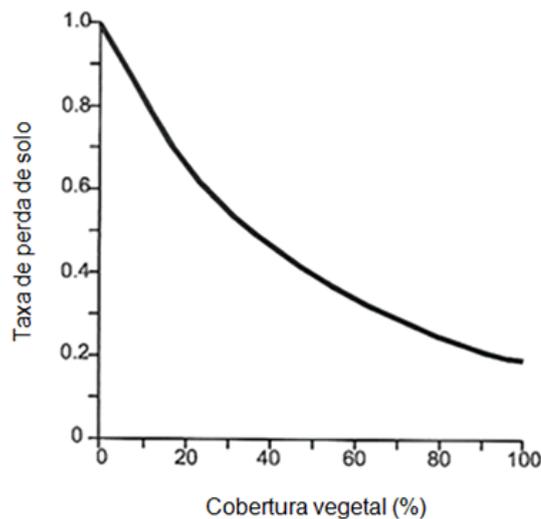


Figura 6 - Alteração da taxa de perda de solo devido à redução do volume de escoamento superficial em função do aumento de percentagem de cobertura vegetal (COPPIN; RICHARDS, 2007).

A capacidade do fluxo de água para destacar partículas de solo, varia exponencialmente com a velocidade média de fluxo. Ou seja, a diminuição da velocidade do escoamento superficial, tem efeito na erosão.

Variações locais na vegetação podem aumentar a capacidade erosiva do fluxo superficial, por causa do aumento localizado da velocidade e devido à força de resistência. Quando o fluxo sofre uma separação devido à presença de grupos de vegetação, a pressão (tensão normal) é maior a montante do que a jusante, como se pode verificar na Figura 7, e ocorrem remoinhos e turbulência, imediatamente a jusante da vegetação. Devido a este fator pode ocorrer erosão em vórtice no talude acima e abaixo da vegetação.

Onde a vegetação é irregular, como no caso de tufos de herbáceas, o potencial erosivo é aumentado devido a todos esses fatores. O efeito combinado desses fatores pode ser suficiente para igualar o potencial erosivo do escoamento superficial num talude sem vegetação de igual inclinação (COPPIN; RICHARDS, 2007).

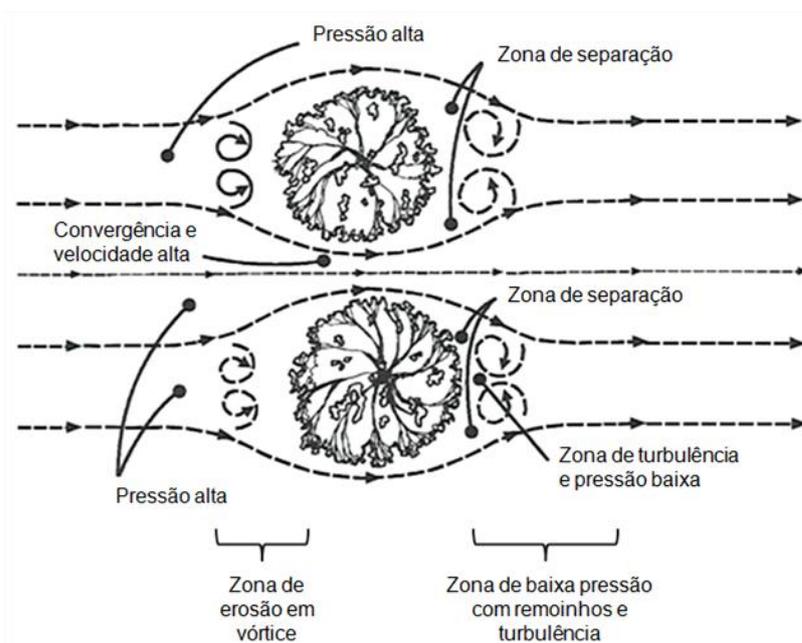


Figura 7 - Vista em planta do fluxo de água em volta da vegetação (COPPIN; RICHARDS, 2007).

Uma cobertura densa e uniforme de vegetação herbácea ou arbustiva, além de reduzir a erosão devido ao retardamento do fluxo, aumenta a deposição de sedimentos existentes no fluxo. Quanto mais densa a vegetação, maior a quantidade de sedimento retida e conseqüentemente removida do fluxo de água.

No caso de canais mais profundos com regime turbulento (número de Reynolds⁴ elevado), a vegetação interage com os processos de fluxo, para proteção do solo contra a erosão principalmente de duas formas. Por um lado, no caso de vazões de pequena intensidade, o alto retardamento associado com o fato da vegetação permanecer rígida e não submersa (Figura 5) reduz a velocidade abaixo daquela requerida para o transporte de material (velocidade limite de transporte)⁵. Por outro lado, no caso de vazões de maior intensidade, a vegetação submerge e sofre flexão para jusante, formando uma camada de proteção contra a erosão, com pouco efeito de retardamento.

⁴ Coeficiente adimensional expresso pela relação entre as forças de inércia e as forças de viscosidade que atuam no fluido. Quando o número de Re for menor que 5 as forças viscosas são dominantes e o fluxo é dito laminar; quando número de Re é maior que 70 as forças de inércia são dominantes e o fluxo é considerado rugoso ou turbulento; o fluxo de transição ocorre quando os valores de Re estão entre 5 e 70 (PORTO, 2006).

⁵ Velocidade necessária para colocar materiais em movimento ou, então, para mantê-los em movimento (DURLO; SUTILI, 2014).

Fluxo subsuperficial (BONATTI; MARONGIU, 2013; COPPIN; RICHARDS, 2007)

O fluxo subsuperficial ocorre entre a serrapilheira e as camadas superficiais do solo que contêm uma rede densa de raízes, com direção de escoamento paralela à superfície. No caso de taludes com cobertura arbórea e espessa camada de húmus, o fluxo subsuperficial pode ser 80% da drenagem total que ocorre no talude. A permeabilidade horizontal nas camadas superiores de solos vegetados é frequentemente maior do que a permeabilidade vertical. Desta forma o fluxo subsuperficial pode desviar a água da infiltração, de modo que, apesar da infiltração em solos vegetados ser maior que em solos não vegetados, a profundidade desta infiltração é bastante superficial.

Proteção superficial hídrica (BONATTI; MARONGIU, 2013; COPPIN; RICHARDS, 2007; MORGAN; RICKSON, 1995)

A erosão causada pelo impacto das gotas de chuva, resulta do impacto dessas gotas sobre o solo exposto. A vegetação pode ser extremamente eficaz na prevenção da ruptura de agregados e sua separação da massa de solo, pelo impacto das gotas. A vegetação previne a formação de uma crosta superficial, mantendo as taxas de infiltração no solo. O grau de proteção do solo depende da percentagem de cobertura, da altura e das características das copas das plantas.

A percentagem de cobertura do solo determina a quantidade de solo protegido do impacto direto das gotas da chuva. A proteção máxima ocorre para coberturas de solo de 70% ou mais (COPPIN; RICHARDS, 2007).

O tamanho das plantas influencia a altura da queda das gotas interceptadas e lançadas posteriormente através das folhas por gotejamento. Esse fator afeta a velocidade atingida pelas gotas na queda, sua energia no momento do impacto com o solo e conseqüentemente a sua capacidade de desagregação das partículas de solo. Plantas com copas baixas resulta em velocidade de impacto reduzida, no entanto, no caso de plantas com copas mais altas, as gotas podem readquirir a sua velocidade terminal antes de atingirem o solo.

As características das copas podem afetar o papel da vegetação na proteção superficial do solo de duas formas. Em primeiro lugar plantas compostas por folhas

grandes e largas permitem maior interceptação e armazenamento de água, o que diminui o potencial erosivo da chuva que atinge o solo durante o evento. Por outro lado a interceptação pelas copas altera o tamanho das gotas e a energia da precipitação. Ou seja, no caso de plantas compostas por folhas grandes e largas, estas permitem que as gotas interceptadas se agreguem antes de atingirem o solo por gotejamento. Se estas gotas caírem de alturas inferiores a 0,5 m, não existe aumento significativo na desagregação do solo, uma vez que as gotas não desenvolvem velocidades com magnitude próximas à velocidade terminal correspondente. No caso de copas mais altas, observa-se maior desagregação de solo, do que no caso de solo sem cobertura (COPPIN; RICHARDS, 2007).

Diferentes tipos de vegetação proporcionam diferentes níveis de proteção do solo contra a sua desagregação pelo impacto das gotas de chuva. Na Figura 8, esta proteção é expressa na taxa de perda de solo em função da percentagem de cobertura. Se as copas das plantas estiverem próximo do solo, como no caso de herbáceas ou arbustos pequenos, a taxa de perda de solo diminui exponencialmente com o aumento da percentagem de cobertura. No caso de copas com 0,5 m de altura, a taxa de perda de solo diminui linearmente com o aumento da percentagem de cobertura. Para copas mais altas, a taxa de perda de solo varia linearmente com a percentagem de cobertura, de uma forma dependente da altura das copas e do tamanho das gotas; se forem formadas apenas gotas provenientes de folhas pequenas, a taxa de perda de solo continua a diminuir com o aumento da cobertura; se forem formadas gotas provenientes de folhas largas, a taxa de perda de solo aumenta com a cobertura, podendo ser o dobro do que em solo nu, para casos de copas com 2 m de altura e 90 a 100% de cobertura.

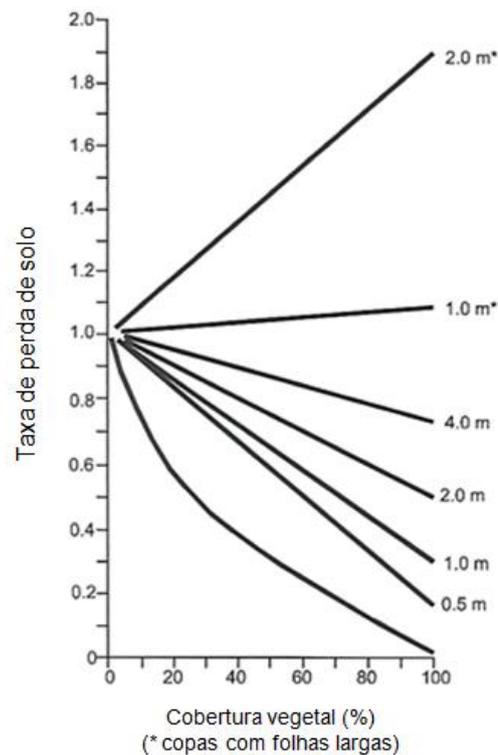


Figura 8 - Taxa de perda de solo para desagregação por impacto da gota de chuva relacionada com a percentagem de cobertura de solo para diferentes alturas de copas (COPPIN; RICHARDS, 2007).

A presença de manta morta na superfície do solo protege-o contra o impacto das gotas, e a taxa de perda de solo diminui exponencialmente com o aumento deste tipo de cobertura. Para copas altas, a existência de manta morta pode reduzir a desagregação do solo até 93%, relativamente ao solo nu (WIERSUM, 1985 apud COPPIN; RICHARDS, 2007).

Depleção de umidade no solo (COPPIN; RICHARDS, 2007; GRAY, 1977; ZIEMER, 1978)

A capacidade da vegetação alterar o teor de umidade no solo é grande e pode espacialmente, se estender para além da região ocupada pelo sistema radicular. Medições feitas por Ziemer (1978) indicam que a maior depleção de umidade ocorre para profundidades entre os 2 a 4 m abaixo do nível do solo, e que podem ser ampliadas até 6 m de distância de uma árvore individual.

Muitas plantas, principalmente aquelas que habitam locais úmidos, são caracterizadas por altas taxas de transpiração e, portanto, apresentam uma alta capacidade de remover água do solo. Estas plantas são denominadas de freatófitas⁶ e apresentam potencial para serem utilizadas para diminuir a pressão neutra.

Apesar da capacidade que as árvores têm de reduzir a umidade do solo ser reconhecida qualitativamente, ainda falta a mesma ser quantificada. A magnitude da sua influência na resistência do solo, no entanto provavelmente será menor do que o reforço do solo por influência do sistema radicular, especialmente em períodos críticos para a estabilidade de taludes.

A presença de vegetação além de aumentar a resistência do solo pela redução do teor de umidade, reduz também o peso da massa de solo através da evapotranspiração (COPPIN; RICHARDS, 2007; VENTI et al., 2003). Esta redução de peso pode ser muito importante em taludes vegetados, onde o solo poderá estar potencialmente instável.

Retração do solo (COPPIN; RICHARDS, 2007; GRAY; SOTIR, 1996; IP, 2011)

Em alguns tipos de solos, a extração prolongada de água pelas raízes pode levar à dissecação do mesmo e à formação de fissuras de retração. Depois de formadas essas fissuras, poderão levar ao aumento da permeabilidade e infiltração no solo. O sombreamento do solo pela vegetação pode reduzir a incidência deste fenômeno resultante da exposição de solos particularmente plásticos, à seca intensiva ou aquecimento excessivo em pleno sol.

⁶ Plantas, ávidas de água, que crescem principalmente ao longo dos rios e cujas raízes profundas atingem a franja de capilaridade (IBGE, 2004). Estas plantas não toleram condições secas.

2.3.2 Funções mecânicas

Proteção mecânica superficial (COPPIN; RICHARDS, 2007; MORGAN; RICKSON, 1995; RAUCH, 2008)

A vegetação protege o solo de forma mecânica através da absorção direta do impacto humano, do pisoteio dos animais e da preseça de veículos. Este efeito pode ser analisado, considerando a capacidade que a vegetação tem de suportar esforços internos de tração, compressão e cisalhamento oriundos do pisoteio. O cisalhamento provoca danos maiores que a compressão. A resistência da vegetação ao desgaste depende da resistência à tração dos caules, ramos e folhas, da resistência do conjunto solo-raiz abaixo do solo e da taxa de recuperação para cada espécie. Desta forma, a composição de espécies e os fatores climáticos são fatores críticos. Devido à falta de estudos que tratem a vegetação do ponto de vista da Engenharia, a análise do modo como a vegetação pode absorver impactos humanos e de máquinas antes de ocorrer ruptura é em grande parte empírica.

A vegetação tem efeito de manta ou esteira superficial devido à presença de uma rede de raízes superficiais entrelaçadas, com boa ancoragem, e significativo grau de resistência planar, efeitos que contribuem significativamente para a redução de movimentos como o escorregamento de terras. Plantas herbáceas e arbustivas podem atuar de forma semelhante, mas no caso de herbáceas cerca de 60 a 80% das raízes se encontram nos primeiros 50 mm de solo, então este efeito é restrito a baixas profundidades (COPPIN; RICHARDS, 2007). Este efeito também é reconhecido na estabilidade de margens fluviais, mas ainda não existem estudos que quantifiquem e prevejam este efeito.

Isolamento do solo (BONATTI; MARONGIU, 2013; COPPIN; RICHARDS, 2007)

O solo com cobertura vegetal tem o seu microclima modificado pois tal cobertura reduz as oscilações de temperatura e umidade no solo. Existe uma mitigação do intemperismo mecânico que causa a redução da coesão do solo através da quebra de agregados e do enfraquecimento estrutural, especialmente devido à ação do

gelo-degelo. Apesar de não existir informação publicada que quantifique a extensão deste efeito, ele é largamente aceito na geomorfologia como um mecanismo natural.

Confinamento do solo (ALI; OSMAN, 2008; COPPIN; RICHARDS, 2007; MORGAN; RICKSON, 1995)

As raízes com diâmetro de 1 a 12 mm confinam fisicamente as partículas de solo, impedindo o seu movimento por efeitos da gravidade, da precipitação, do escoamento superficial e do vento. Plantas com sistemas radiculares laterais bem desenvolvidos e com maior percentagem de área ocupada por raízes finas, são mais efetivas na redução da erosão superficial e da perda de solo, que plantas com sistemas radiculares estruturados verticalmente com raízes pivotantes (Figura 9). Para revegetação de canais, são normalmente utilizadas plantas com sistemas radiculares laterais bem desenvolvidos, que desta forma confinam o solo e restringem a erosão.

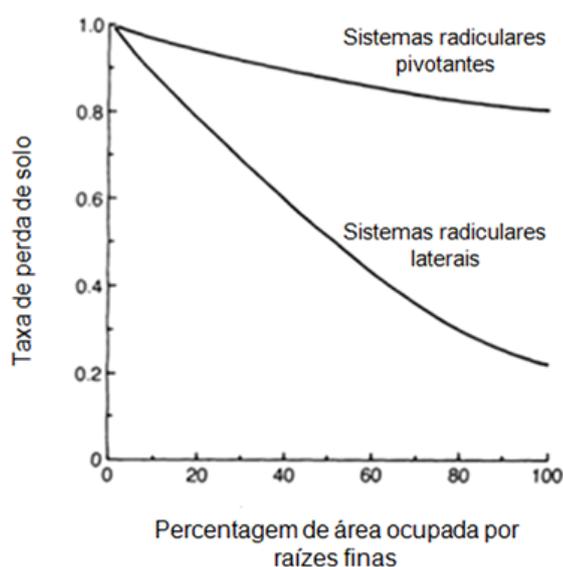


Figura 9 - Relação entre perda de solo e percentagem de área ocupada por raízes finas (DISSMEYER; FOSTER, 1985 apud MORGAN; RICKSON, 1995).

Árvores e arbustos grandes têm a capacidade de confinar e reter pedregulhos, pedras ou outros materiais instáveis e soltos, impedindo-os de rolares ou deslizarem

pelas encostas. As plantas mais eficientes para esta função devem apresentar as seguintes características:

- Resiliência aos impactos causados pela queda de materiais; os seus caules preferencialmente deverão ser flexíveis para não se quebrarem;
- Caules muito ramificados, que apresentem mais que um caule principal, de forma a que o crescimento não seja atrofiado caso este seja danificado;
- Tolerância ao aterramento, ou seja, que tenham a capacidade de produzir novas raízes a partir de caules enterrados.

Reforço do solo pelo sistema radicular (CECCONI et al., 2012; COPPIN; RICHARDS, 2007; MORGAN; RICKSON, 1995; NORRIS; GREENWOOD, 2006; VENTI et al., 2003; ZIEMER, 1981)

O sistema radicular existente no solo forma um material composto que funcionam como fibras de alta resistência à tração, no interior de uma massa de solo com baixa resistência. Este efeito é semelhante ao sistema de reforço proporcionado por uma massa de solo estabilizada através da inclusão de materiais sintéticos, metálicos ou naturais. A resistência ao cisalhamento do solo reforçado pelas raízes é melhorada devido à existência de uma matriz radicular. No caso da existência de árvores este efeito é alargado a vários metros de profundidade e distância, variando diretamente com a concentração de raízes. O efeito mecânico do sistema radicular é melhorar a força de confinamento, a resistência ao deslizamento e aumentar a resistência da massa solo-raiz através da ação de ligação das raízes no compósito fibras-solo, sendo que o ângulo de atrito interno do solo não sofre alteração, como se pode observar na Figura 10.

Outro efeito no reforço de solo pelas raízes é que estas resultam num acréscimo da coesão no solo (Figura 10). O aumento da coesão do solo, c_r , devido à presença de raízes, varia em proporção da densidade ou concentração destas no solo, medida diretamente em termos da massa de raízes por unidade de volume. Normalmente apenas são consideradas raízes com diâmetros inferiores a 15-20 mm, uma vez que raízes com diâmetros superiores aos indicados não contribuem significativamente

para aumentar a resistência ao cisalhamento, e devem ser tratadas como tirantes individuais.

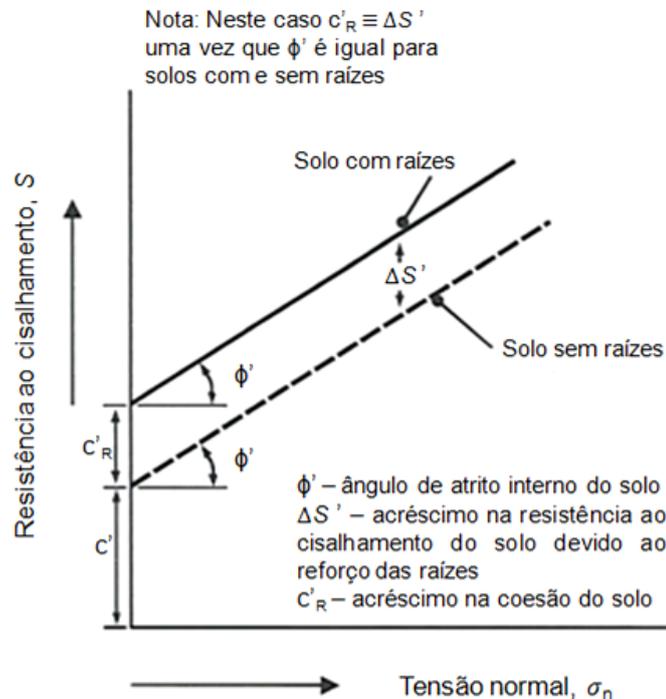


Figura 10 - Efeito do reforço das raízes na resistência ao cisalhamento do solo (COPPIN; RICHARDS, 2007).

O reforço do solo pelas raízes também permite a transferência de cargas de zonas sobrecarregadas para zonas sujeitas a menor esforço, através da interação de um sistema semi-contínuo de raízes. Esse papel é desempenhado por todos os tipos de reforços em materiais compósitos.

A magnitude do efeito mecânico de reforço através da vegetação é em função das seguintes propriedades das raízes:

- Densidade;
- Resistência à tração;
- Módulo de elasticidade;
- Relação entre comprimento e diâmetro;
- Alinhamento, ou seja, linearidade/angularidade;
- Orientação da direção das tensões principais.

Ancoragem, arqueamento e escoramento (BOSSCHER; GRAY, 1986; COPPIN; RICHARDS, 2007; FAN; LAI, 2014; GRAY; MEGAHAN, 1981; GRAY; LEISER, 1982; MORGAN; RICKSON, 1995; TSUKAMOTO, 1990)

A raiz principal e as raízes secundárias de diversas espécies arbóreas penetram nas camadas profundas do solo, ancorando-as aos taludes. Os troncos e as raízes principais podem atuar da mesma forma que estacas estabilizantes aplicadas na base do talude, escorando-o e contendo os movimentos descendentes de solo. Gray (1978 apud COPPIN; RICHARDS, 2007), descreve o efeito de escoramento de um talude regolítico de granito pouco profundo, com cobertura de pinheiros, onde o espaçamento entre árvores é grande, e onde a parte não escorada pelas árvores rompeu. A extensão da contribuição do efeito de escoramento para a estabilidade do solo num talude depende da profundidade da espessura do regolito⁷ e do lençol freático, bem como da capacidade das raízes penetrarem a rocha-matriz (Figura 11).

No caso do arqueamento, este efeito ocorre devido à presença de árvores, que agem a favor da estabilidade quando pouco espaçadas formando uma zona de arqueamento entre elas (Figura 12).

Esta zona de arqueamento cria maior resistência nas suas laterais, o que por sua vez traz um aumento da estabilidade do talude. A magnitude do efeito de arqueamento é influenciado por:

- Espaçamento, diâmetro e encaixe das árvores;
- Espessura e inclinação da deformação das camadas do talude;
- Propriedades de resistência dos solos.

⁷ Material superficial, originado das rochas e dos depósitos inconsolidados, que foi afetado pelo intemperismo químico e físico. Abaixo do regolito estão os materiais rochosos que não foram afetados pelo intemperismo, ou seja, a rocha-matriz ou rocha-mãe.

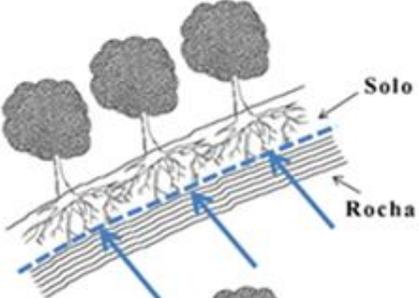
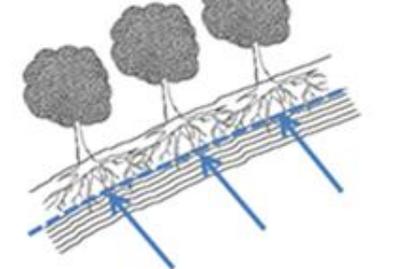
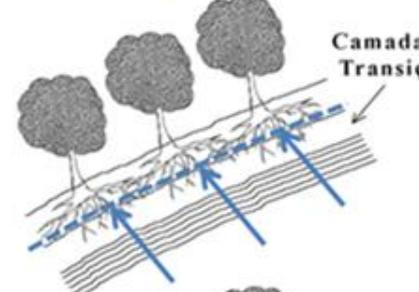
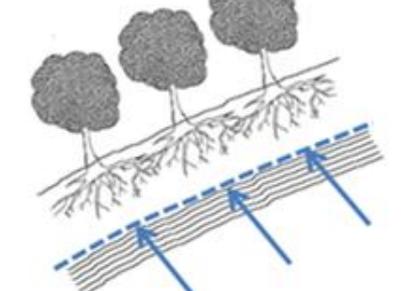
| Tipo de Talude | Descrição | Efeito das raízes na estabilização |
|---|---|--|
|  | <p>A. Camada fina de regolito totalmente reforçada pelas raízes; base de rocha firme impenetrável por raízes</p> | <p>Leve, a superfície potencial de ruptura encontra-se na interface dos dois tipos de solo</p> |
|  | <p>B. Semelhante ao tipo A, no entanto a rocha-matriz apresenta discontinuidades, que são penetráveis pelas raízes. Os troncos e as raízes atuam como estacas estabilizantes</p> | <p>Maior</p> |
|  | <p>C. Camada de regolito espessa, com camada de transição de densidade de solo e resistência ao cisalhamento que aumenta com a profundidade; as raízes penetram a camada de transição, fornecendo forças estabilizantes aos taludes</p> | <p>Substancial</p> |
|  | <p>D. Camada de regolito espessa, abaixo da zona radicular</p> | <p>Pouco efeito uma vez que a zona de instabilidade é profunda</p> |

Figura 11 - Influência do reforço das raízes para taludes em diferentes condições de subsolo (TSUKAMOTO; KUSABE, 1984 apud MORGAN; RICKSON, 1995).

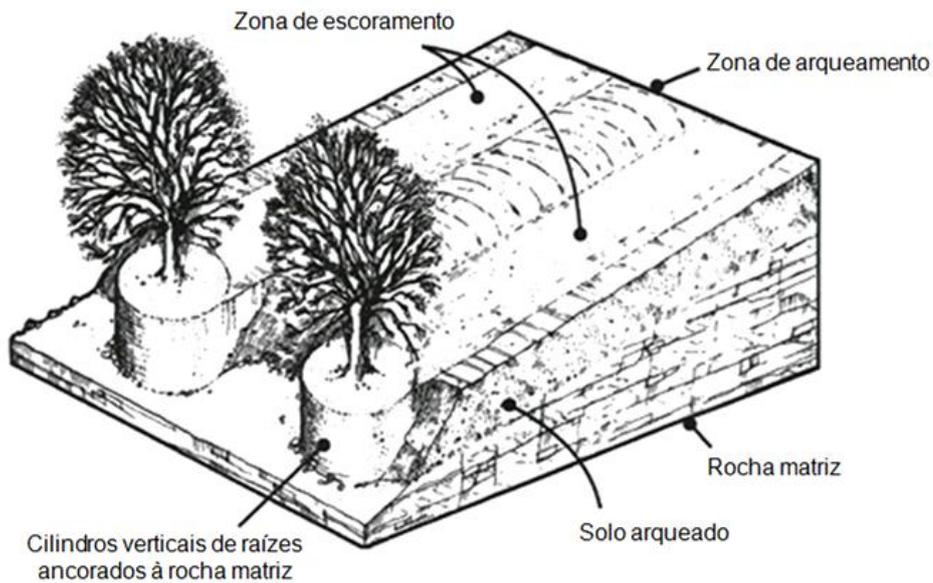


Figura 12 - Representação esquemática dos efeitos de ancoragem, arqueamento e escoramento das plantas no solo (WANG; YENG; 1974 apud MORGAN; RICKSON, 1995).

Sobrecarga (COPPIN; RICHARDS, 2007; FAN; LAI, 2014; GRAY; MEGAHAN, 1981; MORGAN; RICKSON, 1995; VENTI et al., 2003)

A sobrecarga consiste no efeito de adição de peso ao talude, resultante da presença de vegetação. Este efeito, normalmente é apenas considerado no caso de vegetação arbórea, uma vez que o peso de plantas herbáceas e arbustivas é comparativamente insignificante.

Apesar de ser considerado um efeito adverso, a sobrecarga também poderá ser benéfica, dependendo da geometria do talude, da distribuição da vegetação e das propriedades de solo. Num talude a sobrecarga aumenta as forças descendentes, reduzindo a resistência da massa do solo ao deslizamento; por outro lado a carga vertical adicional aumenta a componente por atrito, ou seja, a magnitude das forças ascendentes. Geralmente o segundo efeito prevalece sobre o primeiro, por isso a sobrecarga é benéfica. No entanto, a sobrecarga localizada no topo do talude reduz a estabilidade global do mesmo, enquanto que localizada na base do talude aumenta a estabilidade.

Considerando a superfície de ruptura crítica da Figura 13, é possível que o centro de gravidade das árvores esteja localizado de forma que proporcione um momento

estabilizante em torno do ponto de rotação. Esse fenômeno ocorre para a maioria das árvores que crescem na parte inferior do talude. A componente normal da sobrecarga atuando no talude aumenta a resistência por atrito ou forças estabilizantes, contra o deslizamento ao longo da superfície de ruptura. Os autores Gray e Megahan (1981), mostram que para um talude infinito, a sobrecarga é benéfica quando a coesão é baixa, o nível de água no solo é alto, o ângulo de atrito interno é alto e o ângulo de inclinação é baixo.

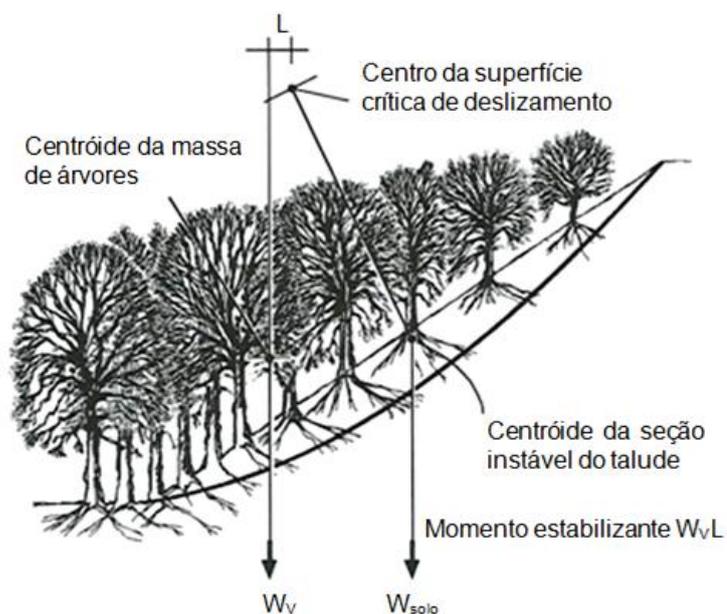


Figura 13 - Efeitos da sobrecarga causada por árvores na base de uma superfície de deslizamento (COPPIN; RICHARDS, 2007).

Efeito de cunha das raízes (COPPIN; RICHARDS, 2007; FIORI; CARMIGNANI, 2011; MORGAN; RICKSON, 1995)

O efeito de cunha provocado pelas raízes é um processo potencialmente instabilizante, uma vez que o seu crescimento, provoca a abertura de fendas e descontinuidades em solos rochosos. As árvores causam problemas maiores, no entanto a vegetação herbácea e arbustiva também provoca a abertura de fendas pequenas. A penetração das raízes nas fissuras promove um aumento da infiltração da água e umedecimento do solo, contribuindo para a instabilização dos taludes.

Quando a vegetação se encontra ancorada em taludes inclinados que apresentem planos de descontinuidades subverticais, o efeito de cunha pode deslocar e causar o tombamento de blocos. O apodrecimento das raízes também potencializa o tombamento de blocos rochosos, à medida que as ações de ligação e confinamento falham. Taludes menos inclinados, ou com espessuras de solo muito grandes são menos susceptíveis de serem afetados por este fenômeno.

Efeito da vegetação no vento (COPPIN; RICHARDS, 2007; MORGAN; RICKSON, 1995)

As plantas são utilizadas há muitos anos como barreiras para impedimento do vento, no entanto a compreensão sobre como os mecanismos de controle são afetados ainda é bastante limitada.

A capacidade do vento separar partículas do solo, ou de transportar sedimentos está relacionada com a velocidade elevada ao quadrado ou ao cubo, respectivamente. Ou seja, uma diminuição na velocidade do vento significa uma diminuição no seu potencial erosivo. A vegetação reduz a velocidade do vento, exercendo uma força de resistência ao fluxo, próxima à superfície do solo. Essa resistência é uma combinação de atrito, associado à passagem de ar pelo topo da vegetação, formando-se uma resistência associada à separação do fluxo causada pelos elementos individuais da vegetação, que se comportam como elementos atenuantes do fluxo.

Apesar de se terem determinado coeficientes de resistência para estratos de vegetação e barreiras, na prática estes não são muito exatos, uma vez que a vegetação não se comporta como um material rígido e os coeficientes de resistência variam com a velocidade do vento (enquanto no caso de materiais rígidos como as barreiras são independentes da velocidade do vento).

A resistência exercida por um quebra-vento, como uma barreira viva, modifica o padrão do fluxo de ar. O fluxo de ar ao redor de uma barreira pode ser dividido em diversas zonas como se pode verificar na Figura 14. A compreensão destes padrões de fluxo é utilizada para execução de projetos de barreiras vivas, para controlar erosão e providenciar abrigos.

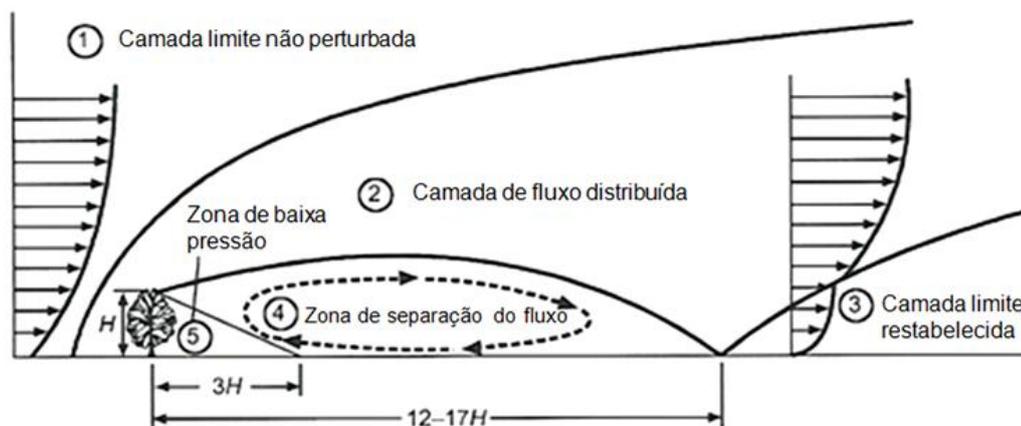


Figura 14 - Padrão de fluxo de ar ao redor de um quebra-vento (COPPIN; RICHARDS, 2007).

As forças induzidas nas plantas pelo vento podem ser suficientes para criar perturbações nas camadas superiores de solo e, por conseguinte iniciar deslizamentos. A força exercida pelo vento normalmente só é significativa para velocidades superiores a 11 m/s (grau 6 da escala de Beaufort⁸). A pressão exercida pelo vento pode provocar efeitos instabilizantes em taludes, seja essa carga descendente ou ascendente. Um vento ascendente, se suficientemente forte pode causar tombamento da árvore por rotação e por isso transmitir momentos instabilizantes ao talude. A magnitude da força de resistência exercida pelas árvores depende de fatores como a velocidade do vento, altura da árvore, comprimento da copa e ângulo do talude.

Normalmente a pressão exercida pelo vento não exerce grande influência sobre a estabilidade dos taludes, e o efeito das vibrações causadas pela oscilação das árvores não é levado em consideração, mas pode ter importância no processo de instabilização. Se a árvore não estiver bem ancorada ao solo através do sistema radicular, o vento pode derrubá-la, criando uma fissura pelo levantamento das raízes, aumentando desta forma a infiltração de água no solo, diminuindo a resistência local da massa de solo ao escorregamento.

⁸ Escala empírica com 12 termos que classifica a intensidade do vento, e que tem em conta a sua velocidade e os efeitos resultantes no mar e em terra.

Atenuação do ruído (BENTRUP, 2008; COOK; HAVERBEKE, 1971; COPPIN; RICHARDS, 2007)

A vegetação afeta a taxa com que o som diminui com a distância, dependendo da quantidade de folhas e da frequência do som (ROBINETTE, 1972 apud COPPIN; RICHARDS, 2007). A atenuação do ruído resulta da combinação da deflexão, refração (dispersão) e da absorção da energia do som. As folhas absorvem o som de forma mais eficiente para frequências altas, para as quais os humanos são mais sensíveis. No caso de frequências baixas a médias, a redução do ruído é relativamente baixa, exceto para o caso de faixas largas de árvores.

Em princípio, as plantas mais eficientes na atenuação do ruído, deverão ter muitas folhas carnudas e espessas, com pecíolos finos, que permitem alto grau de flexibilidade e vibração, que conseqüentemente permite deflexão e refração do som. No entanto, na prática espécies arbóreas distintas, não aparentam diferir muito na sua capacidade de atenuar o ruído, embora as espécies perenifólias sejam melhores quando se pretende atenuar o ruído durante todo o ano.

2.4 Resistência ao cisalhamento (COPPIN; RICHARDS, 2007; HO; FREDLUND, 1982; MORGAN; RICKSON, 1995; O'LOUGHLIN; ZIEMER, 1982; WU, 2013)

A presença de plantas, principalmente pelo efeito das raízes, resulta num incremento global da resistência ao cisalhamento e, por conseguinte da competência da massa de solo. Este fator surge da combinação de efeitos como o reforço de solo através dos sistemas radiculares e da depleção da umidade de solo pela evapotranspiração. No entanto, deve ser realçado que a evapotranspiração é dependente de fatores climáticos e que a umidade no solo no Inverno pode atingir a capacidade de campo⁹.

⁹ Capacidade máxima do solo em reter água, acima da qual ocorrem perdas por percolação de água no perfil ou por escoamento superficial. Ocorre quando todos os microporos estão ocupados com água.

Como visto anteriormente, o reforço das raízes aumenta a coesão do solo, como um acréscimo c_r (Figura 10), enquanto que a depleção da umidade do solo reduz a pressão neutra e aumenta a sucção no solo. Quando a pressão neutra é baixa, o grau de contato entre partículas aumenta, tornando o solo mais resistente à deformação sobre ação de uma carga. Valores de sucção altos aumentam a atração entre partículas do solo através de efeitos residuais de capilaridade da água. Apesar dos efeitos de sucção também poderem ser considerados na redução da pressão neutra, esta situação só deve ser considerada para solos saturados. Em solos parcialmente saturados, o efeito da sucção na resistência ao cisalhamento, deverá ser expresso como um aumento através do valor de c_s (WALKER; FELL, 1987 apud COPPIN; RICHARDS, 2007).

A Equação 2, de Mohr-Coulomb (SOWERS, 1979) usada para descrever a resistência ao cisalhamento de solos saturados, pode ser modificada, de forma a considerar os efeitos da vegetação e para solos parcialmente saturados, como indicado de seguida:

$$S = c + \sigma_n \tan\phi \quad (\text{Equação 2})$$

Transforma-se em:

$$S = (c + c_R + c_S) + \sigma_n \tan\phi \quad (\text{Equação 3})$$

Em termos de tensão efetiva:

$$S = (c' + c'_R + c'_S) + \sigma'_n \tan\phi' \quad (\text{Equação 4})$$

Para solos parcialmente saturados:

$$S = (c' + c'_R) + (u_a - u) \tan\phi^b + (\sigma_n - u_a) \tan\phi' \quad (\text{Equação 5})$$

A contribuição da vegetação na época de crescimento ativo, na resistência ao cisalhamento, é normalmente mais significativa para condições de solo saturado.

Uma vez que a sucção (fator $u_a - u$) se aproxima de zero, à medida que a saturação é alcançada, em termos práticos este fator pode ser desprezado:

$$S = (c' + c'_R) + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' \quad (\text{Equação 6})$$

Onde: S - Resistência ao cisalhamento do solo; c - Coesão aparente do solo; c' - Coesão efetiva do solo; c_R - Contribuição das raízes à coesão do solo; c_s - Contribuição da sucção à coesão do solo; σ - Tensão normal; σ'_n - Tensão efetiva; ϕ - ângulo de atrito interno do solo; ϕ' - ângulo efetivo de atrito interno do solo; ϕ^b - ângulo de atrito interno do solo, referente a $(u_a - u)$, com $(\sigma - u_a)$ constante; u_a - pressão neutra do ar; u - pressão neutra da água; $(u_a - u)$ - sucção do solo.

Uma vez que a sucção do solo aumenta com a diminuição do tamanho dos poros e capilares, a sua contribuição para a coesão é maior para solos de granulometria fina. A sucção do solo induzida pelas plantas pode, portanto compensar a perda gradual de resistência do solo devido ao intemperismo.

2.5 Estabilidade de taludes (CECCONI et al., 2012; COPPIN; RICHARDS, 2007; GREENWOOD; NORRIS; WINT, 2004; MORGAN; RICKSON, 1995; NORRIS; GREENWOOD, 2006)

A estabilidade de um talude é avaliada através do fator de segurança (F), que pode ser definido pela relação entre a resistência do solo ao cisalhamento ao longo de uma superfície potencial de ruptura (forças resistentes) com a tensão de cisalhamento atuando nessa superfície (forças atuantes). A ruptura do solo ocorre quando essas forças se igualam. A análise da estabilidade pode ser feita através do método de talude infinito, considerando que um único elemento ou segmento no talude é representativo do conjunto (Figura 15).

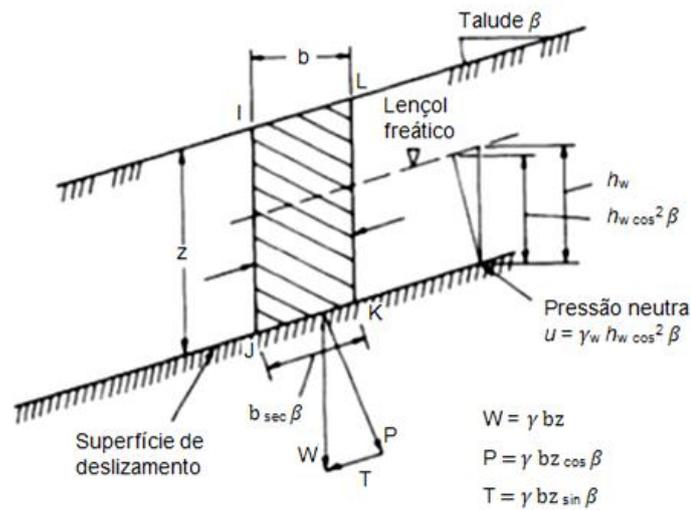


Figura 15 - Fatores considerados para análise de estabilidade de taludes, pelo método do talude infinito (MORGAN; RICKSON, 1995).

Utilizando a análise da tensão efetiva, o fator de segurança sem vegetação pode ser definido pela Equação 7.

$$F = \frac{c' + (\gamma z - \gamma_w h_w) \cos^2 \beta \tan \phi'}{\gamma z \sin \beta \cos \beta} \quad (\text{Equação 7})$$

A Figura 16 mostra a influência da vegetação na estabilidade de um segmento de talude. Esses fatores podem ser incluídos no cálculo do fator de segurança, como demonstrado na Equação 8.

$$F = \frac{(c' + c'_R) + \{[(\gamma z - \gamma_w h_w) + W] \cos^2 \beta + T \sin \theta\} \tan \phi' + T \cos \theta}{[(\gamma z + W) \sin \beta + D] \cos \beta} \quad (\text{Equação 8})$$

Onde: c' - Coesão efetiva do solo (kN/m^2); c'_R - Contribuição das raízes à coesão do solo (kN/m^2); γ - Peso específico do solo (kN/m^3); z - Altura de solo acima da superfície de deslizamento (m); γ_w - Peso específico da água ($=9.8 \text{ kN/m}^3$); h_w - Altura de água acima da superfície de deslizamento (m); W - Sobrecarga devido ao peso da vegetação (kN/m); β - Ângulo de inclinação do talude ($^\circ$); T - Força de tração das raízes atuando na base da superfície de deslizamento (kN/m); θ - Ângulo

entre as raízes e superfície de deslizamento ($^{\circ}$); ϕ' - Ângulo efetivo de atrito interno do solo ($^{\circ}$); D - Carga do vento paralela ao talude (kN/m).

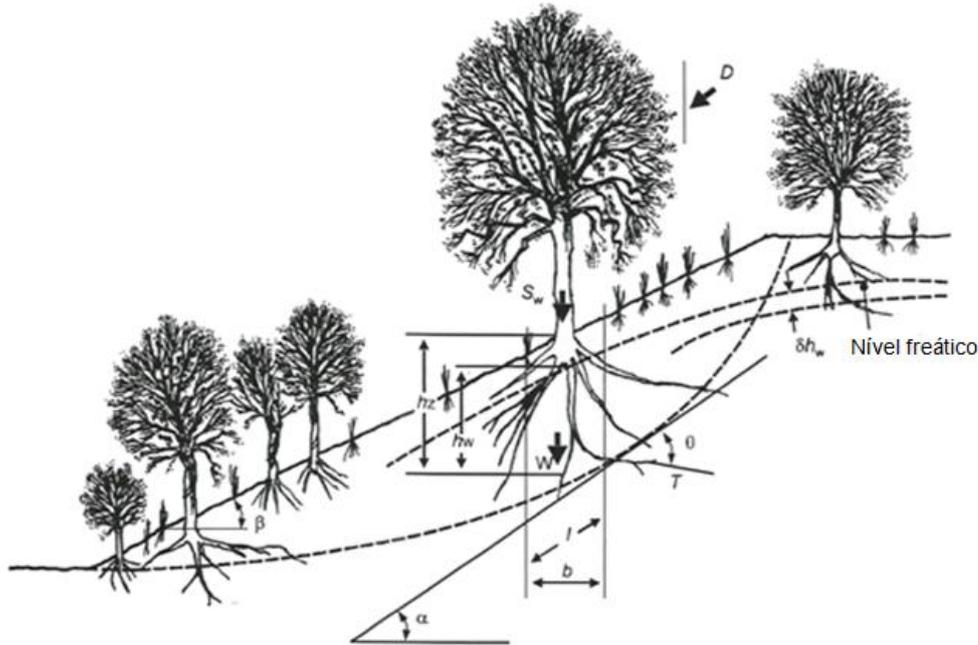


Figura 16 - Fatores de maior influência da vegetação na estabilidade de taludes (COPPIN; RICHARDS, 2007).

Paramêtros aplicados na análise de estabilidade de solos:

Efeitos devido à vegetação

W - Peso total da fatia de solo (kN/m);

c' , ϕ' - Paramêtros de tensão efetiva na superfície de deslizamento;

l - Comprimento da superfície de deslizamento (m);

u - Pressão neutra da água na superfície de deslizamento ($\gamma_w h_w$) (kN/m²);

u_v - Diminuição da pressão neutra da água causada pela evapotranspiração pela vegetação na superfície de deslizamento (kN/m²);

c'_R - Contribuição das raízes à coesão do solo (kN/m²);

c'_S - Contribuição da sucção à coesão do solo (kN/m²);

S_w - Sobrecarga devido ao peso da vegetação (kN/m);

D - Carga do vento paralela ao talude (kN/m);

T - Força de tração das raízes atuando na base da superfície de deslizamento (kN/m), com ângulo entre as raízes e superfície de deslizamento θ ;

h_w - Altura de água acima da superfície de deslizamento (m);

- h_z - Altura de solo acima da superfície de deslizamento (m);
 β - Ângulo de inclinação do talude ($^\circ$);
 α - Ângulo efetivo de atrito interno do solo ($^\circ$).

Notas:

1. Os valores de muitos destes parâmetros variam com a profundidade e tipo de solo.
2. Em algumas análises de estabilidade de solos a diminuição da pressão neutra devido à vegetação (ou seja, aumento da sucção do solo devido à evapotranspiração) é expressa como uma coesão efetiva melhorada, distinta da redução da pressão neutra.

2.6 Consequência da remoção da vegetação (BISHOP; STEVENS, 1964; COPPIN; RICHARDS, 2007; FIORI; CARMIGNANI, 2011; GRAY; MEGAHAN, 1981; GRAY; LEISER, 1982; GRAY; SOTIR, 1996; WU, 1976; WU; MCKINNEL; SWANSTON, 1979)

Além de todas as propriedades e funções abordadas anteriormente, podemos verificar e resumir a importância das plantas pela demonstração dos efeitos da sua remoção.

Uma vez que as plantas que crescem nos taludes reforçam os solos e melhoram a sua estabilidade, a sua remoção enfraquece o solo e instabiliza os taludes. No ano seguinte à remoção de toda a cobertura vegetal de uma floresta, a erosão no solo e os movimentos de massa aumentam dramaticamente, por causa da remoção desta cobertura de proteção superficial. O crescimento de uma nova cobertura vegetal faz com que as taxas de erosão diminuam nos anos seguintes. No entanto, esta tendência vai ser afetada 5 a 7 anos mais tarde, por uma rápida perda de solo, devido à sua ruptura, uma vez que os sistemas radiculares das plantas antigas entram em decomposição.

Num estudo desenvolvido por Wu (1976), foram calculados os fatores de segurança contra o deslizamento de taludes vegetados e de taludes adjacentes onde a vegetação foi removida. Os últimos apresentaram fatores de segurança mais baixos, sendo que eram menos estáveis, devido à perda de resistência dada pelas raízes e níveis piezométricos altos.

Normalmente a altura do nível freático em taludes com vegetação, acima do plano potencial de ruptura, é mais baixo, do que em áreas desmatadas, contribuindo para o aumento do fator de segurança em taludes florestados.

A remoção da vegetação pode também provocar o efeito de selamento superficial do solo, ou seja, a formação de uma camada superficial impermeável, que ocorre pela oclusão dos poros do solo por partículas finas desagregadas e mobilizadas pelo impacto das gotas de chuva. Este fenômeno impede a infiltração e consequentemente a desagregação e transporte de grandes quantidades de solo.

Estas situações demonstram que as plantas existentes no solo desempenham um papel importante do ponto de vista da engenharia. Os efeitos das plantas do ponto de vista da engenharia devem ser considerados, não apenas para novos projetos, mas também para políticas ao nível da gestão de áreas vegetadas.

2.7 Resumo das propriedades e funções mais importantes das plantas (COPPIN; RICHARDS, 2007; MORGAN; RICKSON, 1995)

A função global das plantas é o resultado do equilíbrio entre diversas funções e efeitos benéficos e adversos. Podemos resumir e compilar as funções das plantas revistas anteriormente no Quadro 1. A natureza do equilíbrio e, por conseguinte as funções de engenharia que cada planta individualmente desempenha irão depender da sua estrutura e arquitetura. As propriedades das plantas, que definem a sua função como um material da engenharia são resumidas no Quadro 2. Muitas destas propriedades são sazonais e mudam com a fase de crescimento, sendo ainda dependentes do tipo de espécie.

Quadro 1 - Resumo dos efeitos benéficos e adversos das plantas (COPPIN; RICHARDS, 2007).

| Efeitos Hidrológicos | Efeitos Mecânicos |
|---|---|
| <p>As copas interceptam a precipitação causando:</p> <p>Retenção e evaporação de parte do volume de água, reduzindo a precipitação disponível para a infiltração; B</p> <p>Redução da energia cinética das gotas da chuva e em consequência a erosão; B</p> <p>Aumento do tamanho das gotas através do gotejamento pelas folhas, o que resulta num aumento localizado da intensidade de precipitação. A</p> <p>Caules e folhas interagem com o fluxo de água na superfície do solo, resultando em:</p> <p>Maior armazenamento e maior volume de água para infiltração; A/B</p> <p>Maior rugosidade no fluxo de água e ar, reduzindo a sua velocidade, no entanto; B</p> <p>Vegetação em tufos, pode causar maior erosão localizada, concentração do fluxo de água e aumento da velocidade. A</p> <p>Raízes penetram o solo, causando:</p> <p>Abertura de fissuras na superfície e aumento da infiltração; A</p> <p>Diminuição da umidade do solo através da evapotranspiração, reduzindo a pressão neutra e aumentando a sucção do solo, aumentando a resistência do solo; B</p> <p>Aumento do tamanho de fendas de tração, resultando em acréscimo da infiltração. A</p> | <p>As raízes agregam as partículas do solo resultando em:</p> <p>Contenção dos movimentos de solo, redução da erodabilidade; B</p> <p>Aumento da resistência ao cisalhamento através de uma matriz de fibras vivas; B</p> <p>Criação de um efeito de malha através das raízes superficiais que contêm os estratos de solo. B</p> <p>As raízes penetram estratos profundos, dando:</p> <p>Ancoragem em estratos firmes, ligando o solo superficial ao subsolo estável ou à rocha firme; B</p> <p>Suporte ao solo superficial através do efeito de escoramento e arqueamento. B</p> <p>Alto crescimento das árvores, de modo que:</p> <p>O seu peso pode causar sobrecarga no talude, aumentando as componentes da força normal e tangencial; A/B</p> <p>Quando expostas ao vento, forças dinâmicas são transmitidas para o talude. A</p> <p>Caules e folhas cobrem a superfície do solo, de modo que:</p> <p>Impacto do tráfego é absorvido, protegendo a superfície do solo de danos; B</p> <p>As copas são flexionadas, para altas velocidades de fluxo, cobrindo o solo protegendo-o da erosão. B</p> |
| <p>A – Efeito adverso (contrário à estabilidade)</p> | |
| <p>B – Efeito benéfico (a favor da estabilidade)</p> | |

Quadro 2 - Resumo das propriedades mais importantes das plantas e seu significado para as funções de engenharia (COPPIN; RICHARDS, 2007).

| Plantas | | Propriedades das Plantas | | | | | | | | | |
|-------------------------------|--|--------------------------|--------|---------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------------|---------------------|------------------|--------------------|-------------------------|
| | | Cobertura do solo (%) | Altura | Forma /comprimento folhas | Densidade caules/folhas | Robustez caules/folhas | Flexibilidade caules/folhas | Profundidade raízes | Densidade raízes | Resistência raízes | Ciclo anual crescimento |
| Efeitos | Influência | | | | | | | | | | |
| Competência superficial | Desagregação do solo | • | • | • | • | | | | | | • |
| | Resistência mecânica | • | • | | • | • | | • | • | • | • |
| | Insulação | • | | | • | | | | | | • |
| | Retardamento/retenção | | • | | • | • | • | | | | |
| | Erosão | • | | | • | | | | | | • |
| Regime de águas superficiais | Interceptação da precipitação | • | | • | • | | | | | | |
| | Escoamento superficial | • | | | • | | | | | | |
| | Infiltração | | | | • | | | • | • | | |
| | Drenagem subsuperficial | | | | | | | • | • | | |
| | Resistência superficial | • | • | • | • | | • | | | | • |
| Água no solo | Evapotranspiração | | | • | • | | | | • | | • |
| | Depleção da umidade no solo conduz a aumento da sucção, redução da pressão neutra e peso do solo | | | | | | | • | | | • |
| | | | | | | | | | | | |
| Propriedades da massa de solo | Reforço das raízes | | | | | | | • | • | • | • |
| | Ancoragem/contenção | | | | | | | • | • | • | |
| | Arqueamento/escoramento | | | | | | | • | | • | |
| | Manta superficial | | | | | | | | • | • | • |
| | Sobrecarga | | • | | | | | | | | • |
| | Carga do vento | | • | | • | • | | • | | • | • |
| | Efeito de cunha das raízes | | | | | | | • | • | | |
| Fluxo do ar | Resistência superficial | • | • | • | | • | | | | | • |
| | Deflexão do fluxo | • | | • | • | • | | | | | • |
| | Atenuação do ruído | • | • | • | | | | | | | • |
| | Partículas suspensas | • | | • | | | | | | | • |

2.8 Propriedades biotécnicas

Na bibliografia existente o tema referente às propriedades biotécnicas das plantas não está estruturado de forma organizada e padronizada. Vários autores definem, organizam e enumeram as características biotécnicas de maneiras distintas, como se pode verificar a seguir.

Segundo Durlo e Sutili (2014), algumas espécies vegetais apresentam características que podem ser utilizadas para controlar tecnicamente alguns processos instabilizadores que ocorrem em sistemas fluviais, como erosões, movimentos de massa e transporte de sedimentos. Os autores também enumeram algumas características que as plantas devem apresentar para solucionar um problema técnico, dependendo da situação sem, no entanto, apresentarem uma definição clara de propriedades biotécnicas.

Sutili et al. (2004) afirmam que como características biotécnicas adequadas entende-se: a possibilidade de reprodução vegetativa, a capacidade de suportar condições extremas (como a submersão por períodos relativamente longos, o aterramento e a exposição parcial de suas raízes), enraizamento denso, forte e profundo, entre outras.

Venti et al. (2003), Sauli e Cornelini (2005), Cornelini e Ferrari (2008), Abate e Grotta (2009), definem propriedades ou características biotécnicas como o conjunto de propriedades técnicas e biológicas que algumas espécies vegetais apresentam e que são essenciais para o sucesso das intervenções de Engenharia Natural. Como propriedades técnicas os autores citam como exemplos ações do tipo mecânico e hidrológico (por exemplo, melhoramento dos parâmetros geotécnicos, regulação do balanço hídrico do solo, entre outros). Como propriedades biológicas são citadas a capacidade de propagação vegetativa, a capacidade de produzir raízes adventícias a partir de fustes enterrados (resistência ao soterramento parcial) e a resistência à submersão por períodos prolongados.

Para estes autores, plantas com elevada valência biotécnica devem possuir capacidade de consolidar o solo (característica proveniente da forma e densidade das raízes) e resistência do sistema radicular (resistência das raízes aos esforços de tração e de corte).

De Antonis e Molinari (2007) afirmam que características biotécnicas são as propriedades físico-biológicas de determinadas espécies vegetais, que dão preferência à sua utilização na Engenharia Natural, especificamente aquelas que apresentam desenvolvimento mais rápido e com sistemas radiculares extensos e profundos. Como exemplos são apresentados, a capacidade de resistir a movimentos de massa e erosão, capacidade de agregar e consolidar superficialmente o solo com o desenvolvimento das raízes, capacidade das raízes resistirem ao arranquio e corte e capacidade de drenar o solo através da absorção e transpiração da água.

Para Menegazzi e Palmieri (2013) a Engenharia Natural se baseia essencialmente nas características biotécnicas de algumas espécies vegetais utilizadas, características essas que podem ser resumidas na aptidão das plantas para desenvolver um considerável sistema radicular, e na elevada capacidade e velocidade de propagação vegetativa.

Estas qualidades permitem uma ação eficaz de retenção das partículas de solo e uma maior velocidade e amplitude de recolonização vegetal de ambientes degradados. Os autores ainda referem que são raras as informações sobre as características biotécnicas do material vegetal, considerando esta situação como uma problemática existente na Engenharia Natural.

Abate e Grotta (2009), resumem que as características biotécnicas se manifestam na capacidade de resistência a determinadas solicitações mecânicas que existem no solo, na água ou na superfície. Esses autores afirmam também que a resistência aos movimentos de massa, ao soterramento, ao apedrejamento, à erosão, à abrasão pela chuva e neve, entre outros, causam modificações morfológicas específicas na vegetação, denominadas como mecanomorfológicas.

Estas modificações na "forma" visível, geralmente nos ramos, fuste e nas raízes das plantas, representam traços e indícios a considerar nos estudos biotécnicos.

Na escolha das plantas a utilizar em Engenharia Natural, além das propriedades biotécnicas, devem ser considerados critérios ecológicos, fitossociológicos e reprodutivos (DURLO; SUTILI, 2014).

Deve ser dada preferência a espécies autóctones, que estão mais adaptadas às condições edafo-climáticas do local (ABATE; GROTTA, 2009; BENTRUP; HOAG, 1998; CORNELINI; FEDERICO; PIRRERA, 2008; CORNELINI; FERRARI, 2008; GRAY; LEISER, 1982; HOAG; SHORT; GREEN, 1992; MENEGAZZI; PALMERI, 2013; MORGAN; RICKSON, 1995; SAULI; CORNELINI, 2005; SCHIECHTL; STERN, 1996; VENTI et al., 2003).

3. MATERIAIS CONSTRUTIVOS EM ENGENHARIA CIVIL E ENGENHARIA NATURAL

Aos materiais e sistemas construtivos utilizados em obras de engenharia, são feitas exigências para garantir o seu desempenho. Deste modo, para que um material seja escolhido para aplicação devem ser conhecidas as suas propriedades, e para que um sistema seja selecionado como solução construtiva deve ser conhecido o seu comportamento face a todas as solicitações. Estes fatores são especialmente importantes quando nos referimos a obras de infraestrutura, como o caso de processos erosivos e perda de estabilidade em taludes de rodovias, dutovias, ferrovias, taludes fluviais, taludes de barragens, entre outros. Isso se deve ao fato que obras de infraestrutura têm maior responsabilidade técnica, possuem riscos associados mais elevados e devem responder a um conjunto de exigências legais de maiores consequências de caráter técnico, econômico e ambiental. Face a isso deve-se ter maior conhecimento dos materiais construtivos e como eles se comportam no sistema construtivo adotado.

Os materiais construtivos vivos, tecnicamente não diferem de outros materiais tradicionais de engenharia, e devem ser selecionados de acordo com os objetivos que se pretendem alcançar com a intervenção (GRAY; SOTIR, 1996). Uma vez que se pretendem analisar as plantas do ponto de vista de material construtivo na Engenharia, é essencial abordar a forma como a Engenharia Civil trata um material construtivo, desde a sua caracterização, especificações técnicas, controle de qualidade e avaliação de desempenho.

Desta forma podemos estabelecer um paralelo entre características de materiais construtivos tradicionais inertes e materiais construtivos vivos (plantas), uma vez que as necessidades técnicas para aplicação em obras de infraestrutura são equivalentes (Figura 17). As características morfo-mecânicas que são inerentes ao material vegetal estão para as propriedades biotécnicas, como as de um material construtivo tradicional (peso específico, módulo de elasticidade, entre outras) estão para as propriedades de engenharia (resistência, rigidez, entre outras) (SUTILI; GAVASSONI, 2012).

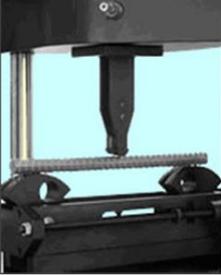
| Material Vivo | Propriedades Morfo-Mecânicas | Propriedade Biotécnica | Aplicação na Estabilização de Solos |
|--|---|--|---|
|  | <p>Arquitetura, profundidade e resistência à tração do sistema radicular, flexibilidade das copas, etc.</p> |  |  |
| Material Inerte | Propriedades do Material | Propriedade de Engenharia | Aplicação na Estabilização de Solos |
|  | <p>Módulo de elasticidade, resistência à tração, tenacidade, etc</p> |  |  |

Figura 17 - Relação entre as propriedades dos materiais construtivos tradicionais inertes e vivos.

Por exemplo, um material inerte (manufaturado) como o aço pode ter baixo teor em carbono que lhe confere propriedades como alta tenacidade e ductilidade¹⁰, que lhe dá mais capacidade de tolerar a deformação, mas no entanto baixa resistência e dureza. Um material vivo (não manufaturado) pode apresentar abundância de fibras gelatinosas no seu lenho que lhe confere propriedades como alta flexibilidade e capacidade de tolerar a deformação.

Tal como a Engenharia Civil procura e/ou manufatura materiais inertes com características que resultam em propriedades de engenharia adequadas às necessidades construtivas das obras, devemos procurar na natureza materiais vivos que apresentem características morfológicas, fisiológicas e ecológicas que resultem em propriedades biotécnicas ajustadas às exigências construtivas.

Segundo Carvalho (2009), diante das necessidades do engenheiro, relativamente à escolha dos materiais construtivos inertes, esta deve seguir critérios como: escolher

¹⁰ Tenacidade é a capacidade que um material tem para absorver energia mecânica, nos campos plástico e elástico. A ductilidade é a propriedade do material sofrer deformação permanente sem romper.

o material mais adequado para a materialização de um dado tipo de construção levando em conta segurança, economia e durabilidade; e como pré-requisito à escolha, conhecer suas propriedades, isoladamente ou associados, o que exigirá ensaios em laboratório. O mesmo autor ainda afirma que os materiais construtivos devem satisfazer um conjunto de condições para uma determinada obra, conforme apresentado no Quadro 3.

Quadro 3 - Condições e requisitos a que devem satisfazer os materiais construtivos inertes (adaptado de CARVALHO, 2009).

| Condições | Requisitos |
|--|---|
| Condições Técnicas (Qualidade) | Resistência Trabalhabilidade Durabilidade Higiene (Proteção à saúde) |
| Condições Econômicas (Custos) | Fabricação Transporte Aplicação Conservação |
| Condições Estéticas (Aparência geral) | Cor Forma |

Assim, um material construtivo, seja ele inerte ou vivo, que não cumpra as condições técnicas, como por exemplo, durabilidade ou resistência, pode até ter baixo custo, mas não será viável para uma obra uma vez que não cumpre todas as condições. Ou seja, um material só poderá ser considerado satisfatório para uma obra de engenharia se obedecer a todas as condições, traduzindo um equilíbrio entre todos os requisitos. Alterações em qualquer dos requisitos, para mais ou para menos, trará reflexos negativos, seja nas condições técnicas, nas econômicas ou nas estéticas.

Juntamente com a lista de materiais construtivos inertes deverão ser elaboradas especificações técnicas. Estas especificações estabelecem normas gerais e específicas, destinada a fixar as características, condições ou requisitos exigíveis

para elementos construtivos de uma obra, consistindo numa indicação minuciosa das propriedades que os materiais devem apresentar, bem como a técnica a ser empregada na construção (CARVALHO, 2009; TISAKA, 2011).

Uma vez que o desenvolvimento de vegetação numa intervenção depende de condicionantes ambientais, ecológicas e edafo-climáticas, a elaboração de uma especificação técnica adequada é essencial, pois a mesma irá definir quais as características, requisitos e condições de uso do material construtivo vivo.

A existência de especificações técnicas claras também permite avaliar a conformidade dos produtos e o controle de qualidade dos produtos especificados em fase de projeto. A qualidade de materiais construtivos tradicionais pode ser controlada desde a fase de sua produção até o seu recebimento, armazenamento e aplicação em obra. No caso de materiais vivos devem ser seguidas as mesmas indicações para controle de qualidade. Apesar dos materiais vivos não serem manufaturados em fábrica de forma padronizada, a sua coleta e preparação deve seguir regras bem definidas de forma a não comprometer a sua viabilidade técnica. Em obra, o recebimento deve seguir critérios de aceitação ou rejeição de forma a assegurar que os materiais entregues atendam os requisitos especificados, e o armazenamento deve seguir as orientações previstas para a estocagem. Na fase de aplicação em obra devem ser seguidos critérios de manuseio adequado às características do material. No caso de material vivo o manuseio correto é essencial, para não comprometer a viabilidade do material vegetal e conseqüentemente o sucesso da intervenção, que depende maioritariamente do bom enraizamento e desenvolvimento das plantas.

A avaliação de desempenho é parte integrante na análise do comportamento de um material construtivo durante o seu processamento, por forma a avaliar que o produto está em conformidade com os requisitos de desempenho do mesmo. A avaliação de desempenho também verifica se o material tem duração compatível com a vida útil da obra, bem como o grau de deterioração ao longo do tempo. Para tal é importante recorrer ao uso de monitoramento das intervenções principalmente para obras de infraestrutura. Monitoramento pode ser definido como a sequência de observações e mensurações sistemáticas devidamente registradas e acompanhadas de avaliação (NERY, 2013). O monitoramento estrutural também é importante para avaliar o comportamento dos materiais construtivos sujeitos a solicitação, e segundo Nery

(2013), consiste na observação e avaliação dos parâmetros relativos à condição e desempenho da estrutura, com o intuito de fornecer de forma precisa e ágil a situação na qual a estrutura se encontra, e pode ser considerado como uma ferramenta para aumentar a segurança, durabilidade e otimização de manutenção de estruturas.

Devem ser seguidos procedimentos semelhantes para avaliação de desempenho do comportamento do material construtivo vivo, seja durante a sua produção e preparação, bem como ao nível da sua performance em obra. Enquanto no caso de materiais inertes esse desempenho é avaliado com recurso a sensores, no caso das plantas deverá ser feita através de levantamento e medições de parâmetros das espécies usadas na intervenção, como por exemplo, taxa de mortalidade e sobrevivência, sanidade (alterações fisiológicas causadas por pragas, deficiência hídrica ou nutricional) e desenvolvimento da parte aérea (altura, ramificações, brotos, etc).

Os materiais construtivos vivos quando comparados com os inertes podem apresentar vantagens e desvantagens (Quadro 4), destacando-se, por exemplo, vantagens como a eficiência técnica a curto prazo, funcionalidade crescente, capacidade de regeneração (FERNANDES; FREITAS, 2011; LEWIS, 2000; MENEGAZZI; PALMERI, 2013; VENTI et al., 2003). Uma intervenção adequadamente dimensionada, constituída apenas por materiais construtivos inertes, pode apresentar eficiência técnica imediata para solucionar um problema específico, enquanto que materiais construtivos vivos demoram mais tempo a alcançar eficiência técnica. No entanto, a longo prazo os materiais vivos não são afetados por processos de degradação e têm capacidade de se regenerar, ao contrário de materiais inertes que sofrem degradação e não conseguem regenerar-se. Uma solução adequada para resolver um problema específico pode passar pela combinação de materiais construtivos inertes e vivos de forma a atender critérios técnicos, econômicos e de segurança.

Quadro 4 - Vantagens e desvantagens dos materiais construtivos vivos comparados com os inertes
(FERNANDES; FREITAS, 2011).

| MATERIAIS VIVOS | | MATERIAIS INERTES | |
|---|--|---|---|
| VANTAGENS | DESVANTAGENS | VANTAGENS | DESVANTAGENS |
| Não são afetados por processos de degradação, promovendo uma estabilização crescente e possuem uma capacidade regenerativa intrínseca. | As exigências de consolidação e segurança requeridas não são preenchidas em todas as situações. | Poderão ser mais estáveis. | Tendem a perder a sua eficiência devido à corrosão e degradação e não possuem capacidade de auto-regeneração. |
| Preenchem a sua função protetora de modo elástico, absorvendo os elementos e ações agressivas, diminuindo ou anulando a sua intensidade. | Exige uma aplicação adaptada e dependente das características do local, não sendo também passível de utilização construtiva em qualquer altura do ano. | São independentes das características do local e sua aplicação não é limitada temporalmente. | Funcionam como estruturas construtivas rígidas ou pouco deformáveis em relação aos agentes agressivos. |
| Biológica e ecologicamente funcionais. | Só atinge a sua eficiência técnica plena após certo intervalo de tempo. | Atingem a sua eficiência técnica imediatamente. | Não têm qualquer função biológica ou ecológica. |
| Possibilitam e conduzem a uma valorização estética e paisagística, com o enquadramento da construção no espaço natural. | | | Constituem, normalmente, elementos estranhos na paisagem. |

Podemos relacionar de forma conceitual a eficiência ao longo do tempo de uma intervenção tradicional com intervenções que recorram apenas à utilização de plantas, e com uma intervenção combinada de Engenharia Natural, como podemos observar na Figura 18.

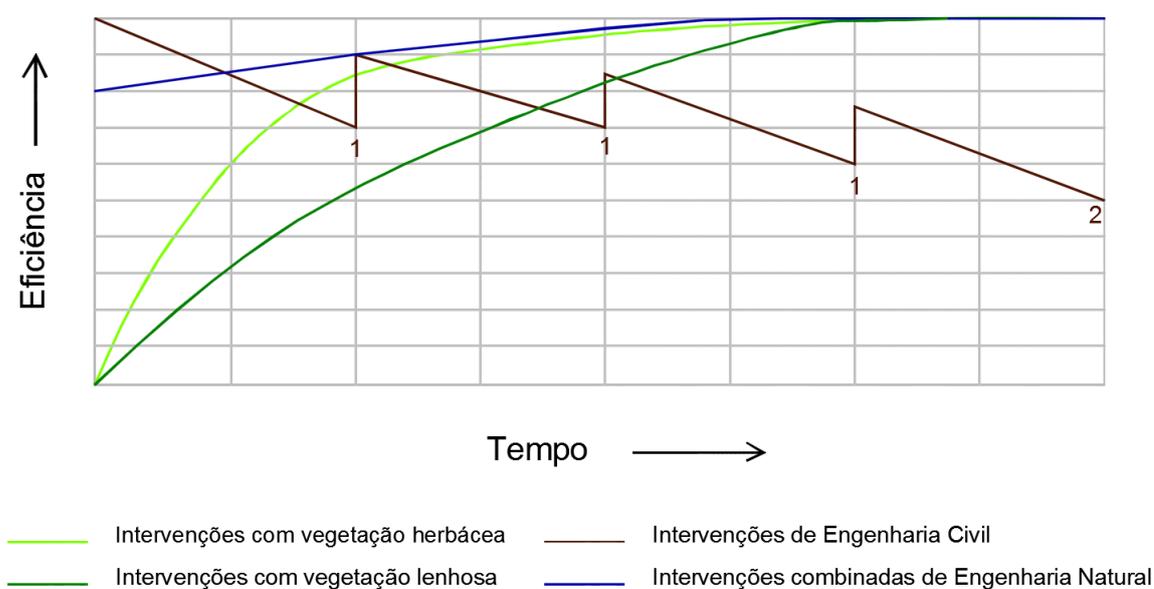


Figura 18 - Evolução conceitual no tempo da eficiência técnico-ecológica de uma intervenção de Engenharia Natural comparada com uma intervenção tradicional (adaptado de RAUCH, 2014).

De acordo com o gráfico conceitual apresentado na Figura 18, podemos verificar que uma intervenção de proteção superficial com espécies herbáceas e gramíneas, depende do desenvolvimento da vegetação, e por isso tem uma eficiência nula após sua implantação, que é crescente com o passar do tempo. Após determinado período ela atinge eficácia máxima e mantém-se constante, devendo-se ter em consideração que as solicitações e exigências técnicas da intervenção são baixas, pois o objetivo é apenas controlar a erosão superficial.

No caso de uma intervenção que utiliza apenas material vegetal lenhoso, como arbustos e árvores, esta também depende do desenvolvimento das plantas, e por isso tem uma eficiência nula após sua implantação, que é crescente com o passar do tempo. Quando comparada com a intervenção com vegetação herbácea o seu desenvolvimento é mais lento, pois espécies lenhosas demoram mais tempo a crescer, no entanto as solicitações e exigências técnicas suportadas pela intervenção são maiores.

No caso de obras de Engenharia Civil ou Engenharia Natural estas devem responder a mais exigências técnicas, sendo por isso projetadas para atender a

maiores solicitações que intervenções que apenas recorram à utilização de vegetação, como no caso das primeiras duas.

Uma obra de Engenharia Civil, imediatamente após a sua conclusão apresenta eficiência máxima. No entanto, ao longo do tempo essa eficiência vai diminuindo devido à degradação da própria estrutura, e a obra requer medidas de manutenção para reparação (1). Após manutenção, a eficiência da obra volta a subir, porém não atinge o valor máximo e ao longo do tempo os valores de eficiência mesmo após manutenção são cada vez menores. Após um período de tempo a obra necessita de ser reconstruída (2), pois as medidas de manutenção já não são suficientes para atender às exigências técnicas para qual a obra foi projetada.

No caso de intervenções de Engenharia Natural que combinem plantas com materiais inertes, após execução elas apresentam uma eficiência menor que obras tradicionais de engenharia, no entanto essa eficiência é sempre crescente com o passar do tempo, até atingir o seu máximo. Após um determinado período de tempo os materiais inertes que suportam algumas estruturas, como a madeira, começam a apodrecer e a degradar-se, no entanto, o efeito de suporte e de estabilização é substituído por um adequado desenvolvimento dos sistemas radiculares e aéreos da vegetação.

Esta característica faz com que as intervenções de Engenharia Natural resultem em sistemas vivos que continuarão a desenvolver-se e a manter o seu equilíbrio dinâmico através dos processos de sucessão natural, ou seja, autocontrole dinâmico, sem inputs artificiais de energia. Se forem utilizados os adequados materiais e sistemas construtivos vivos e inertes, atingir-se-á uma elevada capacidade de resistência a tensões externas, sem esforços muito elevados e dispendiosos de manutenção.

No entanto, a utilização de plantas como material construtivo apresenta algumas desvantagens, uma vez que são escassas as informações sobre a escolha de material que seja adequado tecnicamente. Uma vez que as características técnicas das plantas carecem de mais estudos e ainda não se encontram quantificadas, os parâmetros de projeto são menos precisos e os procedimentos construtivos ainda não estão padronizados. Como visto anteriormente, a eficácia das estruturas depende do desenvolvimento da vegetação e por isso necessita de mais tempo para atingir a plena funcionalidade. Decorrente da utilização das plantas advém uma

necessidade de monitoramento e manutenção (se necessário) das obras por um determinado período estabelecido em projeto sendo, no entanto, de intensidade decrescente com o passar do tempo.

Devido à utilização de material construtivo vivo existem alguns limites de aplicação da Engenharia Natural que estão fundamentalmente ligados aos aspectos biológicos, técnicos e temporais das plantas (MENEGAZZI; PALMERI, 2013; SCHIECHTL; STERN, 1996, 1997; VENTI et al., 2003):

- Limites Biológicos - Localização inadequada para determinadas espécies de plantas, limites de distribuição, poluição excessiva e outros tipos de condições que possam restringir a germinação, enraizamento e o desenvolvimento da vegetação;
- Limites Técnicos - A estabilização de solos só é possível em substratos que permitam o enraizamento e crescimento do sistema radicular. Movimentos de massa mais profundos podem ser evitados apenas de forma indireta pela Engenharia Natural, através da diminuição da quantidade de água no solo pela evapotranspiração e interceptação gerada por uma densa cobertura de plantas. Em âmbito fluvial, são determinantes a velocidade de fluxo, forças de tração e turbulência excessivas;
- Limites Temporais - Sazonalidade das intervenções. Ou seja, os trabalhos construtivos que impliquem a introdução de plantas devem ser realizados nas estações em que a mesma se encontra no estado vegetativo adequado (período de repouso vegetativo), e também quando as características climáticas locais são favoráveis ao enraizamento das plantas.

Os materiais construtivos considerados do ponto de vista da Engenharia, sejam eles inertes ou vivos, devem atender a um conjunto condições técnicas, econômicas e estéticas de forma a cumprir as exigências de uma obra de infraestrutura.

Para atender aos requisitos de responsabilidade desse tipo de intervenção os materiais construtivos devem ser detalhadamente estudados, desde a sua

caracterização, especificações técnicas, controle de qualidade e avaliação de desempenho.

Os materiais construtivos vivos apresentam algumas condicionantes quando comparados com os materiais inertes e de acordo com isso apenas em parte podem substituir os materiais tradicionais, sempre nas condições ambientais, biológicas, e técnicas adequadas.

4. PROPOSTA METODOLÓGICA PARA ESPECIFICAÇÃO DE PLANTAS COMO MATERIAL CONSTRUTIVO EM PROJETOS E OBRAS DE INFRAESTRUTURA

Neste capítulo, que trata as plantas do ponto de vista de material construtivo, serão estruturados e definidos conceitos numa sequência lógica que culminará na elaboração de um procedimento de especificação técnica para material construtivo vivo, que poderá ser utilizado em projetos e obras de infraestrutura que recorram à utilização da Engenharia Natural.

Obras de infraestrutura requerem mais rigor técnico, com maiores responsabilidades e riscos associados desde o projeto de engenharia, à execução da construção, ao fornecimento de materiais e equipamentos. A sua implantação requer maior planejamento, associado à vida útil da intervenção. Com a crescente utilização da Engenharia Natural como disciplina técnica para solucionar problemas de instabilidade geotécnica ou hidráulica e erosão superficial em obras de infraestrutura surge a demanda de atribuição de maior rigor técnico à componente estrutural desempenhada pelas plantas, de forma a atender aos requisitos de uma intervenção de maior responsabilidade.

Para atender a essa exigência as plantas devem ser entendidas como um material construtivo vivo, em que devem ser utilizados critérios e procedimentos técnicos para a sua especificação, tal como se faz para os materiais construtivos utilizados na Engenharia Civil.

Para se desenvolver um procedimento de especificação técnica para material construtivo vivo, surge primeiramente a necessidade de classificar, estruturar e definir alguns conceitos como funções, ações, efeitos, propriedades, entre outros, que na bibliografia especializada, revista em seus temas principais no capítulo 2, não se encontram definidos e estruturados de forma racional.

4.1 Classificação e estruturação das funções das plantas

A Engenharia Natural, utilizando-se das plantas como material construtivo vivo apresenta várias funções técnicas (hidrológicas e mecânicas) e funções adicionais que podem ser ecológico-ambientais, estéticas e socio-econômicas.

Quadro 5 - Proposta de classificação e estruturação de funções técnicas e adicionais

| FUNÇÕES TÉCNICAS | | FUNÇÕES ADICIONAIS |
|--|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> – HIDROLÓGICA: • Interceptar • Evapotranspirar • Infiltrar • Drenar | <ul style="list-style-type: none"> – MECÂNICA: • Estruturar • Absorver • Encaminhar | <ul style="list-style-type: none"> – ECOLÓGICA - AMBIENTAL – ESTÉTICA – SÓCIO - ECONÔMICA |

Considerando esta abordagem apresenta-se em seguida uma nova proposta de classificação e estruturação destas funções conforme representado no Quadro 5.

4.1.1 Funções técnicas das plantas

As funções técnicas desempenhadas pelas plantas podem ser hidrológicas e/ou mecânicas, como indicado por diversos autores (ABATE; GROTTA, 2009; COPPIN; RICHARDS, 2007; MENEGAZZI; PALMERI, 2013; MORGAN; RICKSON, 1995; RAUCH, 2008; SAULI; CORNELINI, 2005). Apesar desta divisão ser bastante clara, é evidente após pesquisa bibliográfica que nem todas as funções técnicas indicadas são de fato funções, e muitas vezes são confundidas e misturadas com ações e efeitos técnicos.

Desta forma verifica-se a necessidade de esclarecer e definir adequadamente o que são funções, ações e efeitos, considerados do ponto de vista técnico. São propostas as seguintes definições:

- Função técnica da vegetação - Atividade ou conjunto de atividades técnicas desempenhadas através da utilização de uma planta ou conjunto de plantas num ecossistema ou local, que resultam numa ação ou conjunto de ações que determinam um efeito técnico;
- Ação - Manifestação de um agente; forma de proceder ou atuar. A utilização de plantas causa funções técnicas que atuam especificamente alcançando um determinado efeito;
- Efeito técnico - Resultado, produto ou consequência. Não há efeito sem ação. Os efeitos técnicos positivos ou negativos das plantas são o aumento/redução na resistência do solo e a redução/aumento na solicitação sobre o solo.

Com base nas definições propostas, as funções técnicas das plantas foram classificadas do ponto de vista hidrológico e mecânico.

Hidrologicamente as plantas modificam o balanço e distribuição de água na hidrosfera (água superficial e subterrânea) e na atmosfera. A vegetação tem um papel fundamental no ciclo hidrológico, uma vez que parte da água proveniente da precipitação é interceptada e absorvida pelas plantas, voltando à atmosfera através da evapotranspiração, causando alterações na dinâmica de escoamento superficial e subsuperficial e no processo de infiltração. No caso de solo exposto a água proveniente da precipitação chega na sua totalidade ao solo, sendo dividida em escoamento superficial, infiltração e armazenamento na camada superficial do terreno (evaporação e infiltração).

Mecanicamente as plantas recebem, suportam, encaminham e descarregam tensões provenientes das solicitações externas ao elemento solo. As solicitações podem ocorrer por compressão, tração, cisalhamento, torção ou flexão¹¹.

¹¹ Compressão - tendência para redução do elemento que ocorre na direção da força aplicada; Tração - tendência para o alongamento do elemento na direção da força aplicada; Cisalhamento - forças atuantes paralelas, mas com direções opostas que tendem a produzir um efeito de corte no elemento; Torção - as forças atuam num plano perpendicular ao eixo e cada seção transversal tende a girar em relação às demais; Flexão - solicitação transversal em que ocorre uma deformação que tende a modificar o eixo longitudinal do elemento (BENTO, 2003).

Dependendo das características da vegetação e da intensidade das tensões solicitantes, as plantas podem ter a capacidade de receber e absorver as tensões na sua totalidade, em outros casos podem encaminhar e/ou descarregar essas tensões para outras camadas de solo mais competentes. É importante salientar que essas funções podem ocorrer isoladamente, simultaneamente ou até sequencialmente.

Resumidamente, as plantas desempenham um conjunto de funções técnicas hidrológicas e mecânicas, que têm ações que resultam em efeitos negativos ou positivos sobre o solo.

Apesar de um dos objetivos da Engenharia Natural ser o de projetar ecossistemas em equilíbrio dinâmico, do ponto de vista da Engenharia surge a necessidade de atribuir à vegetação maior responsabilidade técnica, sendo o principal objetivo desta nova classificação considerar que o efeito técnico final desempenhado pelas plantas é a estabilização geotécnica de solos, estabilização hidráulica e controle de processos erosivos.

Uma vez que se pretendem caracterizar as plantas do ponto de vista de material construtivo, considera-se que as suas funções poderão ter efeitos técnicos nas propriedades de engenharia dos solos, portanto na resistência do solo. Estas funções também poderão atuar e ter efeito nas solicitações atuantes no solo, que conseqüentemente conduzem indiretamente à maior estabilidade ou instabilidade do mesmo. Com base nesta premissa determina-se que os efeitos técnicos positivos das plantas são o aumento da resistência do solo e a redução da solicitação sobre o mesmo. No entanto, não devem ser desconsiderados os efeitos técnicos negativos das plantas, que podem colocar em causa a estabilidade dos solos, sendo estes os inversos dos apontados anteriormente, ou seja, a redução da resistência do solo e o aumento da solicitação sobre o mesmo.

É importante salientar que as funções técnicas desempenhadas pelas plantas estão todas interligadas e muitas ocorrem simultaneamente, e dificilmente pode-se encontrar uma função a ocorrer de forma isolada. Ou seja, uma planta que apresenta funções do ponto de vista hidrológico apresenta simultaneamente funções mecânicas. Isso se deve ao fato que as funções técnicas das plantas são originadas por um conjunto de características morfológicas (arquitetura das copas ou do sistema radicular) ou propriedades mecânicas (flexibilidade ou resistência à tração

das raízes) que resultam num grupo de ações que atuam em conjunto, uma vez que estas características morfo-mecânicas não existem de forma dissociada.

4.1.1.1 Função hidrológica

Do ponto de vista hidrológico as plantas modificam o balanço e distribuição de água na hidrosfera (água superficial e subterrânea) e na atmosfera (água atmosférica).

Com base na bibliografia consultada e após definição de conceitos como função, ação e efeito, considerou-se que as plantas apresentam as seguintes funções técnicas hidrológicas - interceptar, infiltrar, evapotranspirar e drenar. Estas funções técnicas têm ações que causam efeitos positivos ou negativos na estabilidade de taludes como se pode verificar na Figura 19.

As funções técnicas hidrológicas estão todas interligadas entre si e ocorrem todas simultaneamente em maior ou menor intensidade. Isto significa que as plantas apresentam um conjunto de características morfológicas semelhantes, como copa, ramos, troncos e sistema radicular, que contribuem concomitantemente na interceptação, infiltração, evapotranspiração e drenagem. Considerando um exemplo prático para melhor entendimento: uma planta com copa densa, muito ramificada e com muitas folhas tem boa capacidade para interceptar e evapotranspirar, e ao mesmo tempo devido à existência do seu sistema radicular tem capacidade de infiltrar e drenar (com maior ou menor eficiência dependendo do tipo de arquitectura do sistema radicular).

Em seguida serão explicadas de forma individual cada função técnica hidrológica e respectivas ações desempenhadas pelas plantas. As relações causa-efeito entre características morfo-mecânicas e as funções técnicas hidrológicas serão discutidas posteriormente na parte referente ao procedimento de especificação de material construtivo vivo.

1. Interceptar

A presença de folhas e galhos nas plantas forma uma barreira que intercepta a precipitação e protege o solo. As plantas têm capacidade de absorver o impacto das gotas da chuva e reter parte da água da precipitação.

A interceptação da precipitação tem ação a reduzir a quantidade de água que atinge o solo, diminuindo tanto o volume de escoamento superficial, bem como a quantidade de água que irá infiltrar, não tendo por isso efeito na adição de peso no talude, ações estas que têm efeito de redução da sollicitação sobre o solo.

Uma vez que menor quantidade de água atinge o solo, a pressão neutra mantém-se igual, e conseqüentemente não haverá alteração na resistência ao cisalhamento do solo. Apesar de não haver aumento da resistência do solo, este efeito é considerado positivo porque devido à interceptação não existe diminuição da resistência do solo.

Este conjunto de ações positivas mantêm a resistência do solo e reduzem a sollicitação sobre o mesmo, podendo por isso assumir-se que o mesmo apresenta maior estabilidade.

Preferencialmente devem escolher-se plantas perenes, arbustivas ou arbóreas com copas densas, bem ramificadas. As plantas devem apresentar valores altos de índice de área foliar¹² que conduzem a valores superiores de interceptação. Plantas herbáceas e gramíneas, também são eficientes uma vez que provocam uniformidade na distribuição da precipitação sobre a superfície do solo.

2. Evapotranspirar

As plantas através do processo de evapotranspiração reduzem a quantidade de água no solo de duas formas. A água que fica retida nas folhas, sofre evaporação, e não atinge a superfície do solo. As plantas através do seu sistema radicular absorvem água do solo, que ascende às copas, mais especificamente às folhas e que posteriormente transfere-se em forma de vapor para atmosfera - transpiração.

¹² O índice de área foliar (IAF) ou leaf area index (LAI) é um parâmetro biofísico que caracteriza um dossel florestal e está diretamente relacionado com a evapotranspiração e produtividade. Expressa uma relação entre área da superfície foliar (apenas a parte superior) e a área projetada no solo (m²/m²) WATSON (1947 apud XAVIER; SOARES; ALMEIDA, 2002).

Importante salientar que este fenômeno depende das condições climáticas existentes (quantidade de luz, temperatura, umidade relativa do ar e vento).

A evapotranspiração tem ação no volume de água que atinge o solo diminuindo o volume de escoamento superficial, reduzindo o peso do solo, e em consequência a ação de instabilização sobre as massas de solos. Também remove água do solo diminuindo a pressão neutra, e conseqüentemente aumentando a resistência ao cisalhamento do solo.

Estas ações positivas combinadas aumentam a resistência do solo e reduzem a sollicitação sobre o mesmo, podendo por isso assumir-se que o mesmo apresenta maior estabilidade devido à existência de plantas.

No entanto, a presença de raízes também pode ter efeito negativo, nomeadamente no caso da extração prolongada de água pelas raízes para a transpiração, em solos plásticos, o que pode levar à dissecação do solo e à formação de fendas de tração. A existência de fendas de tração associada com precipitações intensas e à rápida infiltração de água causa diminuição na resistência do solo.

Devem escolher-se de plantas arbustivas ou arbóreas, perenes, com copas com folhagem densa, e sistemas radiculares bem desenvolvidos. Importante que estas plantas reconhecidamente apresentem maior demanda de água - plantas freatófitas. Preferencialmente as plantas devem apresentar valores altos de índice de área foliar que conduzem a valores superiores de evapotranspiração.

3. Infiltrar

As plantas além de interceptarem e reduzirem a água que chega ao solo promovem a infiltração de água no mesmo, principalmente devido à existência de raízes que aumentam a permeabilidade e porosidade do solo. Quando estas raízes apodrecem formam-se canais que incrementam ainda mais a infiltração. As copas também promovem a infiltração, uma vez que a água proveniente da precipitação escoam pelas folhas, ramos e troncos, sendo posteriormente encaminhada e infiltrada no solo. Além disso, a parte aérea das plantas também aumenta a rugosidade

superficial do solo, diminuindo a velocidade do fluxo superficial, fazendo com que que parte desse fluxo se infiltre.

A presença de plantas origina a formação de uma camada de matéria orgânica (serapilheira), que evita o efeito de selamento do solo e também promove a infiltração.

A infiltração tem ação na depleção do escoamento, reduzindo o volume de água superficial, diminuindo o potencial erosivo da água, reduzindo a solicitação sobre o solo. Esta função não tem efeitos positivos na resistência do solo.

Deve salientar-se que a infiltração tem efeitos negativos, na medida que leva a um acréscimo no peso da massa de solo, aumentando a solicitação, e também a um incremento da pressão neutra, reduzindo a resistência do solo. Por outro lado, em caso de solos arenosos a infiltração não excessiva melhora a coesão aparente.

Estes efeitos negativos são no entanto, atenuados pela interceptação e evapotranspiração, explicadas anteriormente, e pela drenagem, que será explicada em seguida.

Devem ser selecionadas preferencialmente plantas herbáceas, gramíneas, arbustivas ou arbóreas com sistemas radiculares profundos e bem desenvolvidos.

4. Drenar

A drenagem em solos vegetados pode ocorrer de duas formas distintas, seja por drenagem subsuperficial, ou drenagem subterrânea.

Na drenagem subsuperficial, o fluxo de água ocorre entre a serapilheira e a camada superficial do solo com raízes paralelas à superfície. Este fluxo de água subsuperficial desvia parte da água proveniente da infiltração para áreas menos saturadas.

A drenagem subterrânea deve-se essencialmente à presença de sistemas radiculares ramificados e profundos que conduzem a água proveniente da infiltração para camadas mais profundas de solo, ou para a recarga de aquíferos.

As principais ações da drenagem são a redução da pressão neutra, que resulta no aumento da resistência do solo; a diminuição do peso da massa de solo e a redução

no volume de escoamento superficial, que resultam na redução da solicitação sobre o solo.

Como se pode verificar, estas ações positivas desviam a água proveniente da infiltração, atenuando as ações negativas decorrentes desse processo.

Devem ser utilizadas plantas com sistemas radiculares pivotantes, profundos e bem desenvolvidos (para drenagem profunda), ou sistemas radiculares laterais bem desenvolvidos (para drenagem subsuperficial).

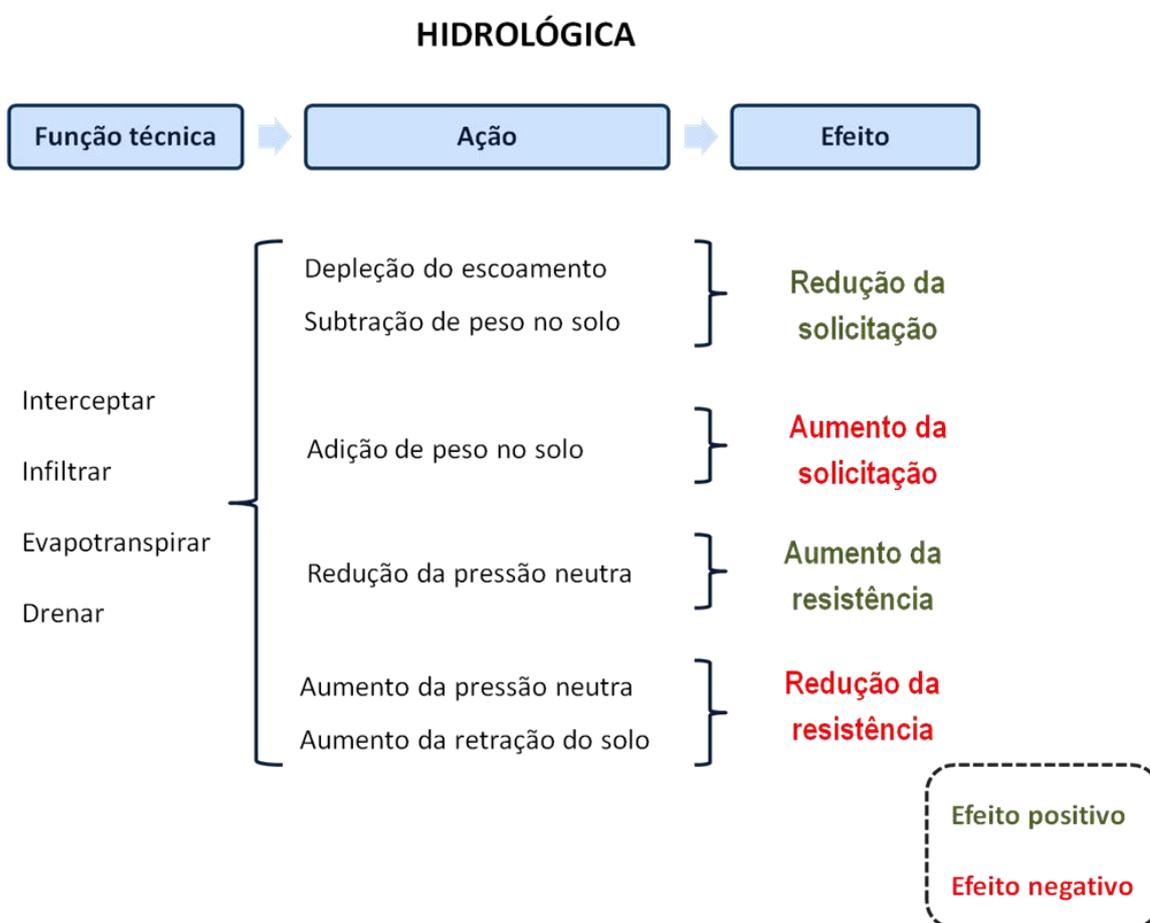


Figura 19 - Fluxograma das funções hidrológicas das plantas.

4.1.1.2 Função mecânica

Do ponto de vista mecânico as plantas recebem, absorvem, encaminham e descarregam tensões provenientes das solicitações externas. Os agentes que provocam estas solicitações poderão ser a ação antrópica, a gravidade, a temperatura, o vento e a água.

No caso particular de solicitações hidráulicas provenientes do escoamento fluvial e pluvial, estas são entendidas do ponto de vista da engenharia como solicitações mecânicas. As solicitações hidráulicas são distintas das hidrológicas, uma vez que enquanto as primeiras são puramente mecânicas, as segundas estão relacionadas à distribuição e balanço de água na hidrosfera e atmosfera.

Seguindo o mesmo critério e definições utilizadas para as funções hidrológicas, considerou-se que as plantas apresentam as seguintes funções técnicas mecânicas - estruturar, absorver e encaminhar. Estas funções técnicas têm ações que causam efeitos positivos ou negativos na estabilidade de taludes como se pode verificar na Figura 20.

Tal como ocorre nas funções hidrológicas, também neste caso as funções mecânicas são interdependentes e ocorrem simultaneamente. Isto significa que as plantas apresentam um conjunto de características morfológicas, como copa, ramos, troncos e sistema radicular, que contribuem concomitantemente para estruturar, absorver e encaminhar. Ou seja, uma planta com sistema radicular muito profundo e resistente, tem capacidade de estruturar o solo, e ao mesmo tempo devido à existência de uma parte aérea bem ramificada, tem aptidão para interpor-se e absorver solicitações mecânicas.

A seguir serão explicadas de forma individual cada função técnica mecânica e as respectivas ações desempenhadas pelas plantas. As relações causa-efeito entre características morfo-mecânicas e as funções técnicas mecânicas serão discutidas posteriormente na parte referente ao procedimento de especificação de material construtivo vivo.

1. Estruturar

As plantas apresentam capacidade de estruturar o solo devido à presença de raízes, que melhoram as propriedades de resistência da massa de solo. O sistema radicular promove a formação de uma matriz constituída por fibras vivas com resistência à tração, que funcionam como um sistema de reforço semelhante aos solos reforçados por materiais inertes (sintéticos ou metálicos).

Os efeitos mecânicos do sistema radicular aumentam a resistência da massa solo-raiz, a resistência ao deslizamento e a capacidade de confinamento do solo.

Plantas com sistemas radiculares compostos por raízes finas (até 5,0 mm de diâmetro)¹³ são mais eficientes a confinar fisicamente o solo, impedindo o seu movimento por ação mecânica da gravidade, do fluxo superficial e do vento. Sistemas radiculares laterais bem desenvolvidos reduzem as solicitações mecânicas do fluxo de água, diminuindo o potencial erosivo da água. Por sua vez, sistemas estruturados verticalmente com raízes pivotantes, penetram nas camadas profundas do solo, funcionando como tirantes em sistemas de ancoragem profunda, promovendo melhor ancoragem, arqueamento e escoramento do solo. Estas ações têm efeito no aumento da resistência do solo.

Apesar das raízes não afetarem o ângulo de atrito interno do solo (ϕ), elas têm influência direta na resistência ao cisalhamento do solo (τ) uma vez que contribuem para o acréscimo da coesão do solo (cr), como se pode ver na Equação 9. Este acréscimo na resistência ao cisalhamento também pode ser medido através do fator Δs , que resulta de um aumento da resistência devido à resistência à tração das raízes (Equação 10). O Δs resulta da razão entre a força máxima suportada pelas raízes e área das raízes.

$$\tau = c + cr + \sigma \tan \phi \quad (\text{Equação 9})$$

$$\tau = c + \sigma \tan \phi + \Delta s \quad (\text{Equação 10})$$

¹³ Classes de diâmetro de raízes: Finas: <0,5 - 5,0 mm; Médias: 5,0 -10,0 mm; Grossas: 10,0 - > 20,0 mm (BÖHM, 1979).

O aumento da resistência ao cisalhamento e conseqüentemente da resistência do solo, devido à presença de raízes pode ser calculado quer pelo acréscimo da coesão, quer pelo acréscimo na resistência à tração. Estes dois fatores, c_r e Δs são equivalentes conforme observado na Figura 10.

O crescimento de raízes em solos rochosos tem efeitos negativos, uma vez que pode provocar a formação de fendas e decontinuidades, criando um efeito de cunha, reduzindo a resistência do solo.

Apesar da presença de raízes no solo ter alguns efeitos negativos, a sua presença é maioritariamente positiva, sendo que as mesmas estruturam o solo com ação na resistência ao cisalhamento, e conseqüentemente no aumento da resistência do solo.

Para estruturar o solo sugere-se de forma geral a escolha de plantas com sistemas radiculares densos e bem desenvolvidos. Mais especificamente, para confinar o solo devemos optar por plantas com maior percentagem de raízes finas (até 5,0 mm de diâmetro), para evitar a erosão superficial. Para solicitações hidráulicas em cursos de água sistemas radiculares orientados lateralmente são mais eficientes. Raízes profundas são mais eficientes na ação de ancoragem das camadas de solo, evitando movimentos de massa.

2. Absorver

As plantas além de estruturarem o solo devido às raízes, têm a capacidade de absorver mecanicamente os esforços das solicitações sobre o solo de variadas formas, seja como barreira física contra solicitações mecânicas, seja influenciando a rugosidade hidráulica em canais ou a rugosidade superficial em taludes.

A presença de plantas protege superficialmente o solo, absorvendo diretamente as ações mecânicas provenientes de atividades antrópicas. Essa cobertura também modifica o microclima do solo, diminuindo as oscilações de temperatura e umidade, que podem causar quebra dos agregados e enfraquecimento estrutural, que conduzem a uma diminuição da coesão de solo. Além disso, a presença de plantas evita o processo de selamento superficial do solo, que ocorre por impacto das gotas

impedindo a infiltração, o que leva a um aumento da desagregação e transporte de partículas de solo.

Plantas em taludes, principalmente arbustos grandes e árvores, também suportam movimentos de massa, como queda de blocos, rochas, detritos e outros materiais instáveis, ou avalanches. Estes materiais são retidos e confinados pelos troncos e ramos, impedindo a sua progressão e transporte encosta abaixo.

Assim, ocorre uma diminuição das ações mecânicas, reduzindo a sollicitação sobre o solo.

As copas das plantas até 4 m de altura e formadas por folhas pequenas, funcionam como uma barreira física contra a ação mecânica da precipitação, absorvendo o impacto das gotas da chuva, diminuindo a energia com que as mesmas atingem o solo, impedindo dessa forma a quebra de agregados do solo e a sua separação e transporte. No caso de copas constituídas por folhas grandes e largas, essas devem apresentar no máximo 0,5 m de altura (COPPIN; RICHARDS, 2007), valor de referência onde não existe aumento significativo na desagregação das partículas de solo. Para copas com alturas superiores pode haver desagregação do solo, se o mesmo não estiver coberto por serapilheira.

No caso de canais pluviais ou fluviais, sejam eles artificiais ou naturais, a presença de plantas promove a redução de velocidade da água, devido ao aumento do coeficiente de rugosidade (Equação 1). Canais com vegetação apresentam maior rugosidade que canais revestidos com concreto, o que influencia diretamente a velocidade da água. Se a redução da velocidade da água atingir valores inferiores à velocidade limite de transporte, o material sólido transportado pelo fluxo de água irá depositar-se e não haverá novo material a ser erodido e transportado.

Estes efeitos diminuem o potencial erosivo da água, reduzindo a sollicitação sobre o solo.

No entanto, a presença de vegetação em canais pode reduzir a seção de escoamento, que no caso de vazões elevadas, pode causar inundação das áreas adjacentes. Esta problemática é grave em zonas urbanas, e pode ser devidamente atenuada com a escolha de plantas que apresentem flexibilidade da parte aérea e que se dobrem sobre si mesmas. É importante salientar que este efeito apenas é

negativo no caso de canais que atravessassem zonas urbanas em que existe ocupação humana da área reservada à passagem de água, nomeadamente do leito de cheia¹⁴.

No caso de taludes naturais ou artificiais, as plantas também têm efeito na rugosidade superficial do solo, diminuindo a velocidade do escoamento superficial e o seu potencial erosivo, e conseqüentemente a solicitação sobre o solo.

No caso de plantas herbáceas e gramíneas, devido à sua grande flexibilidade, estas dobram-se sobre si mesmas. Apesar desta vegetação pouco influenciar a rugosidade em canais naturais ou artificiais, ela serve como barreira física, protegendo o solo contra o efeito mecânico do fluxo superficial de água, reduzindo o seu potencial erosivo, diminuindo a solicitação sobre o solo.

A presença de plantas isoladas e rígidas pode causar turbulência, e conseqüentemente fenômenos erosivos localizados, que aumentam a solicitação sobre o solo. Este fenômeno pode afetar taludes naturais e artificiais, e especialmente canais fluviais e pluviais.

A existência de plantas, especificamente a parte aérea, tem ainda efeitos na diminuição da velocidade do vento. As copas servem como barreiras que impedem o vento de separar e transportar partículas de solo. Esta redução na velocidade do vento diminui o potencial erosivo do mesmo, reduzindo a solicitação sobre o solo.

Para absorver as forças mecânicas, provenientes da energia hidráulica, eólica e mecânica de movimentos de massa e atividades antrópicas, aconselha-se preferencialmente a escolha de plantas herbáceas, arbustivas ou arbóreas, com copas densas e ramificadas, que apresentem distribuição densa, uniforme e flexibilidade.

3. Encaminhar

As forças mecânicas que não são absorvidas pelas plantas, são encaminhadas para o solo e redistribuídas nas camadas ocupadas pelas raízes. Aparentemente esta função da vegetação poderia ser considerada negativa, pois estaríamos a aumentar a carga sobre o solo. No entanto, essa solicitação pode ser distribuída para

¹⁴ Leito de cheia, maior ou inundação, corresponde ao espaço do vale que é inundável em época de cheias extraordinárias.

camadas mais profundas do solo que são mais competentes que as camadas superficiais.

As raízes das plantas transferem cargas solicitantes de zonas mais sobrecarregadas para zonas sujeitas a menores esforços, efeito semelhante ao desempenhado pela inserção de reforços sintéticos no solo. Este efeito é positivo e aumenta a resistência do solo.

No caso específico da sobrecarga devido à presença de árvores em taludes, esta poderá transmitir aos taludes forças estabilizantes e instabilizantes dependendo da sua localização nos taludes. No caso de árvores localizadas na base do talude, a componente normal da sobrecarga atua aumentando a resistência ao deslizamento, quer por atrito quer por forças estabilizantes. Para árvores localizadas no topo dos taludes, estas aumentam a intensidade das forças descendentes, aumentando a solicitação sobre o solo. Ou seja, dependendo de fatores como a geometria do talude e da distribuição das árvores, o efeito de sobrecarga pode encaminhar forças solicitantes ou resistentes, aumentando a resistência do solo ou aumentando a solicitação sobre o solo, respectivamente.

A vegetação herbácea ou arbustiva pode transmitir para o solo as forças induzidas pelo vento, no entanto estas forças são de baixa intensidade e encaminhadas para camadas profundas mais competentes. No caso de vegetação arbórea de maior porte localizada em taludes, e na presença de ventos fortes, estas forças solicitantes são de maior intensidade e podem criar perturbações nessas camadas e iniciar deslizamentos. Este efeito é considerado negativo e aumenta a solicitação sobre o solo.

Para encaminhar esforços solicitantes sobre solo aconselha-se preferencialmente a escolha de plantas herbáceas, ou arbustivas com sistemas radiculares densos e ramificados. Árvores são desaconselhadas uma vez que podem criar maior perturbação no solo na presença de ventos fortes, ou instabilizar taludes (quando localizadas no topo dos mesmos).

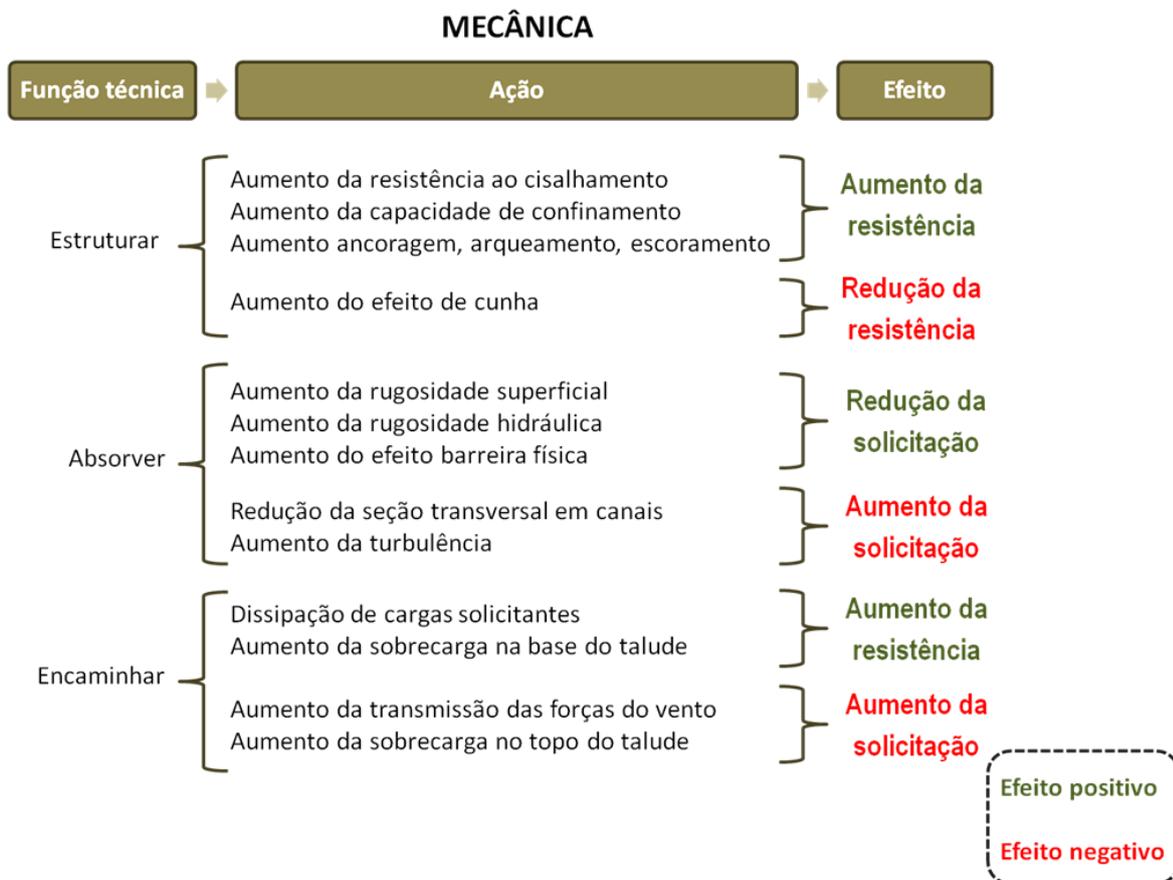


Figura 20 - Fluxograma das funções mecânicas das plantas.

4.1.2 Funções adicionais das plantas

As funções adicionais das plantas apesar de poderem ser secundárias do ponto de vista da engenharia tradicional, são imprescindíveis numa intervenção que recorra à utilização da Engenharia Natural, porque desempenham diversas funções que promovem melhorias ecológicas e estéticas na qualidade ambiental e ainda desempenham funções sócio-econômicas. Esse fator diferencia as intervenções de Engenharia Natural das de engenharia Civil que consideram principalmente funções técnicas estruturais. Uma intervenção que recorra à Engenharia Natural resolve problemas estruturais de estabilização geotécnica e hidráulica e simultaneamente projeta ecossistemas em equilíbrio dinâmico.

Uma vez que o objetivo deste trabalho é elaborar um procedimento de especificação de material construtivo vivo para intervenções com Engenharia Natural em obras de

infraestrutura, as funções adicionais da vegetação serão abordadas de forma menos aprofundada, uma vez que são menos determinantes que as funções técnicas.

4.1.2.1 Função ecológica-ambiental

A implantação de plantas numa intervenção de Engenharia Natural apresenta diversas funções do ponto de vista ecológico e ambiental. Uma vez que um dos objetivos é projetar um ecossistema em equilíbrio dinâmico, a escolha das plantas a utilizar deve seguir além de critérios técnicos alguns fundamentos ecológicos.

O critério ecológico de maior importância recai sobre a utilização preferencial de plantas autóctones. A utilização de vegetação autóctone apresenta diversas vantagens uma vez que as plantas nativas estão adaptadas às condições edafoclimáticas da região, são mais resistentes a pragas e doenças e normalmente apresentam maior capacidade de sobrevivência. Comunidades constituídas por plantas autóctones promovem o aumento da biodiversidade florística e faunística, sem transformação estrutural das comunidades fitossociológicas e sem alteração nas cadeias alimentares. Estas características levam a uma maior taxa de sucesso das intervenções.

Por sua vez, espécies alóctones podem constituir uma ameaça à biodiversidade, uma vez que a sua utilização dificulta a colonização espontânea da flora e da fauna autóctone. Além disso, quando introduzimos espécies exóticas numa região é difícil prever o desenvolvimento futuro dessas espécies, correndo-se o risco das mesmas se tornarem invasoras.

Para a escolha ecológica adequada do conjunto de espécies a utilizar devem ter-se em conta fatores condicionantes como o tipo de solo, geologia, clima (temperatura, precipitação, umidade, exposição do terreno), altitude e latitude. Também deve ser feita uma análise da vegetação existente no local com potencial biotécnico para ser

utilizada nas intervenções. No caso do objetivo da intervenção ser a restauração ecológica deve ser avaliada a vegetação clímax¹⁵ do local.

A presença de plantas poderá ainda ter outras funções ecológicas como, promoção de melhorias no balanço de temperatura e umidade do solo criando desta forma melhores condições para a germinação das plantas e a vida da microfauna do solo, melhoria das condições nutricionais e, conseqüentemente da fertilidade do solo, criação de habitats para a fauna, proteção contra a poluição atmosférica.

As plantas podem ser utilizadas para purificação da água, uma vez que algumas espécies apresentam a capacidade de reter poluentes.

A utilização de plantas pode também servir como criação de barreiras vivas que têm efeitos na modificação no fluxo de ar, seja no caso da deflexão, refração e absorção do ruído bem como no caso da diminuição da velocidade do vento.

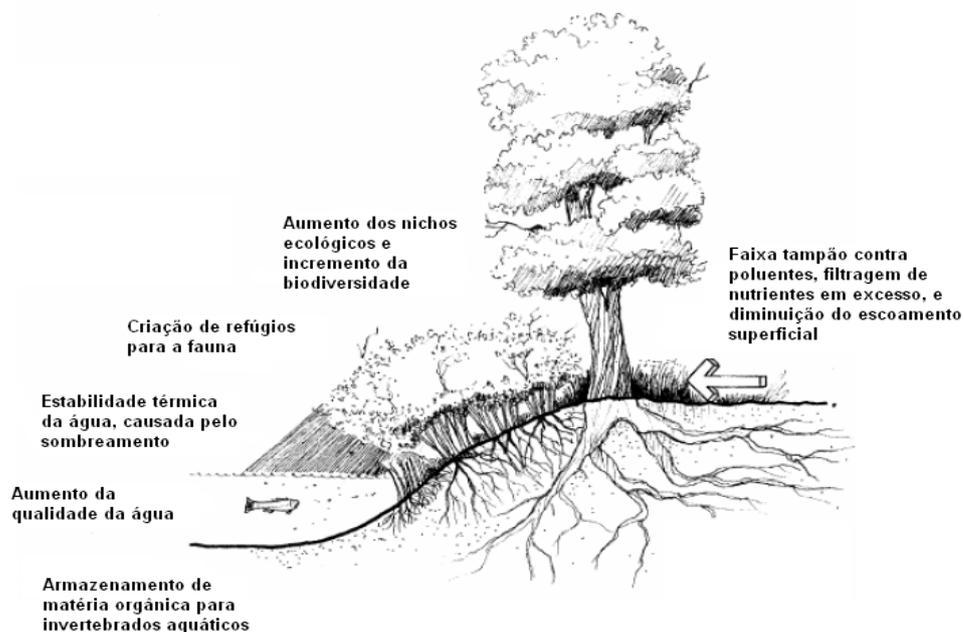


Figura 21 - Funções ecológicas da vegetação (WATERWAYS RESTORATION INSTITUTE AND URBAN CREEKS COUNCIL, 2006).

No caso de vegetação ciliar, a sua utilização permite manter a conectividade ecológica e hidráulica dos cursos de água. Também promove a estabilidade térmica

¹⁵ Vegetação clímax corresponde à vegetação de uma região constituída de comunidades vegetais que atingiram o seu máximo ecológico estável, refletindo a resposta mais eficaz às condições do biótopo (NETO et al., 2008).

da água, causada pelo sombreamento das margens dos cursos de água, cria refúgios para a ictiofauna e fomenta o armazenamento de matéria orgânica para os invertebrados aquáticos.

4.1.2.2 Função estética

A utilização de plantas numa intervenção que recorra às técnicas de Engenharia Natural apresenta várias funções estéticas. As plantas, devido ao seu alto valor ornamental, podem ser utilizadas em obras de paisagismo, parques e áreas de preservação.

A sua utilização promove a restauração estética da paisagem que pode ter sido danificada quer por catástrofes naturais (inundações, sismos, terremotos, etc), quer por intervenções antrópicas (trabalhos de construção, exploração de recursos minerais, aterros sanitários, etc).

As plantas depois de se desenvolverem e crescerem também vão ter a função de ocultar ou integrar estruturas artificiais na paisagem, bem como promover o seu enriquecimento através da criação de novos elementos, estruturas, formas e cores.

4.1.2.3 Função sócio-econômica

As plantas poderão apresentar vários benefícios e funções sociais e econômicas. A possibilidade de recolher e utilizar plantas existentes nas proximidades do local de intervenção faz com que as intervenções tenham menores custos de execução. Além disso, intervenções mais antigas podem servir como fonte de produção primária de material vegetal para outras obras, bem como de alimentos, madeira, fibras, etc.

As intervenções de Engenharia Natural, devido à utilização de plantas como material construtivo têm normalmente menores custo de manutenção e recuperação, uma

vez que as plantas apresentam maior resistência e resiliência a solicitações externas.

A utilização de plantas em intervenções de engenharia permite-nos uma melhor gestão econômica dos recursos naturais, mas também e principalmente em contexto urbano traz vários benefícios sociais induzidos como por exemplo, bem-estar, promoção da saúde e redução da poluição atmosférica.

4.2 Requisitos

A escolha adequada de plantas como material construtivo, numa intervenção de Engenharia Natural além de seguir critérios que cumpram funções técnicas hidrológicas e mecânicas e funções adicionais, deve obedecer a um conjunto de requisitos determinados pelas suas formas de uso, especificidades da solução construtiva e do local de aplicação. O cumprimento destes requisitos resulta no sucesso da implantação da vegetação.

Ou seja, considerando que estamos a trabalhar com material construtivo vivo é essencial ter em consideração que as plantas necessitam de condições apropriadas para o seu desenvolvimento. Estas exigências são os requisitos que podem ser edafoclimáticos, que caracterizam o tipo de habitat que as plantas têm capacidade de colonizar (por exemplo, temperatura, precipitação, umidade, tipo de solo, radiação solar, relevo, entre outros). Podem ser ecológicos (por exemplo, tipo de comunidade, sucessão vegetal, competição, alelopatia, entre outros). Também podem ser determinados pelo tipo de solução construtiva de acordo com as formas de uso das plantas, ou seja, no caso de escolhermos uma técnica que utilize estacas vivas, é requisito que as plantas tenham propagação vegetativa. É determinante obedecer a requisitos de acordo com as especificidades do local de intervenção (tolerância ao apedrejamento, aterramento e exposição parcial das raízes, capacidade de rebrota, resistência à submersão).

No caso particular de vegetação ciliar, a sua escolha deverá obedecer a critérios ecológicos que controlam a distribuição transversal. O entendimento desta distribuição transversal específica para cada espécie está relacionado com o

sucesso das intervenções localizadas em margens fluviais. A composição da vegetação e estrutura da mata ciliar é regulada pela frequência, magnitude, duração e sazonalidade das inundações e das condições de umidade no solo. Pode-se observar na Figura 22 uma seção transversal que identifica a distribuição da vegetação de acordo com as especificidades do local.

Essas especificidades são maioritariamente dependentes do nível de água, e por isso a vegetação existente em margens fluviais alterna de plantas que devem ser tolerantes à submersão (na base do talude) até plantas que devem ser tolerantes a condições de seca (no topo do talude).

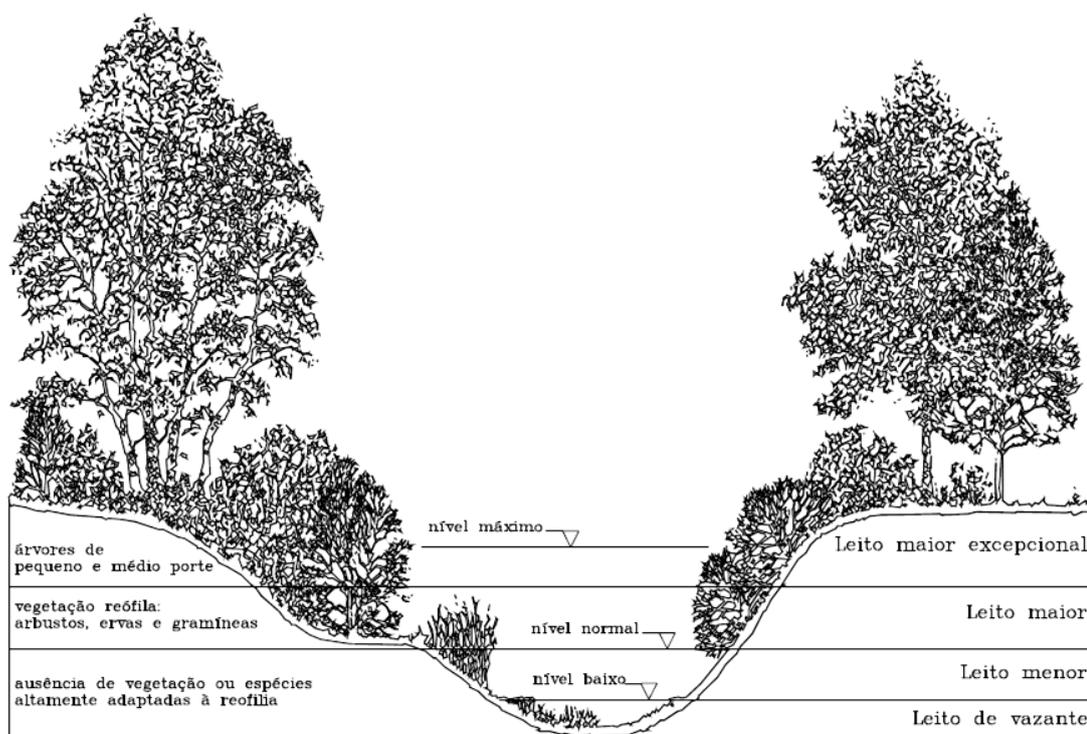


Figura 22 - Distribuição ecológica da vegetação ciliar (DURLO; SUTILI, 2014).

4.3 Propriedades biotécnicas das plantas

Considerando as plantas do ponto de vista da engenharia, podemos correlacionar as suas propriedades como material construtivo vivo, através das suas características morfo-mecânicas, com as funções apresentadas anteriormente, sejam as técnicas

hidrológicas e mecânicas, sejam as adicionais (ecológicas-ambientais, estéticas e socio-econômicas) e seus efeitos nas propriedades de engenharia do solo.

Desta forma propriedade biotécnica pode ser definida como uma propriedade do material construtivo vivo, que através de características morfo-mecânicas inerentes desempenha uma função técnica (hidrológica ou mecânica), que por intermédio de um conjunto de ações tem efeitos (positivos) nas propriedades de engenharia dos solos.

Os efeitos nas propriedades de engenharia do solo são resultado de um processo hidrológico e/ou mecânico que influencia a resistência do solo ou a solicitação sobre o mesmo.

As propriedades adicionais também resultam das características morfo-mecânicas das plantas e têm funções ecológico-ambientais, estéticas ou socio-econômicas, que ocorrem juntamente com as propriedades biotécnicas, e que apesar de desempenharem um papel secundário do ponto de vista da engenharia são importantes, pois resultam num conjunto de vantagens que advêm da utilização da Engenharia Natural.

O conjunto de requisitos para cada espécie é determinado pelas suas características morfo-mecânicas, sendo indispensável para o sucesso da vegetação e conseqüentemente das intervenções de Engenharia Natural.

Com base no exposto anteriormente pode ser elaborado um fluxograma que representa de forma simplificada, a correlação entre as propriedades das plantas, consideradas como material construtivo vivo e as funções da Engenharia Natural, como se pode observar na Figura 23.

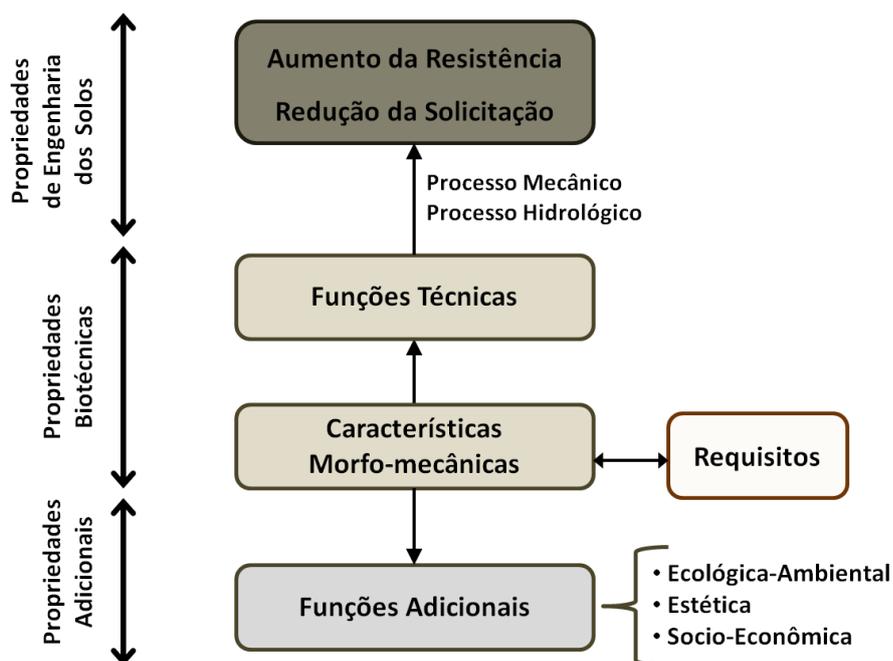


Figura 23 - Correlação entre as propriedades das plantas e as funções da Engenharia Natural.

O conjunto de características morfológicas e mecânicas (morfo-mecânicas) que são inerentes às plantas, origina funções que estão interligadas e ocorrem simultaneamente, sejam elas hidrológicas, mecânicas, ecológico-ambientais, estéticas ou socio-econômicas. Estas características morfo-mecânicas não existem de forma dissociada e determinam os requisitos para cada espécie.

Definidos e estruturados todos os conceitos relativos à utilização e importância das plantas como material construtivo vivo, em intervenções de Engenharia Natural, sejam eles relativos às suas funções técnicas hidrológicas e mecânicas ou adicionais, sejam sobre os seus efeitos nas propriedades de engenharia do solo, pode ser desenvolvido um procedimento de especificação de material construtivo vivo para obras de infraestrutura. Esse procedimento orienta na escolha da vegetação mais adequada para resolver um determinado problema, de forma simplificada para que possa ser utilizado pelos diversos profissionais que trabalhem com Engenharia Natural, desde a fase de projeto até à execução final de obra.

4.4 Procedimento para especificação de material construtivo vivo

A concepção de um procedimento simplificado para orientar a escolha de plantas é muito importante, uma vez que para executar um projeto ou intervenção de Engenharia Natural que tenha sucesso, é essencial reunir uma equipe interdisciplinar de profissionais que procuram a solução dos problemas através da articulação de diversas disciplinas e com integração dos resultados obtidos, desde engenheiros, topógrafos, botânicos, geólogos, biólogos e outros técnicos. Parte desta equipe não é especializada em conhecimentos botânicos, e por isso deve ter orientações sobre quais são as características morfológicas e mecânicas essenciais na vegetação que cumpram funções que atinjam um determinado efeito técnico.

Por outro lado, pode interessar ao especialista em botânica conhecer o potencial técnico proveniente da escolha e aplicação de certas espécies com características morfo-mecânicas específicas. Por isso a parte referente aos conhecimentos botânicos é essencial principalmente na pesquisa aprofundada por espécies mais adequadas à utilização em Engenharia Natural. Essa pesquisa pode ser orientada com base neste procedimento de especificação de material construtivo vivo, uma vez que o mesmo indica quais as características morfo-mecânicas que as espécies devem apresentar para atenderem a um conjunto de funções que resultem em melhores propriedades de engenharia dos solos.

A elaboração deste procedimento para escolha de plantas baseia-se principalmente em características morfológicas de fácil reconhecimento, sem que seja necessário um conhecimento aprofundado em botânica, ecologia ou fitossociologia.

Para estruturação deste procedimento considerou-se que a Engenharia Natural, de forma geral, pode ser aplicada para resolver problemas técnicos de controle de erosão superficial, estabilização hidráulica e estabilização geotécnica. Estes são os três grandes grupos em que todos os campos de aplicação técnica da Engenharia Natural estão incluídos, como por exemplo, intervenções em taludes e encostas naturais, cursos de água, obras de infra-estrutura (rodovias, ferrovias ou dutovias), aterros sanitários, áreas mineradas, zonas urbanas, rurais, costeiras ou áreas alteradas por incêndios, etc. Todas as tipologias de problemas que podem ocorrer nos locais mencionados, podem ser incluídos em erosão superficial, instabilização

hidráulica ou instabilização geotécnica. Esses problemas podem ocorrer todos simultaneamente, mas também podem ocorrer de forma isolada.

Com base na tipologia de problema que ocorre podemos verificar quais as características morfo-mecânicas que a planta deverá apresentar, para solucionar esse problema. Para cada característica morfológica ou mecânica da planta está indicada a função hidrológica e/ou mecânica que a mesma desempenha. As funções hidrológicas e mecânicas apresentadas no fluxograma são as indicadas na Figura 19 e Figura 20.

Para facilitar a identificação das características morfo-mecânicas pertinentes, estas foram divididas em parte aérea (características das copas) e parte subterrânea (características do sistema radicular).

4.4.1 Controle de erosão superficial

A erosão é um processo natural e contínuo, no entanto quando este processo deixa de ocorrer de forma equilibrada pode originar graves problemas de perda de solo. Os problemas de erosão superficial estão associados principalmente à perda de cobertura vegetal, que expõe o solo à erosão pela água, vento e pisoteio.

Em intervenções de Engenharia Natural para controle de erosão superficial o principal objetivo é prevenir a perda da camada superficial de solo, que quando é muito recorrente e concentrada poderá potencializar fenômenos de instabilização.

As plantas escolhidas para este tipo de aplicação devem apresentar um conjunto de características morfo-mecânicas que ajudem a controlar fenômenos erosivos superficiais, sem necessidade de estabilização profunda.

No que diz respeito às características morfo-mecânicas da parte aérea (Figura 24), as plantas escolhidas devem ter copas ramificadas e densas que ajudem a interceptar, evapotranspirar e infiltrar a água proveniente da precipitação (funções hidrológicas). A interceptação tem ação na redução da quantidade de água que atinge o solo, com diminuição do volume de escoamento superficial. A evapotranspiração além das ações indicadas anteriormente também remove água

do solo, diminuindo a pressão neutra e reduzindo o peso do solo. Copas ramificadas e densas aumentam a rugosidade superficial, diminuindo a velocidade do escoamento, aumentando a infiltração de parte do fluxo de água. Esta arquitetura de copas absorve e encaminha tensões provenientes da água, do vento e de ações antrópicas (funções mecânicas). Ao mesmo tempo as copas devem ser baixas servindo de barreira física, protegendo o solo absorvendo o efeito mecânico do fluxo superficial de água. As plantas devem proporcionar uma cobertura uniforme do solo, característica importante para interceptar e absorver; plantas isoladas além de não serem eficientes na interceptação provocam fenômenos de turbulência localizada. Plantas perenifólias que apresentam folhas durante todo o ano potencializam funções hidrológicas de interceptação e evaporação.

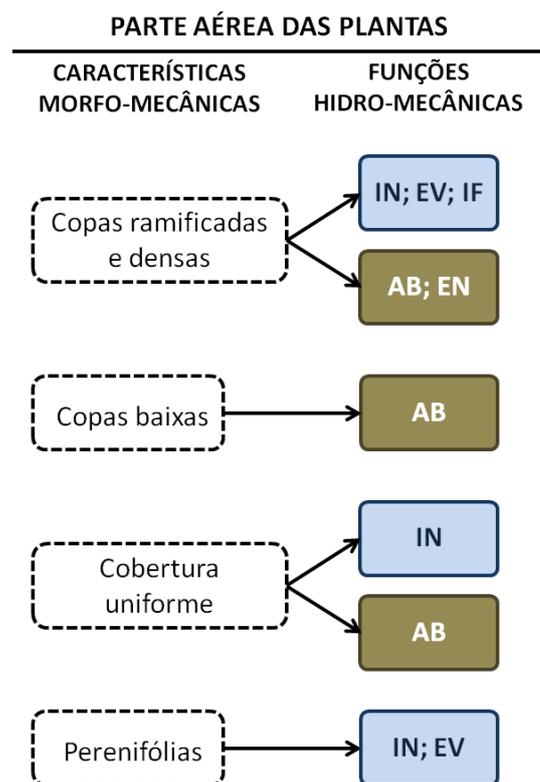


Figura 24 - Características morfo-mecânicas da parte aérea para controle de erosão superficial.

Legenda: **Função Hidrológica** (azul): Interceptar - IN; Evapotranspirar - EV; Infiltrar - IF.

Função Mecânica (marron): Absorver - AB; Encaminhar - EN.

Para problemas de controle de erosão superficial sistemas radiculares laterais são mais eficientes que raízes profundas pivotantes, uma vez que o objetivo principal é controlar processos erosivos superficiais e não se pretende estabilizar o solo em

profundidade. Como características morfo-mecânicas da parte subterrânea (Figura 25), são essenciais sistemas radiculares densos e laterais que potencializem a infiltração da água superficial e a drenagem subsuperficial (funções hidrológicas), para áreas menos saturadas, e ajudem a estruturar as camadas superficiais de solo, bem como a encaminhar forças mecânicas para que as mesmas sejam redistribuídas superficialmente para zonas sujeitas a menos esforços (funções mecânicas). Esses sistemas radiculares devem ser compostos por maior percentagem de raízes finas (até 5,0 mm de diâmetro), uma vez que plantas com sistemas radiculares laterais e com maior percentagem de área ocupada por raízes finas são mais eficientes a diminuir as taxas de erosão superficial e a perda de solo, que plantas com sistemas radiculares estruturados verticalmente com raízes pivotantes.

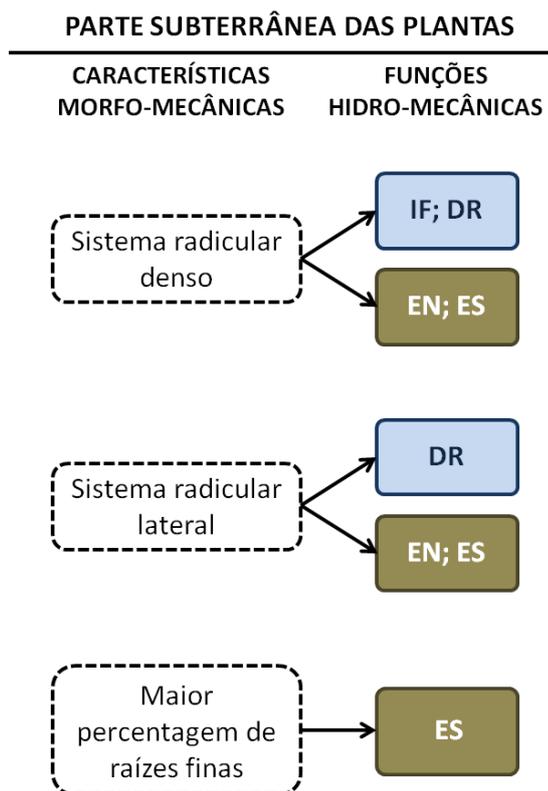


Figura 25 - Características morfo-mecânicas da parte subterrânea para controle de erosão superficial. Legenda: **Função Hidrológica** (azul): Infiltrar - IF; Drenar - DR.

Função Mecânica (marron): Estruturar - ES; Encaminhar - EN.

4.4.2 Estabilização geotécnica

A estabilização geotécnica envolve soluções construtivas para correção de problemas de perda de capacidade de suporte do solo, em que há necessidade de estabilização em profundidade. Inclui intervenções para estabilização de taludes naturais ou artificiais, estruturas de contenção, erosão profunda, entre outros.

As plantas escolhidas para este tipo de aplicação devem apresentar um conjunto de características morfo-mecânicas que ajudem a estabilizar solos em profundidade, tendo em consideração que a vegetação como material construtivo se for aplicada isoladamente (ou seja, sem ser combinada com materiais construtivos inertes) tem limites em relação ao seu desenvolvimento em profundidade. Autores como Schiechl (1990) e Carbonari e Mezzanotte (1993, apud VENTI et al., 2003) indicam uma profundidade máxima de ação de 3,5 m para material vivo. Em problemas de estabilização geotécnica as características morfo-mecânicas mais importantes dizem respeito ao desenvolvimento do sistema radicular.

No que diz respeito às características morfo-mecânicas da parte aérea (Figura 26), as plantas escolhidas devem ter copas densas de forma a interceptar e evapotranspirar, funções hidrológicas que têm ação na diminuição do volume de escoamento superficial e na redução do peso do solo. As copas também devem ser ramificadas, porque assim são mais eficazes a absorver movimentos de massa (blocos, rochas, ou outros materiais instáveis), e a encaminhar mecanicamente solicitações sobre o solo, provenientes da água, do vento e de ações antrópicas.

Ao mesmo tempo as copas devem ser baixas, que evitam a transmissão de forças mecânicas solicitantes aos taludes, pelo vento e/ou gravidade. Apesar disso não se exclui a utilização de árvores com copas altas, mas as mesmas requerem mais cuidados na sua implantação e manutenção, ou seja, não devem ser implantadas no topo dos taludes pois causam sobrecarga e requerem mais manutenção pois devem ser periodicamente podadas para evitar o crescimento excessivo.

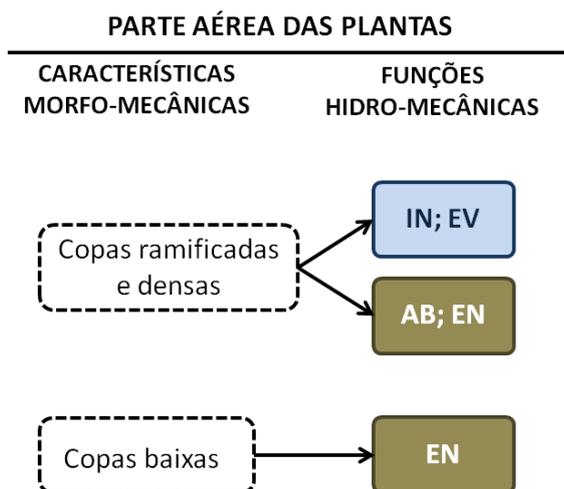


Figura 26 - Características morfo-mecânicas da parte aérea para estabilização geotécnica.

Legenda: **Função Hidrológica** (azul): Interceptar - IN; Evapotranspirar - EV.

Função Mecânica (marron): Encaminhar – EN; Absorver - AB.

As características morfo-mecânicas da parte subterrânea (Figura 27) são extremamente importantes para a estabilização geotécnica de solos. Os sistemas radiculares devem ser densos e profundos para potencializarem a drenagem subsuperficial e profunda para camadas profundas e áreas menos saturadas (funções hidrológicas). Mecanicamente as raízes densas e mais longas funcionam como tirantes, ajudando a estruturar as camadas de solo, através da ancoragem, arqueamento e escoramento do solo, bem como a encaminhar forças mecânicas para que as mesmas sejam redistribuídas para zonas sujeitas a menos esforços e para camadas de solo profundas que são mais competentes que as camadas superficiais. Esses sistemas radiculares devem ser compostos por raízes com alta resistência à tração, que funcionam como sistemas de reforço de solo, aumentando a resistência do solo ao cisalhamento.

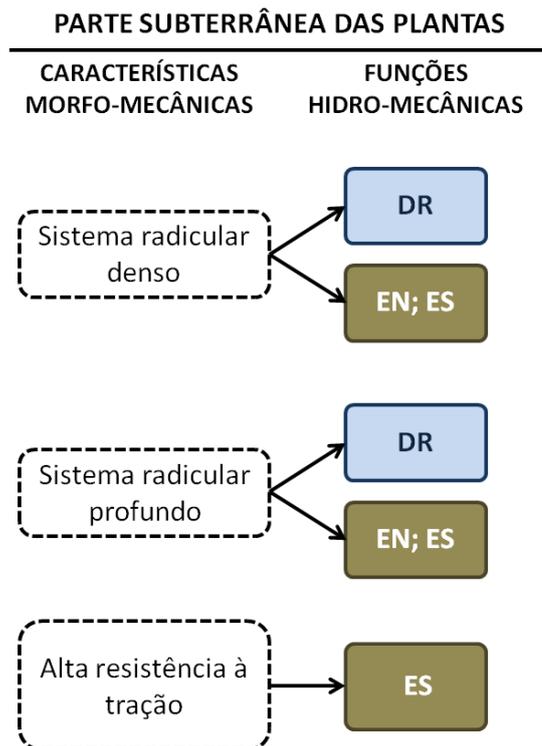


Figura 27 - Características morfo-mecânicas da parte subterrânea para estabilização geotécnica. Legenda: **Função Hidrológica** (azul): Drenar - DR. **Função Mecânica** (marron): Estruturar - ES; Encaminhar - EN.

4.4.3 Estabilização hidráulica

A estabilização hidráulica diz respeito a soluções construtivas que corrijam problemas relacionados com corpos de água naturais ou artificiais, como rios, córregos, lagos, barragens, entre outros e inclui a estabilização de taludes fluviais e leitos de cursos de água solicitados por ação mecânica da água.

As características morfo-mecânicas da parte aérea (Figura 28) são extremamente importantes para absorver solicitações mecânicas provenientes do fluxo de água. As plantas escolhidas devem ser flexíveis servindo de barreira física de proteção do solo contra o fluxo de água. Além disso, plantas flexíveis não obstruem tanto a seção de escoamento dos canais, que em caso de vazões elevadas em áreas urbanas poderá causar inundações nas áreas adjacentes. As copas devem ser ramificadas e densas de forma a interceptar e evapotranspirar a água proveniente da precipitação (funções hidrológicas). Copas ramificadas e densas também

abovem e encaminham tensões provenientes do fluxo de água, aumentando a rugosidade hidráulica e por isso, diminuindo a velocidade da água (funções mecânicas). As plantas devem apresentar uma cobertura uniforme do solo, característica importante para interceptar e absorver, uma vez que plantas isoladas além de não serem adequadas para interceptar, provocam fenômenos de turbulência localizada, particularmente graves no caso da estabilização hidráulica. Como complemento à rugosidade hidráulica, pode-se usar preferencialmente plantas perenifólias que apresentam folhas durante todo o ano que potencializam funções hidrológicas de interceptação e evaporação (funções hidrológicas) e ainda, promovem valores mais altos de rugosidade, sendo mais eficientes na diminuição da velocidade do fluxo (função mecânica), aumentando a quantidade de sedimentos retidos e removidos do fluxo de água. No entanto, plantas caducifólias não devem ser excluídas, uma vez que se apresentarem copas densas e ramificadas, desempenham as mesmas funções técnicas que copas perenifólias.

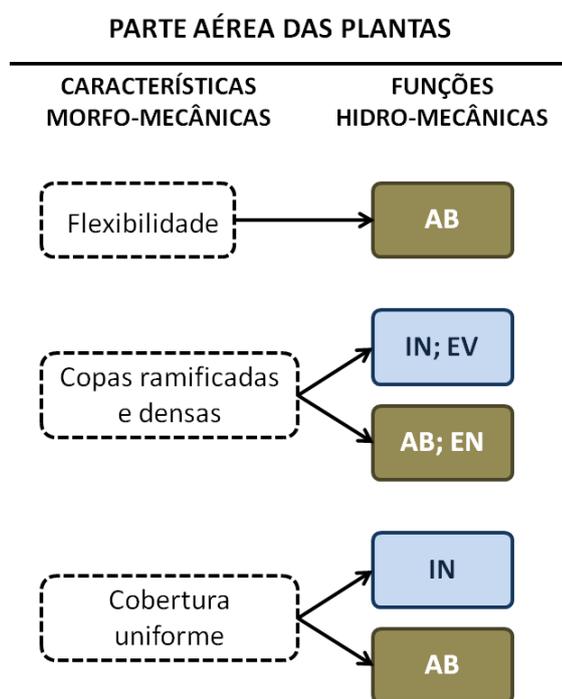


Figura 28 - Características morfo-mecânicas da parte aérea para estabilização hidráulica.

Legenda: **Função Hidrológica** (azul): Interceptar - IN; Evapotranspirar - EV.

Função Mecânica (marron): Absorver - AB; Encaminhar - EN.

No que diz respeito às características morfo-mecânicas subterrâneas (Figura 29), as plantas devem ter sistemas radiculares densos e laterais que potencializem a drenagem subsuperficial (funções hidrológicas), para áreas menos saturadas. Este tipo de arquitetura radicular ajuda a estruturar mecanicamente as camadas superficiais de solo, bem como a encaminhar forças mecânicas para que as mesmas sejam redistribuídas para zonas sujeitas a menos esforços. No caso particular de taludes fluviais, sistemas radiculares densos são muito importantes, pois funcionam como uma manta ou esteira que estrutura e confina o solo, e o protege absorvendo as forças hidráulicas do fluxo de água. Esses sistemas radiculares devem ser compostos por raízes com alta resistência à tração, que funcionam como sistemas de reforço do solo, aumentando a resistência do solo ao cisalhamento.

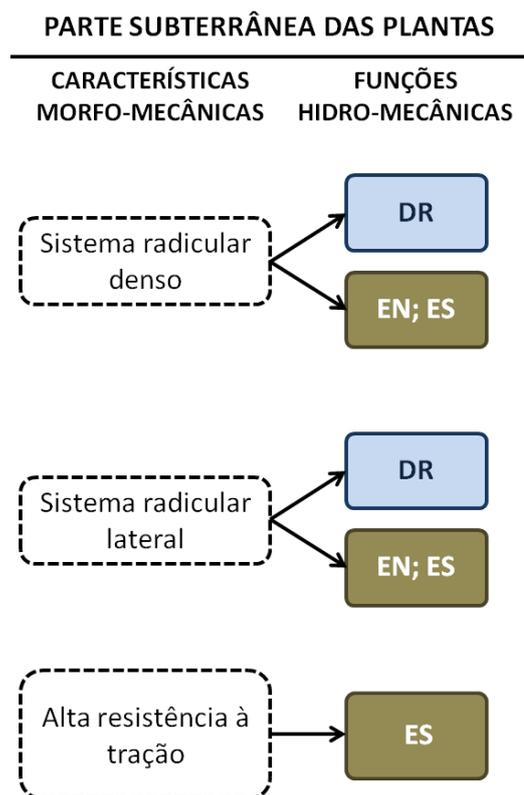


Figura 29 - Características morfo-mecânicas da parte subterrânea para estabilização hidráulica.

Legenda: **Função Hidrológica** (azul): Drenar - DR.

Função Mecânica (marron): Estruturar - ES; Encaminhar - EN.

4.4.4 Fluxograma geral

Com base nas características morfo-mecânicas da parte aérea e subterrânea inerentes à vegetação e respectivas funções hidrológicas e mecânicas vistas e descritas anteriormente, foi elaborado um fluxograma geral de especificação para recomendar as características das plantas a serem utilizadas na solução de problemas de controle de erosão superficial, estabilização geotécnica e estabilização hidráulica como se pode observar na Figura 30.

A escolha das plantas também deve obedecer a um conjunto de requisitos determinados pelos fatores edafo-climáticos, ecológicos, formas de uso das plantas, especificidades da solução construtiva e do local de aplicação. O cumprimento destes requisitos resulta no sucesso da implantação das plantas.

Para todos os campos de aplicação devem ser considerados requisitos edafo-climáticos e ecológicos.

Especificamente no caso de controle de erosão são considerados requisitos como índice de área foliar alto que irá potencializar a interceptação e evapotranspiração; e folhas pequenas uma vez que estas não concentram a água interceptada em gotas de grande dimensão provocando maior impacto mecânico quando atingem o solo.

No caso de estabilização geotécnica são importantes requisitos como índice de área foliar alto que irá potencializar a interceptação e evapotranspiração; capacidade de propagação vegetativa, que é valorizada por grande parte das soluções construtivas em Engenharia Natural; e tolerância ao aterramento, apedrejamento e à exposição parcial das raízes e capacidade de rebrota, porque solos instáveis são muitas vezes susceptíveis à ocorrência de deslizamentos de solos e quedas de blocos rochosos, o que pode originar a quebra do ápice ou aterramento da parte aérea das plantas e exposição das raízes.

Para estabilização hidráulica são essenciais requisitos como capacidade de propagação vegetativa, que é valorizada por grande parte das soluções construtivas em Engenharia Natural; tolerância ao apedrejamento e capacidade de rebrota, porque nestes casos as plantas muitas vezes estão expostas a materiais sólidos que são arrastados pelo fluxo de água, e que podem quebrar o ápice das mesmas; tolerância à exposição parcial das raízes, uma vez que o fluxo de água pode erodir e

transportar o solo. Algumas das espécies utilizadas para estabilização hidráulica ficam em contato direto com a água, submersas por períodos de tempo mais ou menos longos, e nesses casos é essencial que as mesmas apresentem resistência à submersão.

É importante salientar que a melhor solução para um problema específico normalmente resulta da combinação de várias espécies, uma vez que mesmo que se consigam reunir numa única espécie as características morfo-mecânicas de onde resultem todas as funções técnicas hidrológicas e mecânicas necessárias, dessa combinação de espécies advêm outras vantagens. Por exemplo, diferentes espécies têm tempos de desenvolvimento e adaptação distintos, assim, ao combinarmos espécies sabemos que algumas colonizarão e se adaptarão mais rapidamente ao local, dando mais tempo para as outras mais lentas se desenvolverem. Outra vantagem é que as plantas apresentam requisitos edafo-climáticos, que apesar de serem determinantes na escolha adequada da espécie, podem sofrer alterações, uma vez que na natureza estas condições não podem ser controladas artificialmente. Assim ao combinarmos diversas espécies, se existir uma oscilação nas condições edafo-climáticas, teremos algumas espécies naturalmente mais resistentes a estas mudanças que conseguirão sobreviver. O mesmo pode acontecer decorrente da ação de uma praga ou agente patogênico.

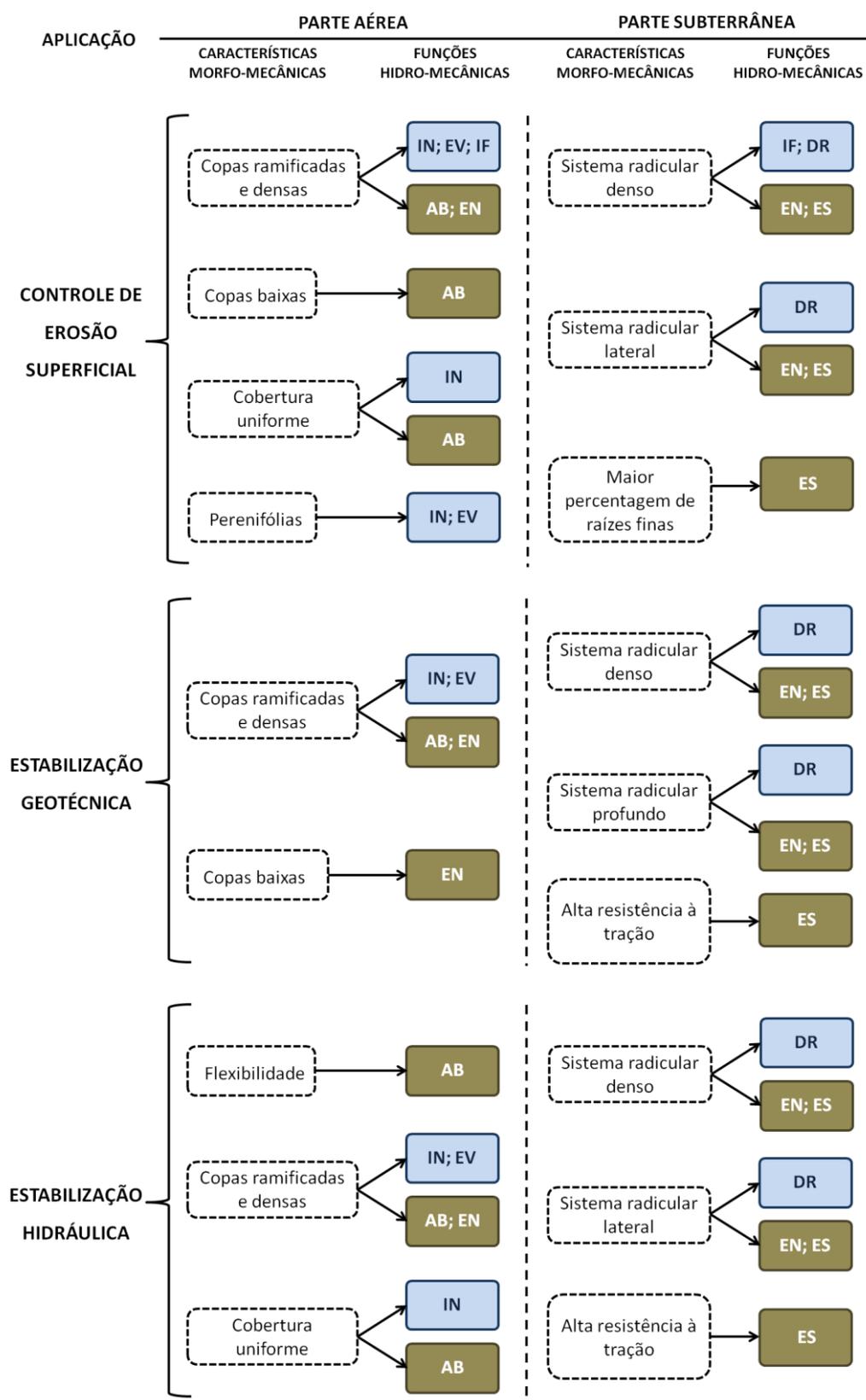


Figura 30 - Fluxograma de características morfo-mecânicas segundo tipologia de problema.

Legenda: **Função Hidrológica** (azul): Interceptar - IN; Evapotranspirar - EV; Infiltrar - IF; Drenar - DR. **Função Mecânica** (marron): Estruturar - ES; Absorver - AB; Encaminhar - EN.

5. APLICAÇÃO PRÁTICA DA METODOLOGIA PROPOSTA

Definidas as características morfo-mecânicas que as plantas devem apresentar para resolver um problema específico, e utilizando como base a metodologia proposta no capítulo anterior, foi produzida uma ficha técnica que compile toda a informação necessária para a identificação do potencial de aplicação de uma determinada espécie em intervenções de Engenharia Natural em obras de infraestrutura. No entanto, a metodologia proposta pode ter outras aplicações práticas, como por exemplo, trabalhos de pesquisa ou implementação de intervenções de Engenharia Natural de menor responsabilidade técnica.

Na ficha técnica constam todas as informações necessárias, estruturadas de forma simplificada, que possam ser utilizadas pelos diversos profissionais que trabalham na área.

O especialista em botânica recorre a informações referentes à descrição morfológica, fotografias, desenhos botânicos, distribuição geográfica e biologia reprodutiva, que ajudam na identificação da espécie, bem como a sua amplitude de ocorrência natural.

O engenheiro e/ou projetista, com base num problema específico que necessita ser corrigido, utiliza informação que trata a planta do ponto de vista de material construtivo, como os campos de aplicação, as funções técnicas hidrológicas e mecânicas e adicionais, o mapa, a ecologia e o tipo de intervenção em que se pode utilizar a espécie. Esses tópicos são determinantes na escolha das espécies mais adequadas à resolução do problema.

O paisagista, o biólogo ou o ecologista usam dados como as funções adicionais, a ecologia da espécie e o mapa, que definem a aplicabilidade de uma determinada planta num habitat e local específico, bem como o seu valor ecológico, ambiental ou estético.

O viveirista, com base nas informações sobre a biologia reprodutiva da espécie pode produzir e saber qual a época ideal para reproduzir as plantas, uma vez que vai ter dados sobre as formas de propagação e uso de cada espécie.

Toda a informação compilada neste formato de ficha técnica será de fácil acesso e está integrada de forma a beneficiar todos os intervenientes nas várias fases de uma obra de Engenharia Natural.

Apesar dessa informação ter sido desenvolvida e compilada para obras de infraestrutura, que exigem maior rigor técnico atribuído às plantas, a mesma pode ser utilizada para obras pequenas, de menor responsabilidade técnica onde os riscos associados à falha estrutural da intervenção são pequenos e não envolvem perdas humanas, econômicas ou ambientais.

As fichas técnicas produzidas podem ser organizadas posteriormente para elaboração de um catálogo de espécies com potencial para serem utilizadas em Engenharia Natural.

Em seguida são apresentados e descritos os tópicos que serão incluídos na ficha técnica. Desses tópicos resulta um modelo de ficha técnica como se pode verificar na Figura 31.

5.1 Ficha técnica

Identificação

A primeira informação constante desta ficha técnica deve ser referente à identificação da espécie, ou seja, conhecer seu nome científico e a família botânica. Poderão também ser indicados os nomes populares mais comuns.

Descrição Morfológica

Apresentam-se as características morfológicas mais importantes e úteis para identificação prática das espécies. Disponibilizam-se de forma concisa as características mais importantes a considerar no reconhecimento da espécie, ou seja, as propriedades básicas na leitura de um botânico. Será apresentada a forma biológica (hábito da planta), forma da copa e ramificações, forma do tronco, perene ou caduca, altura, folhas, flores, frutos, sementes, entre outras características

pertinentes para identificação. Associada a esta informação deverão ser incluídas fotografias ou desenhos botânicos representativos da espécie.

Biologia Reprodutiva

É indicada a fenologia da espécie quanto aos períodos de floração e maturação dos frutos. É apresentada qual a forma de reprodução da espécie (reprodução seminal ou propagação vegetativa). Assim, poderão ser definidas as formas de uso de cada espécie (sementes, estacas vivas ou plantas enraizadas).

Distribuição e Ecologia

Disponibiliza-se um mapa que mostra a distribuição geográfica geral da espécie. A acompanhar o mapa apresenta-se o domínio fitogeográfico (bioma) de onde a espécie é característica.

A ecologia da espécie diz respeito às condições do habitat da espécie como por exemplo, clima, umidade (higrófito ou xerófito), luminosidade (heliófito ou esciófila), tipo de solo, associações com outras plantas, ou qualquer outra informação essencial para a compreensão sobre o habitat da espécie. Esta informação está associada aos requisitos de cada espécie.

Associada a esta informação, serão apresentados dois esquemas de seções transversais (talude seco e talude fluvial), onde será representada a localização ideal para aplicação de cada espécie.

Funções Técnicas Hidrológicas e Mecânicas

Apresenta de forma simplificada as características morfo-mecânicas que desempenham funções hidrológicas ou mecânicas, ou seja, as propriedades básicas na leitura de um engenheiro ou outro técnico sem conhecimentos de botânica.

Campos de Aplicação

Serão indicados quais os campos de aplicação da espécie, considerando três grupos principais: controle de erosão superficial, estabilização geotécnica e estabilização hidráulica.

Funções Adicionais

Serão descritas as funções adicionais das plantas, sejam elas de carácter ecológico-ambiental, estético ou socio-econômico.

Tipo de Intervenção

Uma vez que as intervenções com técnicas de Engenharia Natural apresentam variadas tipologias construtivas que combinam material inerte com material vivo, e algumas dependem da forma de uso do material vivo (sementes, estacas vivas ou plantas enraizadas), serão elencadas as técnicas para qual a espécie é considerada adequada.

| Nome Científico Nome Popular | Família |
|--|-------------------------------------|
| Descrição Morfológica | Fotografias e/ou desenhos botânicos |
| Biologia Reprodutiva | Mapa |
| Funções Técnicas (Hidrológicas e Mecânicas) | Domínio Fitogeográfico |
| Campos de Aplicação | Ecologia |
| Funções Adicionais | Local de Aplicação |
| | Tipo de Intervenção |

Figura 31 - Modelo representativo da ficha técnica.

Com base no modelo proposto foram elaboradas fichas técnicas para cinco espécies vegetais utilizadas em intervenções de Engenharia Natural no Brasil. Estas fichas servirão de exemplo prático da aplicação da classificação e reestruturação de funções técnicas hidrológicas e mecânicas e funções adicionais, que culminam no desenvolvimento do procedimento de especificação técnica da vegetação.

5.2 Exemplificação da metodologia proposta

Para exemplificação prática da metodologia proposta nesta dissertação, e seguindo os conceitos, definições e estruturação propostas para classificar as plantas do ponto de vista de material construtivo, foram elaboradas fichas técnicas para cinco espécies vegetais brasileiras com potencial biotécnico reconhecido para serem utilizadas em intervenções de Engenharia Natural.

As espécies escolhidas apresentam distribuição geral no Brasil e são características de distintos biomas. Propõem-se o desenvolvimento de fichas técnicas para as seguintes espécies:

- *Calliandra brevipes* Benth.
- *Phyllanthus sellowianus* (Klotzsch) Müll. Arg.
- *Salix humboldtiana* Willd.
- *Sebastiania schottiana* (Müll. Arg.) Müll. Arg.
- *Senna reticulata* (Willd.) H.S.Irwin & Barneby

Os critérios de seleção destas cinco espécies foram que todas as espécies são autóctones do Brasil e apresentam potencial biotécnico reconhecido. As espécies escolhidas têm características morfo-mecânicas distintas que lhe conferem por isso, diferentes funções técnicas (por exemplo, *Salix humboldtiana* apresenta raízes profundas, o que lhe confere maior potencial para estruturar camadas mais profundas de solo que as outras espécies consideradas). As formas de reprodução também são distintas, e isso tem influência no tipo de intervenção para a qual são adequadas (por exemplo, *Calliandra brevipes* tem reprodução preferencial por semente, o que faz com que não deva ser aplicada em soluções construtivas que

necessitem de espécies com alta capacidade de propagação vegetativa). A ecologia das espécies também é distinta, bem como o porte (arbustivo ou arbóreo) das mesmas, e isso condiciona os locais de aplicação, (por exemplo, espécies com resistência à submersão podem ser aplicadas junto à água, espécies com porte arbóreo não devem ser aplicadas no topo dos taludes pois causam sobrecarga).

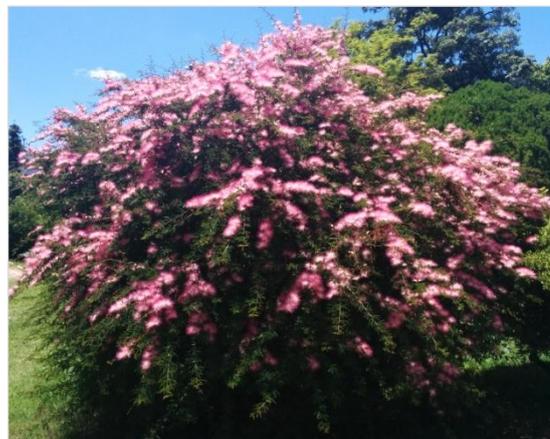
A distribuição geográfica, bem como o domínio fitogeográfico também são diferentes para as espécies consideradas (por exemplo, a *Senna reticulata* tem maior amplitude de distribuição geográfica).

Os mapas de distribuição geográfica foram elaborados a partir do banco de registros botânicos georreferenciados, disponível no projeto denominado “Sistema de Informação Distribuído para Coleções Biológicas: a Integração do Species Analyst e do SinBiota (FAPESP)” ou simplesmente speciesLink (KETTENHUBER, 2014). Este projeto tem por objetivo integrar a informação primária sobre biodiversidade que está disponível em museus, herbários e coleções microbiológicas, tornando-a disponível, de forma livre e aberta na internet. O domínio fitogeográfico foi feito com base na informação disponível na Flora do Brasil, bem como nos mapas de distribuição geográfica.

É importante salientar que faltam informações relativas a algumas destas espécies, do ponto de vista da engenharia, nomeadamente valores de resistência à tração das raízes, bem como da profundidade de alcance das mesmas. Isto ocorre exatamente por falta de uma metodologia, até então, que trate as plantas do ponto de vista de material construtivo. Os pesquisadores têm carência acerca das informações que devem pesquisar considerando o potencial biotécnico da vegetação. Isso é um dos pontos que se pretende corrigir com a elaboração deste trabalho.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

Arbusto inerme, de até 2 m de altura, glabro e muito ramificado. Apresenta folhas alternas, bipinado-unijugas, com pecíolo curto (2 mm) e estípulas estriadas muito pequenas (1,5 mm). Os folíolos, em 15 a 45 pares por pina, são lineares (de 2 a 6 mm de comprimento por cerca de 1 mm de largura), muito aproximados entre si, glabros, discolores, brilhantes e providos de nervura principal centrada no limbo. As flores, com estames conspícuos (2 a 4 cm), brancos na metade inferior e rosados ou igualmente brancos na superior, reúnem-se em capítulos axilares solitários, dispostos na extremidade de um pedúnculo, com cerca de 1 cm de comprimento. Os legumes são lineares, glabros, eretos nos ramos e de cor castanha, variando de 4 a 8 cm de comprimento por cerca de 6 mm de largura, com sementes ovais e obliquamente dispostas.

**BIOLOGIA REPRODUTIVA**

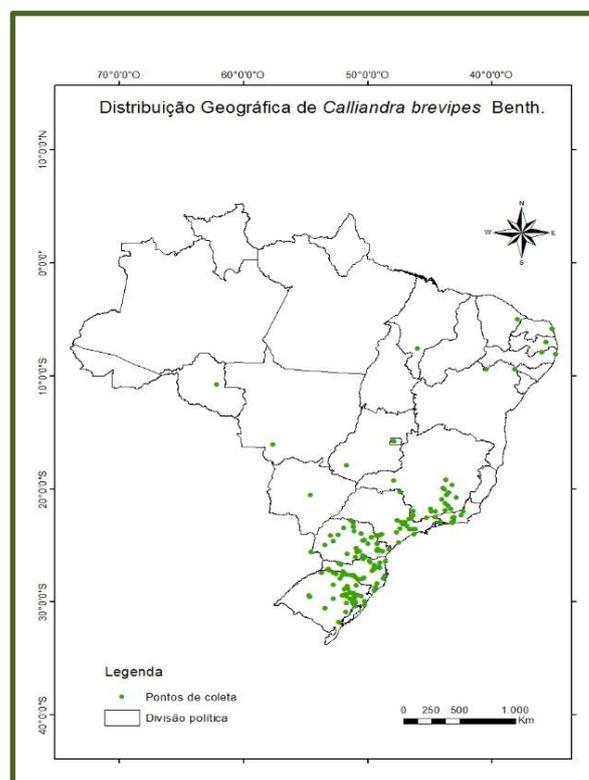
Floração: Outubro a Março

Frutificação: Verão e Outono

Reprodução: Preferencialmente por semente (origina plantas mais vigorosas), mas também se reproduz por estaca.

DOMÍNIO FITOGEOGRÁFICO

Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica e Pampa.



FUNÇÕES TÉCNICAS

Copas muito ramificadas e densas (IN, EV, IF, AB, EN), flexíveis (AB) e baixas (AB). Espécie perenifólia (IN, EV) que apresenta cobertura uniforme (IN, AB).

Sistema radicular denso e lateral (DR, EN, ES).

Não existem informações referentes à resistência à tração das raízes.

(Função Hidrológica: Interceptar - IN; Evapotranspirar - EV; Infiltrar - IF; Drenar - DR. **Função Mecânica:** Estruturar - ES; Absorver - AB; Encaminhar – EN)

CAMPOS DE APLICAÇÃO

Espécie usada para estabilização hidráulica nas margens de cursos de água ou barragens.

Apesar do seu sistema radicular não ser profundo pode ser utilizada para estabilização geotécnica desde que a superfície crítica de deslizamento não ultrapasse 0,80 m de profundidade.

Também pode ser utilizada para controlar a erosão superficial.

Em qualquer tipologia de problema deve ser dada preferência à sua utilização em forma de mudas.

FUNÇÕES ADICIONAIS

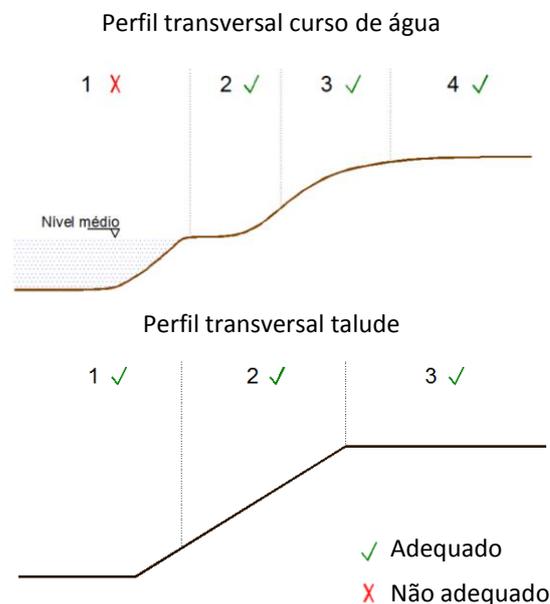
Espécie autóctone com elevado valor ecológico e ambiental para restauração da mata ciliar, promoção da conectividade ecológica e hidráulica de cursos de água.

Planta ornamental devido à sua folhagem e abundante floração em diversas épocas do ano.

ECOLOGIA

Calliandra brevipes pertence ao grupo das reófilas, habitando naturalmente locais úmidos e margens de rios. Espécie de pequeno porte, provida de troncos delgados e flexíveis, morfologicamente adaptados à reofilia. Participa da vegetação dos “sarandis”, juntamente com *Pouteria salicifolia*, *Terminalia australis*, *Sebastiania schottiana* e *Phyllanthus sellowianus*.

Espécie heliófila, por isso deve ser cultivada sempre a pleno sol.

LOCAL DE APLICAÇÃO**TIPO DE INTERVENÇÃO**

Banqueta vegetada; Enrocamento vivo; Grade viva; Parede krainer.

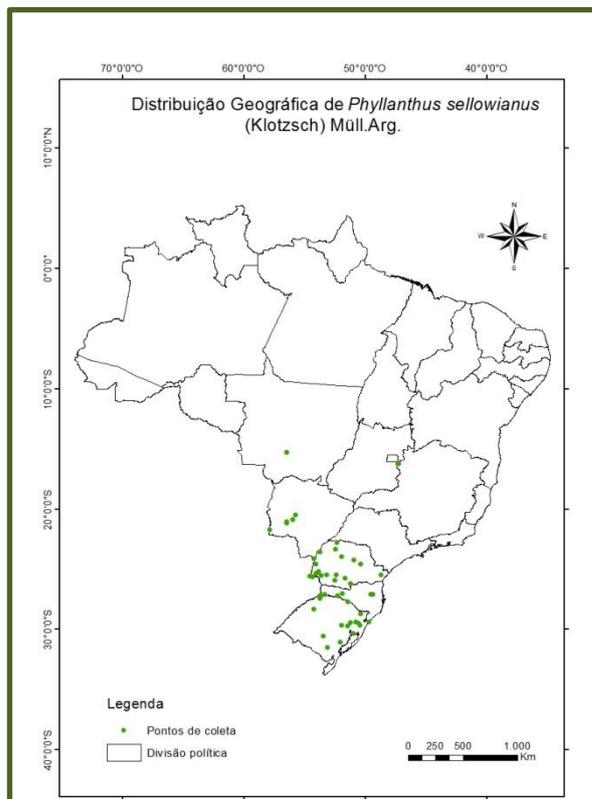
***Phyllanthus sellowianus* (Klotzsch) Müll. Arg.**

Sarandi, sarandi-branco, sarandi-vermelho

Phyllanthaceae

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

Arbusto de 2 a 3 m de altura, caducifólio, glabro, de ramos compridos, muito divididos, com folhas reduzidas e escamas perto dos ápices. Os ramos são delgados, sinuosos e angulados. Possui estípulas decíduas, estreito-triangulares, com 2 mm de comprimento e margens escariosas. Folhas simples, alternas, discolores, glabras, papiráceas, lâminas lanceoladas a elíptico-lanceoladas, de 1,5 a 5 cm de comprimento e 0,4 a 1 cm de largura, nervura principal marcada, larga, ápice agudo mucronado, margem inteira base cuneada e pecíolos muito curtos. Possui uma característica especial: suas flores nascem na base das folhas, vindo daí o nome: *phyllos* (folhas) e *anthos* (flor). As flores, dioicas, estão dispostas em forma separada em inflorescências fasciculadas axilares. Apresenta cálice com 5-6 peças e corola ausente, amarelo-esbranquiçadas, as flores masculinas possuem pedúnculos mais longos, com 3 estames, e as femininas ovário subgloboso, multiovulado. O fruto é do tipo cápsula deprimido-globosa com 2,5 mm de diâmetro. As sementes são quase lisas e com tamanho pouco mais de 1 mm.

**BIOLOGIA REPRODUTIVA**

Floração: Setembro a Dezembro

Frutificação: Novembro a Março

Reprodução: Estaca e Semente

DOMÍNIO FITOGEOGRÁFICO

Mata Atlântica e Cerrado

FUNÇÕES TÉCNICAS

Copas flexíveis (AB), ramificadas (IN, EV, AB, EN), e baixas (AB).

Sistema radicular denso e lateral (DR, EN, ES), com resistência à tração (ES), de 1764 N (após 1 ano de crescimento), com maior percentagem de raízes finas (ES).

(Função Hidrológica: Interceptar - IN; Evapotranspirar - EV; Infiltrar - IF; Drenar - DR. Função Mecânica: Estruturar - ES; Absorver - AB; Encaminhar – EN)

CAMPOS DE APLICAÇÃO

Espécie muito adequada para resolver problemas de estabilização hidráulica, nas margens e leito de cursos de água ou barragens. Também pode ser utilizada para resolver problemas de controle de erosão superficial (devem no entanto ser utilizadas densidades altas de plantio).

Apesar do seu sistema radicular não ser profundo pode ser utilizada para estabilização geotécnica desde que a superfície crítica de deslizamento não ultrapasse 0,80 m de profundidade.

FUNÇÕES ADICIONAIS

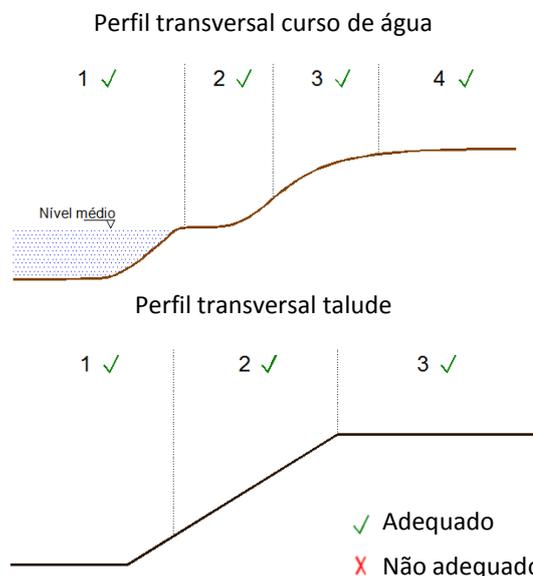
Espécie autóctone com elevado valor ecológico e ambiental para restauração da mata ciliar, promoção da conectividade ecológica e hidráulica de cursos de água e da estabilidade térmica da água. Criação de refúgios para a ictiofauna.

Custos de reprodução baixos, pois a sua propagação vegetativa apresenta percentual de pega superior a 90 %. Serve como fonte de produção primária de material vegetal para outras obras.

ECOLOGIA

Espécie altamente adaptada à reofilia, localizada de forma descontínua e irregular ao longo das margens ou ilhas dos rios. Desenvolve-se preferencialmente nos locais de corredeiras e cachoeiras dos rios, onde são observados no leito muitos blocos rochosos. Heliófita e seletiva higrófila até xerófila, adaptada às variações extremas de umidade e estio, muito frequente. Normalmente está associada juntamente com *Sebastiania schottiana*, *Terminalia australis*, *Calliandra selloi*.

LOCAL DE APLICAÇÃO



TIPO DE INTERVENÇÃO

Estacaria viva; Entrançado vivo; Feixes vivos, Esteira viva; Banqueta vegetada; Enrocamento vivo; Defletores; Grade viva; Parede krainer; Gabião vivo; Terra reforçada; Barragem de correção torrencial.

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

Árvore de porte médio, com altura variável entre 12 a 20 m, perene, com tronco reto, inclinado ou tortuoso, de 40 a 60 cm de diâmetro, podendo chegar até 90 cm de diâmetro, copa ampla, de ramificação ascendente. A casca, espessa e com profundas fissuras, é dura e castanho-acinzentada. As folhas são simples, alternas, linear-lanceoladas, glabras, caducas, margem serrada, com nervura central proeminente, alcançam até 15 cm de comprimento por 1,5 cm de largura.

Apresenta flores com coloração amarela que são unissexuais e aperiantadas reunindo-se em amentilhos pendentes na extremidade dos ramos novos. As sementes, muito pequenas, apresentam um tufo de pelos sedosos esbranquiçados, responsáveis pela dispersão anemocórica.



BIOLOGIA REPRODUTIVA

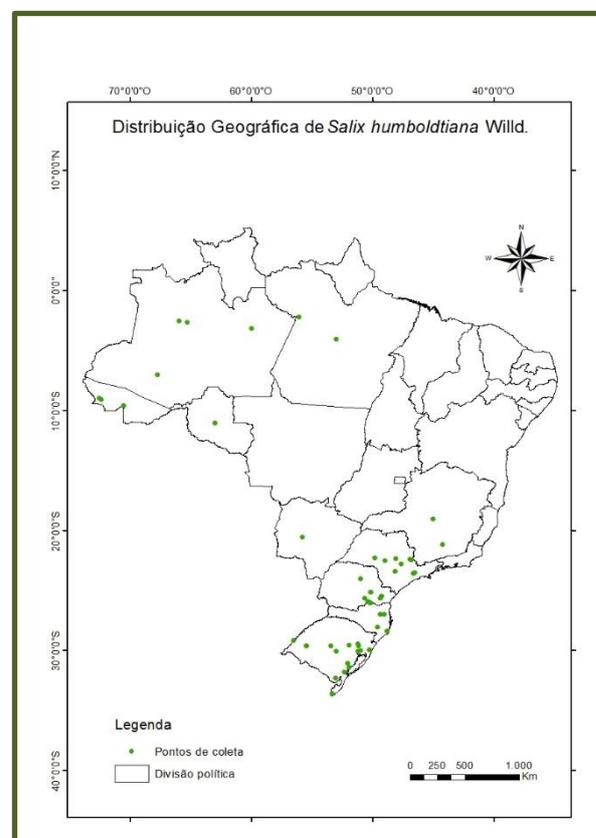
Floração: Julho a Novembro

Frutificação: Dezembro a Abril

Reprodução: Estaca e Semente

DOMÍNIO FITOGEOGRÁFICO

Amazônia, Mata Atlântica e Pampa



FUNÇÕES TÉCNICAS

Copa ramificada e densa (IN, EV, IF, AB, EN), flexível (AB), e perenifólia (IN, EV).

Sistema radicular denso (IF, DR, EN, ES) e profundo (IF, DR, EN, ES), com resistência à tração (ES), de 2000 N (após 9 meses de crescimento).

(Função Hidrológica: Interceptar - IN; Evapotranspirar - EV; Infiltrar - IF; Drenar - DR. Função Mecânica: Estruturar - ES; Absorver - AB; Encaminhar - EN)

CAMPOS DE APLICAÇÃO

Espécie muito adequada para estabilização geotécnica, uma vez que apresenta raízes que promovem ancoragem profunda, escoramento e arqueamento do solo. Devido ao seu porte arbóreo não deve ser implantado no meio ou topo dos taludes pois causa sobrecarga. A sua utilização requer manutenção com podas periódicas para evitar o crescimento excessivo.

Pode ser utilizada para estabilização hidráulica nas margens e leito de cursos de água ou barragens. Também pode ser utilizada para controlar a erosão superficial.

FUNÇÕES ADICIONAIS

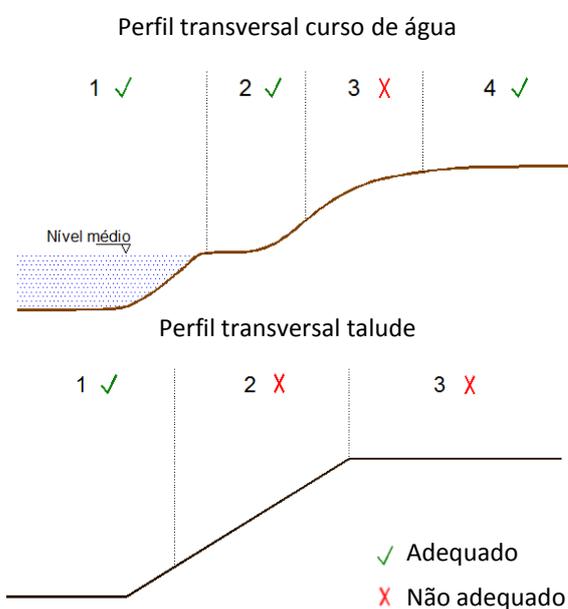
Espécie autóctone com elevado valor ecológico e ambiental para restauração da mata ciliar e promoção da conectividade ecológica e hidráulica de cursos de água e da estabilidade térmica da água. Criação de refúgios para a ictiofauna.

Custos de reprodução baixos, pois a sua propagação vegetativa apresenta percentual de pega superior a 90 %. Serve como fonte de produção primária de material vegetal para outras obras.

ECOLOGIA

Espécie heliófila, seletiva higrófila e pioneira. Espécie muito difundida em áreas de solos ainda não estruturados, solos muito úmidos e de elevada profundidade. Ocorre em solos lodosos e profundos, com textura que varia de arenosa a areno-argilosa, com lençol freático elevado.

Ocorre naturalmente ao longo de rios e canais e pode permanecer em áreas inundáveis por vários meses seguidos submersa, mas sempre associada com água corrente.

LOCAL DE APLICAÇÃO**TIPO DE INTERVENÇÃO**

Estacaria viva; Entrançado vivo; Feixes vivos, Esteira viva; Banqueta vegetada; Enrocamento vivo; Defletores; Grade viva; Parede krainer; Barragem de correção torrencial.

***Sebastiania schottiana* (Müll. Arg.) Müll. Arg.**

Sarandi, amarelo, sarandi-de-espinho

Euphorbiaceae

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

Arbusto totalmente glabro de 3 a 3,5 m de altura, ramos longos, pouco ramificados, espinescentes e muito flexíveis. As folhas, simples, alternas, de pecíolo curto (2 a 4 mm), membranáceas e lanceoladas, variam de 1 a 5 cm de comprimento por 4 a 15 mm de largura, apresentando ápice obtuso ou brevemente agudo-mucronado, margem inteira com uma ou duas glândulas engrossadas inferiormente e base cuneado-estreita. Discolores e esbranquiçadas na face inferior, possuem de 7 a 10 nervuras secundárias evidentes em cada lado da principal. As flores, pequenas e amarelas, são produzidas em espigas terminais, sobre ramos muito curtos (1 a 2 cm), são unissexuais, sendo as femininas produzidas na base das espigas, e as masculinas, com três estâmes quase livres, no ápice. O fruto é uma cápsula globosa de aproximadamente 5 mm de diâmetro.

**BIOLOGIA REPRODUTIVA**

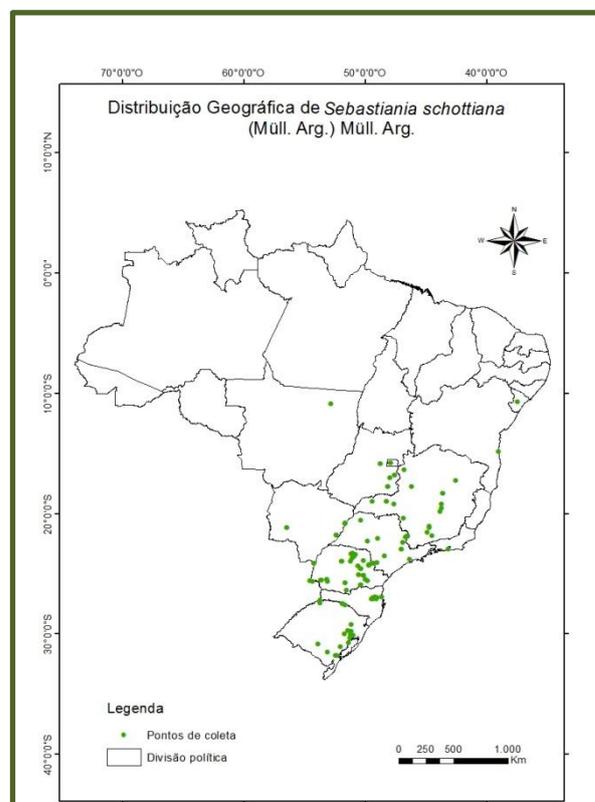
Floração: Setembro a Outubro

Frutificação: Novembro a Março

Reprodução: Estaca e Semente

DOMÍNIO FITOGEOGRÁFICO

Mata Atlântica, Cerrado e Caatinga



FUNÇÕES TÉCNICAS

Copas flexíveis (AB), ramificadas e densas (IN, EV, AB, EN), e baixas (AB).

Sistema radicular denso e lateral (DR, EN, ES), com resistência à tração (ES) de 632 N (após 1 ano de crescimento), com percentagem equilibrada de raízes grossas e finas (ES).

(**Função Hidrológica:** Interceptar - IN; Evapotranspirar - EV; Infiltrar - IF; Drenar - DR. **Função Mecânica:** Estruturar - ES; Absorver - AB; Encaminhar - EN)

CAMPOS DE APLICAÇÃO

Espécie muito adequada para resolver problemas de estabilização hidráulica, nas margens e leito de cursos de água ou barragens. Também pode ser utilizada para resolver problemas de controle de erosão superficial (devem no entanto ser utilizadas densidades altas de plantio).

Apesar do seu sistema radicular não ser profundo, pode ser utilizada para estabilização geotécnica desde que a superfície crítica de deslizamento não ultrapasse 0,80 m de profundidade.

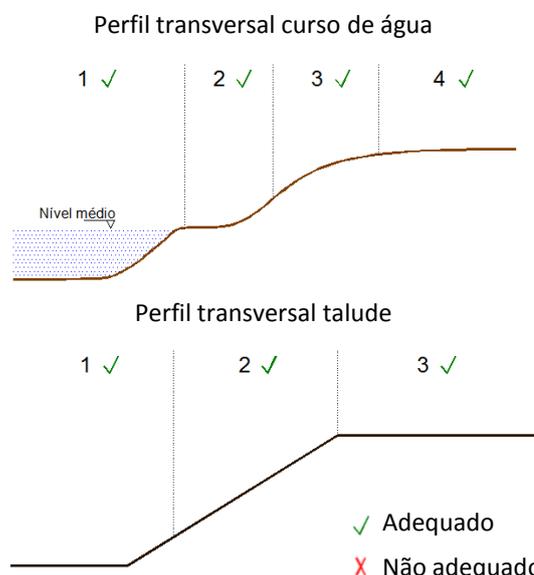
FUNÇÕES ADICIONAIS

Espécie autóctone com elevado valor ecológico e ambiental para restauração da mata ciliar, promoção da conectividade ecológica e hidráulica de cursos de água e da estabilidade térmica da água. Criação de refúgios para a ictiofauna.

Custos de reprodução baixos, pois a sua propagação vegetativa apresenta percentual de pega que pode ser superior a 90 %. Serve como fonte de produção primária de material vegetal para outras obras.

ECOLOGIA

Espécie altamente adaptada à reofilia, distribuída de forma descontínua e irregular ao longo das margens ou ilhas dos rios. Desenvolve-se preferencialmente nos locais de corredeiras e cachoeiras dos rios, onde são observados no leito muitos blocos rochosos. Heliófita e seletiva higrófila até xerófila, adaptada às variações extremas de umidade e estio muito frequente. Normalmente está associada juntamente com *Phyllanthus sellowianus*, *Terminalia australis* e *Calliandra brevipes*.

LOCAL DE APLICAÇÃO**TIPO DE INTERVENÇÃO**

Estacaria viva; Entrançado vivo; Feixes vivos, Esteira viva; Banqueta vegetada; Enrocamento vivo; Defletores; Grade viva; Parede krainer; Gabião vivo; Terra reforçada; Barragem de correção torrencial.

***Senna reticulata* (Willd.) H.S.Irwin & Barneby**

Maria-mole, mata-pasto

Fabaceae

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

Árvore de pequeno porte, com altura variando de 3 a 8 m, com diâmetro médio à altura do peito de 5,2 cm. Suas folhas possuem de 7 a 13 cm de comprimento por 2 a 4 cm de largura, articuladas, com folíolos longos de 9 a 12 pares, arredondados na base e no ápice, obtusos, mucronados, glabros em ambas as faces e finos. A inflorescência é racemosa, terminal ou axilar, com grandes flores de cor amarela. O fruto é um legume linear e longo, de 15 cm de comprimento por 2 cm de largura, fino, plano e glabro. A copa é bastante densa e ampla, com inúmeras ramificações partindo da base em ângulos irregulares.

**BIOLOGIA REPRODUTIVA**

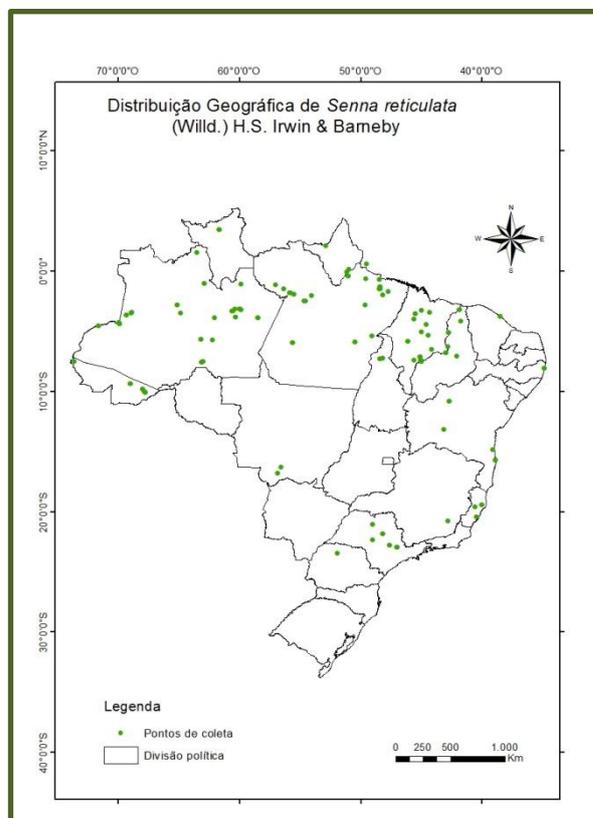
Floração: Maio a Julho

Frutificação: Junho a Agosto

Reprodução: Estaca e Semente

DOMÍNIO FITOGEOGRÁFICO

Mata Atlântica, Amazônia, Caatinga e Cerrado



***Senna reticulata* (Willd.) H.S.Irwin & Barneby**

Maria-mole, mata-pasto

Fabaceae

FUNÇÕES TÉCNICAS

Copas com boa flexibilidade (AB), altamente ramificadas e densas (IN, EV, AB, EN), e porte baixo (AB). Espécie perenifólia (IN, EV) que apresenta cobertura uniforme (IN, AB).

Sistema radicular denso e lateral (DR, EN, ES).

Não existem informações referentes à resistência à tração das raízes.

(Função Hidrológica: Interceptar - IN; Evapotranspirar - EV; Infiltrar - IF; Drenar - DR. Função Mecânica: Estruturar - ES; Absorver - AB; Encaminhar - EN)

CAMPOS DE APLICAÇÃO

Espécie adequada para resolver problemas de estabilização hidráulica, nas margens e leito de cursos de água ou barragens. Também pode ser utilizada para resolver problemas de controle de erosão superficial.

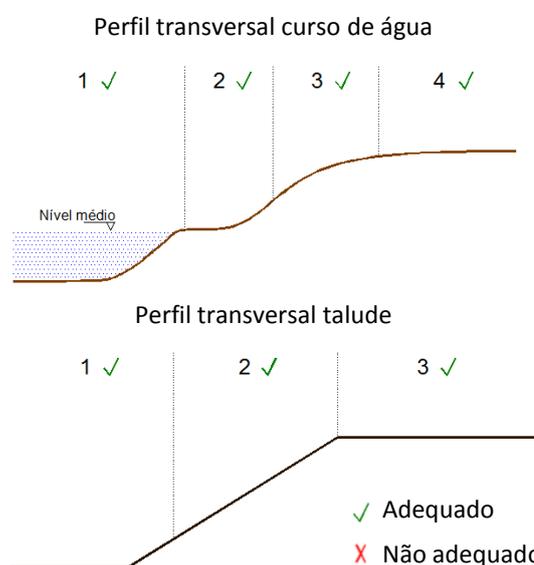
Pode ser utilizada para estabilização geotécnica, uma vez que apresenta sistema radicular denso, no entanto ainda não se conhece a profundidade de alcance das raízes.

FUNÇÕES ADICIONAIS

Espécie autóctone de valor ecológico e ambiental para restauração da mata ciliar, promoção da conectividade ecológica e hidráulica de cursos de água e da estabilidade térmica da água. Criação de refúgios para a ictiofauna. Custos de reprodução baixos, pois a sua propagação vegetativa apresenta percentual de pega superior a 60 %. Serve como fonte de produção primária de material vegetal para outras obras.

ECOLOGIA

Espécie altamente adaptada à reofilia, típica de margens de rios e planícies alagáveis, além de pastagens e campos abertos em determinadas regiões. É extremamente tolerante à inundação e apresenta elevada capacidade de rebrota. Planta pioneira, de crescimento rápido, altamente eficiente na colonização de áreas abertas de várzea e campo. Comumente forma touceiras de indivíduos que podem ocupar grandes áreas e limitar o desenvolvimento de espécies menos adaptadas.

LOCAL DE APLICAÇÃO**TIPO DE INTERVENÇÃO**

Estacaria viva; Entrançado vivo; Feixes vivos; Esteira viva; Banqueta vegetada; Enrocamento vivo; Defletores; Grade viva; Parede krainer; Gabião vivo; Barragem de correção torrencial.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Engenharia Natural como disciplina técnico-científica recorre à utilização de material construtivo vivo que pode ser combinado, ou não, com materiais construtivos inertes.

Enquanto que o conhecimento sobre as propriedades e funções dos materiais inertes está consolidado pela Engenharia Civil, no caso das plantas como material construtivo os conhecimentos ainda são incipientes. No entanto do ponto de vista de material construtivo, os materiais vivos não diferem de outros materiais de engenharia e por isso devem ser estudados e compreendidos de forma semelhante.

Com a crescente procura e utilização de soluções de Engenharia Natural em obras de infraestrutura, surge a demanda de atribuição de maior rigor técnico à utilização de plantas como material construtivo, de forma a garantir o seu adequado desenvolvimento e exigências técnicas construtivas requeridas. Para atender a essa demanda propõe-se com este trabalho o desenvolvimento de uma metodologia de especificação de plantas do ponto de vista técnico considerando suas funções, ações e efeitos nas propriedades de engenharia dos solos. Apesar da vegetação também ter funções adicionais de natureza ecológica-ambiental, estética e socio-econômica, as mesmas foram consideradas de um ponto de vista secundário, uma vez que o enfoque deste trabalho foi analisar e considerar os critérios técnicos.

Entendendo a forma como as plantas agem na estabilização geotécnica, hidráulica e controle de processos erosivos superficiais elaborou-se um procedimento de especificação, que organiza a informação sobre as plantas como material construtivo, para que possa ser utilizada por todos os profissionais de equipes técnicas que trabalhem em Engenharia Natural ou Recuperação de Áreas Degradadas, desde a fase inicial de projeto, passando pela execução, manutenção e monitoramento.

Com base na metodologia de especificação de plantas, estruturou-se uma ficha técnica com tópicos específicos que disponibilizam informações que podem ser consultadas pelos diversos profissionais. A aplicabilidade da ficha técnica desenvolvida neste trabalho é exemplificado para cinco espécies autóctones do Brasil. Estes exemplos servem para esclarecer a forma como deve ser estruturada a

informação e como a mesma deve ser inserida em cada tópico que consta na ficha. Também servem para complementar e validar a aplicabilidade do procedimento proposto.

O uso da metodologia mostrou-se útil na organização e esclarecimento de conceitos e informações relacionados com a utilização de plantas em Engenharia Natural. Essa organização, por sua vez, tornou mais fácil entender quais as características morfo-mecânicas inerentes às plantas que resultam em funções técnicas hidrológicas e mecânicas, que por intermédio de um conjunto de ações, determinam efeitos (positivos) nas propriedades de engenharia dos solos, influenciando a resistência do solo ou a solicitação exercida sobre o mesmo.

A metodologia proposta pode mostrar-se eficiente na especificação da vegetação como material construtivo em obras de infraestrutura que recorram a soluções construtivas de Engenharia Natural.

No entanto, a utilização dessa metodologia não se restringe a obras de infraestrutura, podendo ser utilizado em intervenções de menor responsabilidade técnica. A metodologia proposta também é importante no direcionamento da pesquisa por espécies com potencial biotécnico.

Esta metodologia também poderá ser aplicada para elaboração de um catálogo biotécnico, que compile várias espécies com potencial para serem utilizadas em intervenções de Engenharia Natural. Especialmente no caso do Brasil, onde a utilização da Engenharia Natural é relativamente recente existe uma grande demanda por parte dos profissionais que atuam na área por publicações que compilem as espécies com potencial biotécnico reconhecido para serem utilizadas em intervenções de Engenharia Natural.

Para complementar os assuntos abordados nesta dissertação devem ser feitos estudos mais específicos e aprofundados sobre o potencial biotécnico das plantas, no que diz respeito às suas funções técnicas hidrológicas e mecânicas.

Pesquisas sobre a capacidade de propagação vegetativa de diferentes espécies nativas são essenciais, uma vez que existem tipologias construtivas na Engenharia Natural que requerem a aplicação de estacas vivas. Associada a esta pesquisa deverão ser feitos estudos sobre o estímulo ao enraizamento, ou seja, quais tratamentos (por exemplo, imersão em água, refrigeração, etc), poderão ser realizados para potencializar o enraizamento das plantas em obra.

Devem ser quantificados dados sobre as propriedades do sistema radicular, nomeadamente no que diz respeito à sua resistência à tração e a sua arquitetura. Sugere-se assim a realização de estudos mais específicos para obtenção de dados no contexto brasileiro, porque apesar de existirem alguns estudos sobre estas propriedades, a maior parte foi realizada para espécies arbóreas com interesse para a indústria madeireira ou para espécies de interesse agrícola. Deverá ser dado enfoque às espécies autóctones arbustivas, pois normalmente estas reúnem melhores qualidades biotécnicas para serem utilizadas em obras de Engenharia Natural.

Para o caso particular de vegetação ciliar é importante obter informações sobre o grau de tolerância à submersão de espécies reófilas, bem como da sua distribuição ao longo das margens. Estudos sobre flexibilidade e acerca da forma como diferentes espécies influenciam a rugosidade hidráulica e especificamente a velocidade de água em canais também são de extrema importância.

Importa salientar que no Brasil ainda são escassas as informações sobre quais são as espécies autóctones que apresentam potencial biotécnico para serem utilizadas em Engenharia Natural, e a maior parte da informação que existe está concentrada para aplicação nas regiões Sul e Sudeste.

Também devem ser desenvolvidas pesquisas no sentido de compreender como inserir dados referentes às plantas em dimensionamentos geotécnicos, nomeadamente no cálculo de fator de segurança em taludes. Podem ser quantificadas ações das plantas na sobrecarga em taludes, na redução da pressão neutra, transmissão das forças do vento, dissipação de cargas solicitantes através das raízes e quais os efeitos destas ações na redução ou aumento da solicitação ou da resistência.

É importante para o desenvolvimento futuro da Engenharia Natural como disciplina técnica, que os procedimentos e especificações de projeto, execução de obra, monitoramento e manutenção sejam padronizados, de forma a que não dependam da experiência pessoal dos intervenientes, para que possam ser replicados de forma eficaz e uniforme.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABATE, I. **Storia e Cultura dell' Ingeieurbiologie**. In: INGEGNERIA NATURALISTICA - UNA PERFETTA DISCIPLINA AMBIENTALE. Campobasso, Itália: 2013

ABATE, I.; GROTTA, M. **Ingegneria Naturalistica - Costruire con le Piante - Linee guida all'impiego delle piante negli interventi di ingegneria naturalistica in ambito mediterraneo**. Benevento: Edizione Lume, 2009.

ALBERTI, G. **Istruzioni pratiche per l' ingegnere civile: o sia perito agrimensore, e perito d' acque**. Veneza: Appresso Pietro Savioni sul Ponte de' Baretteri all'Insegna della Nave, 1748.

ALI, F. H.; OSMAN, N. Shear strength of a soil containing vegetation roots. **Soils and Foundations - Japanese Geotechnical Society**, v. 48, n. 4, p. 10, 2008.

ASSOCIAZIONE ITALIANA PER INGEGNERIA NATURALISTICA. **Regolamento per l'attuazione degli interventi di Ingegneria Naturalistica nel Territorio della Regione Campania**. Itália: AIPIN, 2002.

BENTO, D. **Fundamentos de resistência dos materiais**. Florianópolis, Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, Gerência Educacional Metal Mecânica - Curso Técnico de Mecânica, 2003. Disponível em: <<https://ecivilufes.files.wordpress.com/2011/03/fundamentos-de-resistc3aancia-dos-materiais-apostila.pdf>>

BENTRUP, G. **Conservation Buffers - Design Guidelines for buffers, corridors and greenways**. Asheville, USA: USDA, Forest Service, Southern Research Station, 2008.

BENTRUP, G.; HOAG, J. C. **The practical streambank bioengineering guide: user's guide for natural streambank stabilization techniques in the arid and semi-arid Great Basin and Intermountain West**. Aberdeen, Idaho: USDA Natural Resources Conservation Service, Plant Materials Center, 1998.

BIFULCO, C. **Engenharia Natural na reabilitação de taludes e vertentes**. In: 7º CONGRESSO RODOVIÁRIO PORTUGUÊS. Lisboa, Portugal: LNEC, 2013

BISCHETTI, G. B.; DI FIDIO, M.; FLORINETH, F. On the Origin of Soil Bioengineering. **Landscape Research**, v. 0, n. 0, p. 1–13, 2012.

BISHOP, D. M.; STEVENS, M. E. **Landslides on logged areas in Southeast Alaska**: US Forest Service Research Paper - NOR-1. Juneau, Alaska: USDA, Forest Service, Northern Forest Experiment Station, 1964.

BÖHM, W. **Methods of studying root systems**. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1979. v. 33

BONATTI, G.; MARONGIU, I. **Soil Bio-engineering Techniques for Slope Protection and Stabilization - Natural Resource Management Handbook**. Financed by the Humanitarian Aid and Civil Protection Department of the European Commission (ECHO) ed. Kujand, Tajikistan: Cesvi, 2013.

BOSSCHER, P.; GRAY, D. Soil Arching in Sandy Slopes. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 112, n. 6, p. 626–645, 1 jun. 1986.

CARVALHO, E. F. T. **Apostila de Materiais de Construção I - CIV 237** Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Engenharia Civil, , 2009.

CECCONI, M. et al. Deep Roots Planting for Surface Slope Protection. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 17, p. 2809–2820, 2012.

COOK, D.; HAVERBEKE, D. V. RB246 Trees and shrubs For Noise Abatement. **Historical Materials from University of Nebraska-Lincoln Extension**, 1 jan. 1971.

COPPIN, N. J.; RICHARDS, I. G. (EDS.). **Use of Vegetation in Civil Engineering**. 2ª. ed. London, UK: Construction Industry Research and Information Association (CIRIA), 2007.

CORNELINI, P.; FEDERICO, C.; PIRRERA, G. **Arbusti Autoctoni Mediterranei per L'Ingegneria Naturalistica - Primo contributo alla morfometria degli apparati radicali**. Regione Siciliana - Collana Sicilia Foreste: Azienda Regionale Foreste Demaniali, 2008.

CORNELINI, P.; FERRARI, R. **Manuale di Ingegneria Naturalistica per le Scuole secondarie**. Roma, Itália: Regione Lazio, 2008.

DE ANTONIS, L.; MOLINARI, V. **Ingenheria Naturalistica - Nozione e Tecniche di Base**. Itália: Società Consortile per Azione, Regione Piemonte, 2007.

DONAT, M. **Bioengineering Techniques for Streambank Restoration - A Review of Central European Practices**: Watershed Restoration Project Report 2. Canada: British Columbia, Watershed Restoration Program, Ministry of Environment, Lands and Parks and Ministry of Forests, 1995.

DURLO, M.; SUTILI, F. **Bioengenharia - Manejo biotécnico de cursos de água**. 3^a. ed. Santa Maria: Pallotti, 2014.

FAN, C.-C.; LAI, Y.-F. Influence of the spatial layout of vegetation on the stability of slopes. **Plant and Soil**, v. 377, n. 1-2, p. 83–95, 1 abr. 2014.

FERNANDES, J.; FREITAS, A. **Introdução à Engenharia Natural**. Portugal: EPAL - Empresa Portuguesa das Águas Livres, S.A., 2011.

FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas - aplicações na estabilidade de taludes**. 2^a. ed. Curitiba: Editora UFPR, 2011.

FLORINETH, F. **Pflanzen statt Beton - Handbuch zur Ingenieurbiologie und Vegetationstechnik**. Berlin – Hannover: Patzer Verlag, 2004.

FLORINETH, F.; MOLON, M. **Dispensa di Ingegneria Naturalistica**. Viena, Austria: Universidade de Bodenkultur, 2004.

FRIPP, J.; HOAG, C.; MOODY, T. **Streambank Soil Bioengineering: A Proposed Refinement of the Definition**: Riparian/Wetland Project Information. USA: United States Department of Agriculture - Natural Resources Conservation Service, 2008.

GRAY, D. H. CN; MEGAHAN, W. F. CN. **Forest vegetation removal and slope stability in the Idaho Batholith**. [s.l.] [Ogden, Utah]: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1981.

GRAY, D. H. **Effects of forest clear-cutting on the stability of natural slopes: results of field studies**: DRDA Project 002790. [s.l.] University of Michigan - College of Engineering - Department of Civil Engineering, 1973.

GRAY, D. H. **Creep movement and soil moisture stress in forested vs. cutover slopes: results of field studies**: DRDA Project 012577. [s.l.] University of Michigan - College of Engineering - Department of Civil Engineering, 1977.

GRAY, D. H.; LEISER, A. T. **Biotechnical slope protection and erosion control**. New York, USA: Van Nostrand Reinhold, 1982.

GRAY, D. H.; SOTIR, R. B. **Biotechnical and soil bioengineering - Slope stabilization - A practical guide for erosion control**. New York, USA: John Wiley and Sons, Inc., 1996.

GREENWOOD, J. R.; NORRIS, J. E.; WINT, J. Assessing the contribution of vegetation to slope stability. **Proceedings of the ICE - Geotechnical Engineering**, v. 157, n. 4, p. 199–207, 2004.

HOAG, J. C.; SHORT, H.; GREEN, W. **Planting Techniques for Vegetating Shorelines and Riparian Areas** Proceedings, U.S. Army Corps of Engineers Workshop on Reservoir Shoreline Erosion a national problem. **Anais...** In: WORKSHOP ON RESERVOIR SHORELINE EROSION A NATIONAL PROBLEM. McAlester, OK: US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station; Springfield, Va, 1992

HO, D. Y. F.; FREDLUND, D. G. **Increase in strength due to suction for two Hong Kong soils** Proceedings of the Geotechnical Conference on Engineering and Construction in Tropical and Residual Soils. **Anais...** In: ASCE GEOTECHNICAL CONFERENCE ON ENGINEERING AND CONSTRUCTION IN TROPICAL AND RESIDUAL SOILS. Honolulu, Hawaii: 1982

IBGE. **Vocabulário básico de recursos naturais e meio ambiente**. 2^a. ed. Rio de Janeiro: Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão; Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2004.

IP, J. **The Role of Roots in Slope Stability** FRST 497- Graduating Essay, , 2011.

KETTENHUBER, P. L. W. **Distribuição geográfica de espécies do bioma Mata Atlântica com potencial de uso em obras de Engenharia Natural em travessias duto-viárias**. Trabalho de conclusão de curso—Santa Maria, Brasil: Universidade Federal de Santa Maria, 2014.

KRUEDENER, A. **Ingenieurbiologie**. Munich-Basel: Verl. E. Reinhardt, 1951.

KRUEDENER, A.; BECKER, A. **Atlas standortkennzeichnender Pflanzen. Für Bauingenieure und Landeswirtschaftler herausgegeben von der Forschungsstelle für Ingenieurbiologie des Generalinspektors für das deutsche Straßenwesen**. Berlin: Wiking Verlag GmbH, 1941.

LEWIS, L. **Soil Bioengineering An Alternative for Roadside Management - A Practical Guide**. San Dimas, California, USA: United States Department of Agriculture, 2000.

MENEGAZZI, G.; PALMERI, F. **Il Dimensionamento delle Opere di Ingegneria Naturalistica**. Roma, Itália: Regione Lazio, 2013.

MORGAN, R. P. C.; RICKSON, R. J. **Slope stabilization and erosion control - A bioengineering approach**. 1^a. ed. London, UK: Chapman & Hall, 1995.

NERY, G. **Boletín Técnico - Monitoreo en la Construcción Civil**. [s.l.] Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción - ALCONPAT Inc., 2013.

NETO, C. et al. Carta de Vegetação Natural Potencial de Caldas da Rainha. **Finisterra**, v. XLIII, n. 86, p. 31–51, 2008.

NORRIS, J. E.; GREENWOOD, J. R. **Assessing the role of vegetation on soil slopes in urban areas** Congress Proceedings of the 10th IAEG International Congress. **Anais...**: 744. In: IAEG2006 - ENGINEERING GEOLOGY FOR TOMORROW'S CITIES. Nottingham, UK: 2006 Disponível em: <<http://www.icevirtuallibrary.com/content/article/10.1680/geng.2004.157.4.199>>.

Acesso em: 6 maio. 2013

O'LOUGHLIN, C.; ZIEMER, R. R. **The importance of root strength and deterioration rates upon edaphic stability in steep land forests** Proceedings of I.U.F.R.O. Workshop P.1.07-00. **Anais...** In: ECOLOGY OF SUBALPINE ECOSYSTEMS AS A KEY TO MANAGEMENT. Oregon State University, Corvallis, Oregon: 1982 Disponível em: <<http://www.treesearch.fs.fed.us/pubs/7889>>. Acesso em: 1 out. 2014

PINTO, N. L. S. et al. **Hidrologia básica**. 11^a. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 2008.

PORTO, R. **Hidráulica básica**. 4^a. ed. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 2006.

RAUCH, H. P. **Application of Soil Bioengineering Techniques for river engineering projects with special focus on hydraulics and morphological issues** Bilateral agreement for the academic year 2007/2009 - Lifelong Learning Programme: Higher Education ERASMUS between Universidade de Évora (Portugal) and University of Natural Resources and Applied Life Sciences (Austria), , 2008.

RAUCH, H. P. **Aplicação da Engenharia Natural em âmbito fluvial**. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA NATURAL. Foz do Iguaçu, 2014.

SAULI, G.; CORNELINI, P. **Manuale di Indirizzo delle Scelte Progettuali per Interventi di Ingegneria Naturalistica**. Roma, Itália: Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio, Direzione Generale per la Difesa del Suolo, Progetto Operativo Difesa Suolo (PODIS), 2005.

SAULI, G.; CORNELINI, P.; PRETI, F. **Manuale d'Ingegneria Naturalistica applicabile al settore idraulico**. Roma, Itália: Regione Lazio, 2002.

SAULI, G.; CORNELINI, P.; PRETI, F. **Manuale d' Ingegneria Naturalistica Applicabile ai Settori delle Strade, Cave, Discariche e Coste Sabbiose**. Roma, Itália: Regione Lazio, 2003.

SCHIECHTL, H. **Bioengineering for land reclamation and conservation**. Edmonton, Canada: Department of the Environment, Government of Alberta. University of Alberta Press, 1980.

SCHIECHTL, H.; STERN, R. **Ground bioengineering techniques for slope protection and erosion control**. Oxford, UK: Blackwell Science Ltd, 1996.

SCHIECHTL, H.; STERN, R. **Water Bioengineering Techniques for Watercourse Bank and Shoreline Protection**. Oxford, UK: Blackwell Science Ltd, 1997.

SOWERS, F. G. **Introductory Soil Mechanics and Foundations: Geotechnical Engineering**. 4^a. ed. New York, USA: Macmillan Publishing Co., 1979.

STOKES, A. et al. Soil bio- and eco-engineering in China: past experience and future priorities. **Ecological Engineering**, Special Issue: Vegetation and Slope Stability. v. 36, n. 3, p. 247–257, mar. 2010.

SUTILI, F.; GAVASSONI, E. **Pesquisa e aplicação da Engenharia Natural no Brasil** Proceedings Cascais World Forum 2012. **Anais...** In: "FÓRUM MUNDIAL DE CASCAIS: ENGENHARIA NATURAL E GESTÃO DO TERRITÓRIO - NOVOS DESAFIOS - II CONGRESS APENA - VII CONGRESS AEIP – VII CONGRESS EFIB. Cascais, Portugal: 2012

SUTILI, F. J.; DURLO, M. A.; BRESSAN, D. A. Potencial biotécnico do sarandi-branco (*Phyllanthus sellowianus* Müll. Arg.) e vime (*Salix viminalis* L.) para revegetação de margens de cursos de água. **Ciência Florestal**, v. 14, n. 1, p. 13–20, 2004.

TISAKA, M. **Norma Técnica para elaboração de orçamento de obras de construção civil - NORMA TÉCNICA IE – Nº 01/2011** Instituto de Engenharia, , 2011. Disponível em: <<http://ie.org.br/site/ieadm/arquivos/arqnot28482.pdf>>

TSUKAMOTO, Y. **Effect of vegetation on debris slide occurrences on steep forested slopes in Japan Islands** Proceedings of the Fiji Symposium. **Anais...**: 192. In: RESEARCH NEEDS AND APPLICATIONS TO REDUCE EROSION AND SEDIMENTATION IN TROPICAL STEEPLANDS. IAHS-AISH, 1990

VENTI, D. et al. **Manuale Tecnico di Ingegneria Naturalistica della Provincia di Terni. Applicabilità delle tecniche, limiti e soluzioni**. Itália: Provincia di Terni, Servizio Assetto del Territorio, 2003.

WATERWAYS RESTORATION INSTITUTE AND URBAN CREEKS COUNCIL. **Stream Bioengineering Workshop Handbook: Using Natural Materials and Non-Structural Techniques to Combat Soil Erosion and Restore Creeks**. Berkeley, USA: 2006.

WILKERSON, G. Depth-Averaged Velocity in Channels with Submerged and Unsubmerged Rigid Vegetation. In: **Impacts of Global Climate Change**. [s.l.] American Society of Civil Engineers, 2005. p. 1–10.

WU, T. H. **Investigation of Landslides on Prince Wales Island, Alaska**. Columbus, Ohio: Department of Civil Engineering, Ohio State University, 1976.

WU, T. H. Root reinforcement of soil: review of analytical models, test results, and applications to design. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 50, n. 3, p. 259–274, 14 jan. 2013.

WU, T. H.; MCKINNEL, W. P.; SWANSTON, D. N. Strength of tree roots and landslides on Prince Wales Island, Alaska. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 16, n. 1, p. 17, 1979.

XAVIER, A. C.; SOARES, J. V.; ALMEIDA, A. C. DE. Leaf area index changes with age among eucalypt clonal plantations. **Revista Árvore**, v. 26, n. 4, p. 421–427, ago. 2002.

ZEH, H. **Ingenieurbiologie Handbuch Bautypen**. Zurich: vdf Hochschulverlag an der ETH, 2007.

ZIEMER, R. R. **Logging effects on soil moisture losses**. PhD Dissertation—Fort Collins, Colorado: Colorado State University, 1978.

ZIEMER, R. R. **The role of vegetation in the stability of forested slopes** Proceedings of the XVII International Union of Forestry Research Organizations. **Anais...** In: WORLD CONGRESS. Kyoto, Japan: 1981